

广西湿热盆地城市建筑被动式喷雾蒸发降温技术应用研究

□ 杨 修 张禧龙 贺雪晴 胡棋誉 秦书峰

[摘 要] 本文基于南宁市建筑外窗热工环境存在的建筑外窗面积大，遮阳措施少；太阳辐射强度大，湿度高；可再生水资源利用率低；缺乏风环境规划等问题，分析建筑被动式喷雾蒸发降温技术及应用优势，即降温效率高、可增加空气湿度、可净化空气、基本配置较简单、运行费用低等，提出该技术应用特点，以期对相关行业的建设和发展提供借鉴。

[关键词] 建筑节能；建筑热工；细水喷雾；蒸发降温技术；可再生资源

随着城镇化率的提高，城市建成区面积不断扩大，城市下垫面的透水性越来越差，人均汽车拥有量大，是造成热岛效应显现的主要原因。近年来，广西年平均气温呈现逐渐上升的趋势，特别是南宁、百色、梧州等几个典型盆地城市。南宁市由于高山环绕等地形地势因素，会出现弱风、静风现象^[1]，平均风速低，导致室内热量不能及时排出外窗。因此，依赖空调降低室内温度，导致空调用电量持续不断增加。外窗是建筑节能的重点部位，解决外窗的降温问题是国内外学者的研究热点，而被动式喷雾蒸发降温技术是解决该问题的有效方法之一。

建筑喷雾技术是通过高压水泵和喷头将普通的水加压喷射成雾水，释放到空气和物体表面，水分子与空气、表面形成热交换蒸发，以此降低温度^[2]。南宁市有应用喷雾技术的条件及应用案例，如园博园、药用植物园、南湖公园等都采用了喷雾技术。景区内形成唯美的云雾美景，喷雾区域空气温度明显下降，是避暑纳凉的好去处，广受市民喜爱。但是，这种高效降温技术在建筑外窗的应用还较少，推广度也不高。本文分析南宁市建筑外窗热工存在的可再生资源利用问题，研究被动式喷雾蒸发降温技术在建筑外窗等透明围护结构中的应用。

1 建筑外窗热工环境存在的问题

本文对南宁市5大城区近30年住宅区建筑外窗现状

进行广泛的调研和分析，总结出以下问题。

1.1 建筑外窗面积大，遮阳措施少

建筑外窗遮阳能减少太阳辐射。目前许多建筑外墙使用大面积窗户，取消外窗遮阳设施，导致建筑围护结构和室内的温度因吸收过多太阳辐射而升高，空调制冷能耗居高不下。当前，新建建筑已经从单层玻璃幕墙向多层玻璃幕墙发展，然而节能效果并不明显。

1.2 太阳辐射强度大，湿度高

广西湿热盆地城市大多位于北回归线附近，由于受盆地地形地势的影响，从东南沿海吹来的季风被十万大山等阻挡，夏季降雨量、湿度大，风速低，且太阳辐射强度较大，日平均气温高，外窗接收到的太阳辐射不能及时被风带走，不利于建筑节能，详见表1。

表1 各城市典型气象数据一览表

城市	纬度	太阳辐射强度 (MJ/ m ²)	夏季平均 降水量 (mm)	夏季 月平 均湿度 (%)	夏季 平均 风速 (m/ s)	夏季平 均气温 (℃)
南宁	22°13'~23°32'	4583	212.10	80	1.28	28.20
百色	22°51'~25°07'	4756	185.00	79	1.39	28.10
梧州	22°58'~24°10'	4736	195.50	81	1.08	27.80
贵港	23°11'	4658	219.60	78	1.59	28.50
注：数据来源于《中国建筑热环境分析专用气象数据集》						

[基金项目] 2020年大学生创新创业训练计划项目“广西湿热盆地城市建筑外窗喷雾遮阳降温研究”（编号：自治区级No36）研究成果；广西高校中青年教师科研基础能力提升项目“桂南中部地区建筑外窗喷雾蒸发降温研究”（编号：2021KY0016）研究成果；国家自然科学基金地区项目“热湿气候丘陵盆地城市区域热环境设计研究”（编号51968003）研究成果。

[作者简介] 杨 修，广西大学土木建筑工程学院、广西工程防灾与结构安全重点实验室，教师；华南理工大学，博士研究生。

张禧龙，广西大学土木建筑工程学院，学生。

贺雪晴，广西大学土木建筑工程学院，学生。

胡棋誉，广西大学土木建筑工程学院，学生。

秦书峰（通讯作者），广西大学设计研究院，总建筑师，高级建筑师。

1.3 水资源循环利用率低，浪费严重

第一，居住小区雨水资源循环利用率低。南宁市虽然较早列入国家海绵城市示范城市，但在居住区项目大规模实施还是从2018年开始。由于设计、施工水平等客观因素，相关设备的使用率也相对较低。根据规划要求，新建项目径流总量控制率需达80%，改建项目经济总量控制率需达70%^[3]，然而，雨水资源可循环利用率仍相对较低，广西其他城市的海绵城市建设与南宁市相比较滞后，所以雨水资源循环的利用还大有可为。

第二，在广西多数湿热盆地地区，空调冷凝水资源得不到有效利用，造成很大的浪费。空调运行时，当空气中的水蒸气遇到低于空气露点温度的空调内部表面时，凝结成冷凝水并排放至出水口^[4]。大部分情况下，空调冷凝水可用于植物浇灌、冲洗及制冷等。调研发现大部分的空调冷凝水直接排放至地面水沟，未进行统一收集。空调冷凝水相对于其他水源，其优点是温度低、水质相对较好，不会产生水垢，具有一定的制冷能力。

第三，由于在城市建设中存在部分区域的雨水、中水、冷凝水无序排放等问题，如不能妥善处理，则容易滋生细菌，不利于营造安全卫生的生活环境。

1.4 缺乏风环境规划，局部地区静风频率高

从国土空间角度来看，各城市之间目前还未进行整体通风廊道的统一规划，总体风环境仍有待进一步研究。从城市层面来看，各城市总体规划中一般会编制风环境的规划，但是基于城市地形环境等客观原因，实施效果较难得到保障，而且以现有的技术也无法评估风环境的作用。从小区建筑布局来看，无论是哪个年代建设的小区，大部分都是封闭管理的状态，由于广西大部分城市沿街一般都设置成店铺，使得小区住宅及商业采用围合式布局，而且大多老旧社区内部没有设置底层架空，在如此的条件下，小区内部经常出现静风状态，通风环境较差。

2 基于被动式喷雾蒸发降温技术的可再生资源分析——以南宁市为例

作为典型的湿热盆地城市，南宁市的气象数据具有一定的普遍适用性，本文对南宁市进行可再生资源分析，包括太阳能及可再生资源特点。

2.1 太阳能资源特点及利用

南宁市年太阳能总辐射量为4362MJ/m²，从资源分类来看属于第3类地区（资源较一般地区），太阳能保证率为45%^[5]。李琳对太阳能发电效率的研究^[6]，南宁市的发电利用多面体的形式如图1所示。图中主要表达平屋面、斜屋面和垂直立面3个部分的发电效率，从中可以看

到斜面获得最多的太阳能辐射量，可为规划设计和建筑屋顶设计提供参考。

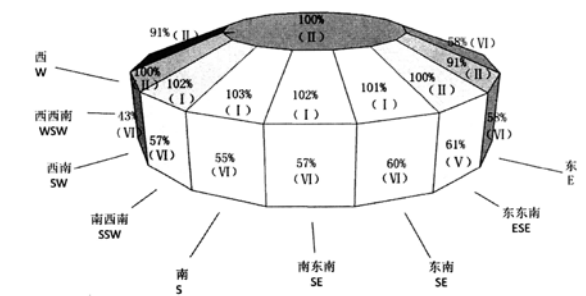


图1 南宁市太阳能利用多面体

2.2 可再生水资源利用分析

2.2.1 海绵城市建设

通过海绵城市的规划建设，雨水落到城市地面后，经透水路面、草地、公园渗透至集水管，再通过净化后回收，其余的可以由市政管道排向洼地，经过这些处理，可有效吸纳雨水，降低内涝风险。因南宁市年均降水量较丰富，在海绵城市建设规划的制定中，考虑实际地质情况，设定的年径流总量为75%左右，城市中心建成区控制量相对较低，市郊及五象新区要求相对较高。目前，存水主要用于绿化浇灌、道路冲洗等。如何高效利用存水将是未来主要考虑的方向。

2.2.2 空气湿度特点及冷凝水产生量计算

南宁处于夏热冬暖地区，降雨多，四周被高山包围，空气湿度高，空调使用时间长，因此会产生大量的冷凝水。而冷凝水具有温度低、水质软等优点，非常适用于建筑围护结构的降温，有很大的利用价值。郭玉润对冷凝水产生量的研究，按照新风空调系统冷凝水计算方法，在相关规范中可以查到南宁的气象数据（空调季时间为200d，干球计算温度34.5℃，湿球计算温度27.9℃，相对湿度61.4%），将数据代入计算公式得到南宁市的冷凝水产生潜力为627.52g water/kg air，在全国省会城市中排名第二^[7]。而南宁市夏季的实际空气湿度达到80%，高于规范数据，由此可见南宁市的冷凝水资源非常丰富。

总的来说，南宁市具备较好的太阳能资源利用条件，可以通过光伏发电系统提供一定的电力；并在水源方面具有良好的海绵城市基础设施，经过对海绵城市设施的利用研究，可提供可再生雨水资源；同时，空调运行也能够提供丰富的低温冷凝水资源。这些资源可以为被动式喷雾蒸发降温提供基础的应用条件。

3 建筑被动式喷雾蒸发降温技术及应用特点

3.1 建筑被动式喷雾蒸发降温技术的特点

(1) 降温效率高、效果显著。水经过加压泵和雾化喷头形成细水雾,水的表面积增加,蒸发吸收周边空气热量,气温得以降低。

(2) 增加空气湿度。喷出的水雾既能降低空气温度又可以增加空气的湿度,提高环境舒适度。

(3) 净化空气。喷雾形成的细水滴与漂浮的微尘相结合,待形成较大的水滴后由于重力作用降落到地面,可起到净化空气的作用。

(4) 基本配置较简单、运行费用低。由于喷雾设备较为简单,消耗水量较小,水泵能耗不高,运营费用相对较低。

3.2 喷雾蒸发降温的影响因素

(1) 空气流动的影响。喷雾可以降低周边空气温度,同时增加湿度,而湿度太大蒸发吸收的热量也随之减少,空气流动保证了蒸发效率。但是过大风速会将还未蒸发的水雾带走,同样会影响蒸发效率。

(2) 空气湿度的影响。湿热盆地城市空气湿度较高,使喷雾降温的效率较低。

(3) 雾化水滴大小的影响。水滴越小,同一单位的水形成表面积越大,越有利于蒸发冷却。

(4) 喷雾水压的影响。喷雾形成的水滴大小与水泵压力有关,压力达到一定的大小才能达到合适的喷雾效果。

3.3 建筑被动式喷雾蒸发降温技术应用特点

3.3.1 喷雾可以有效遮阳

喷雾形成的水雾可以有效遮挡阳光。经研究发现,喷雾可以遮挡太阳辐射进入室内,雾粒可以反射不需要的热辐射^[8],降低外窗及室内的热量。水雾还可以降低紫外线辐射进入室内,保护室内人员皮肤。

3.3.2 对外窗直接喷雾可以有效降低外窗温度,营造城市微气候条件

外窗喷雾被动蒸发可降低围护结构表面温度,农业建筑很早就应用该项技术保护温室内的植物。在建筑立面上应用该技术,可降低外窗表面温度,还可以降低窗外的空气温度,有利于营造室外空间小气候。同时,如建筑被动式喷雾蒸发降温技术能与地下蓄水系统衔接,还可以对城市街道喷雾降温,为行人提供凉爽的行走空间。日本东京街头采用从树上喷出细水雾的方式,降低街道空气温度^[9];丹麦哥本哈根的纳来布罗进行气候地砖试点项目,水雾从街道地砖中散发出来,实现“人在水上行走”的意境。屋顶、外墙、地面都可以采用被动式喷雾蒸发降温技术营造舒适的城市微气候环境,有利于降低热岛效应的影响。

3.3.3 喷雾可以有效利用可再生水资源

以往喷雾设备体量巨大,价格昂贵,喷射的雾滴粒径大,不适合应用于建筑环境中。而随着技术的发展,在高压水泵小型化,电力、水源得到保证的情况下,该技术的广泛应用成为可能。除了能利用太阳能光伏发电电力,还可以从海绵城市系统、空调冷凝水等多渠道获得水源,经过有效灭菌处理可应用于降温工程中。以上应用方式加强可再生资源的利用率,响应国家“碳中和”目标。

4 结语

建筑被动式喷雾蒸发降温技术是一种高效利用资源且节能的降温技术手段。广西湿热盆地城市具有良好的被动式喷雾蒸发降温技术应用条件,如果能在外窗及周边结构设置太阳能发电系统,可实现喷雾的电力供应,设置雨水、冷凝水蓄水设施将实现水源供应,加上建筑外窗遮阳的合理设计,完全可以实现建筑被动式喷雾蒸发降温一体化。在社会用电不断攀升、极端环境高频出现的情况下,采用被动式喷雾蒸发降温技术可合理利用可再生资源,降低建筑能耗,营造舒适的建筑热环境,实现人们对美好生活环境向往和追求。

[参考文献]

- [1] Li Y G, He J. Evaluating the improvement effect of low-energy strategies on the summer indoor thermal environment and cooling energy consumption in a library building: A case study in a hot-humid and less-windy city of China[J]. Building Simulation, 2021(12):1-15.
- [2] Barrow H, Pope C W. Droplet evaporation with reference to the effectiveness of water-mist cooling[J]. Applied Energy, 2007, 84(4): 404-412.
- [3] 中国城市规划设计研究院. 南宁市海绵城市规划设计导则[S]. 2015.
- [4] 周蔚. 空调冷凝水回收利用技术及实践分析[J]. 实验室科学, 2011, 14(5):66-68.
- [5] 翟滢莹, 何江, 徐继贤, 等. 广西太阳能热水系统与高层住宅一体化应用研究[J]. 广西城镇建设, 2013(8):111-115.
- [6] 李琳. 光伏直流微电网系统在城市住区中的应用设计研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [7] 郭玉润. 空调冷凝水应用于玻璃幕墙的传热研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [8] Gonome Hiroki, Wakabayashi Kohei. Solar barrier performance of water mist cooling: Applications using nano- and micro-sized droplets and bubbles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171(12):115083.
- [9] Ulpiani Giulia. Water mist spray for outdoor cooling: A systematic review of technologies, methods and impacts[J]. Applied Energy, 2019(254):113647.