# 青年基金全文

## 三维视角下城市河流冠层热环境效应及其驱动机制研究

## 中文摘要

城市热岛效应是影响城市居民舒适程度和城市能量消耗等社会经济指标的重要现象，属于城市规划科学的前沿问题。在缓解城市热岛的措施中，河流的热效应关注较少，尤其是缺乏行人水平高度的河流热环境效应时空变化的理解。另外，在相应影响因素方面，目前的研究大多关注土地利用与覆盖特征等二维指标、背景天气变量等，对三维空间形态特征的关注较少。本项目拟以重庆市为例，通过将移动观测、固定站点观测和模型模拟等手段相结合来分析不同尺度下河流对滨江地区热环境效应的时空变化特征，量化环境因素对河流热环境效应的影响。本项目将在以下三个方面开展研究。首先，选择三个代表性的土地利用类型，并通过固定站点观测和移动观测相结合的方式关注各类型样地热环境效应在微尺度的时空变化。然后，将研究扩展至局部气候区尺度，通过该尺度的观测与分析建立热环境效应与环境因素的定量关系；最后，对不同局地气候区进行城市气候建模，分析不同建筑布局下的气候变量的时空格局。

## 请阐明选择该科学问题属性的理由（800字以内）：

城市化背景下，地表土地覆盖与利用、建筑三维特征等因素在决定城市气候方面起着重要作用。作为关键的地表土地覆盖类型，河流在长江流域上游城市分布较广，能在很大程度上影响周边城市区域的热环境特征。然而，河流对周边地区热环境效应的研究大多基于遥感地表温度数据，缺乏对行人水平高度热状况的深入认识。由于卫星重访周期的限制，基于遥感反演提取的地表温度数据仅代表一天特定时间点的状况，不能反映热环境特征在一天内随时间的变化和累积状况。目前常用于量化水体对周边区域热环境效应的指标主要有水体降温强度（Water Cooling Intensity, WCI）、水体降温距离（Water Cooling Distance, WCD）和水体降温梯度（Water Cooling Gradient, WCG）等。然而，这些指标均不能反映水体热环境效应的动态变化特征。事实上，在一天的不同时间，水体热环境效应的影响因素以及驱动机制存在差异。另外，相对于土地利用与覆盖指标、背景气候变量等指标，目前对三维因素对河流热环境效应的研究较少，驱动机制的理解不够。本项目针对上述研究不足，以长江流域上游城市重庆市为例，开展对滨江地区的热环境实地观测和模型模拟研究，提出局地河流降温强度和局地河流热指数效应，建立河流热环境效应的新的评估体系，在不同尺度分析河流热环境效应的影响因素，尤其是关注建筑三维特征的角色及其与二维特征影响的关系，解释相应过程背后的驱动机制。相关研究结果有助于理解不同的建筑三维空间形态指标对滨江地区热环境的影响，尤其是在热浪期间对高温的缓解作用，从而为相关地区的城市规划与设计提供科学参考，以科学应对未来城市化和气候变化带来的城市过热、居民健康风险增加等问题，从而提升城市适应未来气候变化的能力，属于“需求牵引，突破瓶颈”。

## （一）立项依据与研究内容（建议8000字以内）：

### 1. 项目的立项依据（研究意义、国内外研究现状及发展动态分析，需结合科学研究发展趋势来论述科学意义；或结合国民经济和社会发展中迫切需要解决的关键科技问题来论述其应用前景。附主要参考文献目录）；

#### 1.1. 研究意义

城市热岛是城市地区地表和大气温度高于周边地区的现象，其普遍地存在于我国乃至全球的多数城市。作为典型的区域气候特征，它可以影响城市的能源消耗，改变居民的热舒适度。在盛夏季节，受到城市热岛的影响，老年人等脆弱群体的健康风险显著增加（Patz et al., 2005）。而在冬季，城市热岛则可在一定程度上缓解严寒气候带来的危害。在气候变化的背景下，城市热岛将增加极端天气、城市生态系统恶化等事件的风险，使得我国城市的人居环境面临更加严峻的挑战。2022年夏季，我国四川盆地发生历史罕见的异常高温事件，多地气温打破有气象观测记录以来的历史极值。此次异常高温事件导致城市居民户外活动强度下降，用电紧张，部分工业企业停产，对该区域内主要城市的社会经济活动造成极大影响。因此，对城市空间形态、土地利用等因素对城市气候影响的理解亟需加强，以有效通过城市规划和设计的手段缓解城市极端天气带来的危害。在2016年，国家发展改革委、住房城乡建设部联合制订了《城市适应气候变化行动方案》，旨在通过城市规划等手段进一步提升我国城市适应未来气候变化的能力。

在众多将城市气候与环境特征相关联的研究中，城市内的土地覆盖和利用、建筑的三维特征、道路和建筑表面材料属性以及通风特征等均被发现对城市气候影响显著。相应地，调节城市气候的主要措施包括：优化各土地利用类型的布局、采用高反照率地表材料和促进城市通风等（Pan et al., 2019; Mohajerani et al., 2017; 任超等，2014）。在土地利用类型布局优化的实践中，蓝绿空间（即城市内的水体和绿地）的布局则是较为普遍的一种方式。与城市中大面积覆盖的不透水表面相比，绿地和水体等表面类型通常具有较低的温度，有助于在城市内形成“冷岛”。城市绿地主要通过促进地表蒸散、增加遮阴的手段来强化降温效应。而对于城市水体，其相对于不透水表面具有更大的比热容和更低的热传导率，因此在白天升温速度较慢，充当着热缓冲器的作用 (Oke et al., 2002）。通过空气平流，水体之上较冷的空气进入周边区域并达到降温的效果。已经有大量研究分析了绿地的不同特征对周边温湿环境的影响（杨士弘，1994；袁振等；2017；Priya et al., 2021）。有研究发现，在相同的天气条件下，城市水体通常比绿地具有更低的表面温度，对周边环境的降温效果更强（Lin et al., 2020）。然而，相较于城市绿地的温湿效应研究而言，不同类型水体的特征以及水体周边环境的特征对城市温湿效应影响的研究相对有限。我国长江流域上游属于亚热带季风气候，冬季阴冷潮湿，夏季高温多雨。在该流域的部分城市，不同宽度的河流穿城或绕城而过。这些城市部分区域的气候特征受到河流的影响 （Cheng et al., 2019）。然而，在城市水体温湿效应的研究中，对湖泊的关注较多，河流影响的研究不足，对河流对周边区域气温、相对湿度影响的理解有限，更不清楚河流温湿效应对周边区域土地利用与覆盖特征、城市空间形态特征等环境因素的响应规律和机制。

目前的研究已经从不同的角度分析了环境因素对水体温湿效应的影响。大量研究已经表明，水体自身的面积和形状对该效应影响显著。随着自身面积的增加，水体在白天的降温效应的影响范围也相应地增加，但增加速率逐渐降低 （Sun et al., 2012）。对于水体形状而言，一般认为水体越接近圆形，其降温潜力就越强 ，其被推断是由该类型水体与周围景观之间较大的温度和湿度梯度所导致（Li et al., 2014）。另外，水体周边的土地覆盖特征也对水体的热环境效应有显著的影响 （Du et al., 2016）。实际上，在具体的城市规划与设计实践过程中，重点考虑的因素不仅仅有土地利用的布局，还包括建筑的分布格局、密度、朝向等三维特征，其通过影响地表辐射平衡、通风效应等环境过程使微气候特征发生显著变化。比如，较高的街区高宽比可以通过增加行人水平高度的阴影面积来改善夏季的热环境 （Muniz-Gäal et al., 2020）。而天空开阔度（Sky View Factor, SVF）对城市气候的影响更为复杂。一方面，更高的天空开阔度有助于增强密集建筑环境中的空气流通以降低温度（Yang et al., 2013）；另一方面，较低的天空开阔度可以使得入射到地表的太阳辐射减少，从而降低表面温度 (Jamei et al., 2016)。天空开阔度对城市气候的具体影响取决于这两个效应各自的相对贡献。然而，在水体温湿效应的驱动因素方面，目前的研究主要局限在二维因素，如水体形态和面积、周边土地覆盖、与水体的距离等，对三维特征影响的认识仍然存在不足。这限制了对水体温湿效应的全面认识。因此，有必要深入研究建筑三维特征对水体热环境效应的影响强度和范围及其与二维特征影响的关系。这将有助于加深目前对城市气候的适应措施的认识，以在城市规划中有针对性地改善滨水区域建筑的布置，从而提升城市居民的福祉。

#### 1.2. 国内外研究现状及发展动态分析

随着越来越多的数据公开可用，遥感分析逐渐成为城市水体热环境效应的主要研究手段。这些分析基于不同尺度的地表温度空间格局。相对于通过有限站点实地测量获取的温度，其能够提供更广泛表面的地表温度信息。然而，遥感分析在城市气候研究中仍然存在一些不足。首先，大气温度与地表温度之间存在着一定的差异性（Azevedo et al., 2016）。根据在我国长春的一项研究，尽管地表温度与气温存在正相关关系，但地表温度在夏季显著高于气温，在冬季则低于气温 （Yang et al., 2020）。事实上，地表温度与气温的关系较为复杂，受土地利用与覆盖、地理位置、观测时间等多方面因素的综合影响（Hooker et al., 2018）。城市微气候调节的目的不仅仅是对地表温度的改变，更重要的是要进一步理解并优化行人水平高度的热环境，从而提升居民的热舒适性。因此，直接使用地表温度来表征城市[热环境的](https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/thermal-environment" \o "Learn more about thermal environment from ScienceDirect's AI-generated Topic Pages)状况可能并不合适，尤其是在关注热环境的空间格局时。其次，受到遥感卫星重访周期的影响，遥感图像的时间分辨率相对较低，多数基于遥感的地表温度研究仅反映一天特定时间点的气候特征。目前常用于量化水体对周边区域热环境效应的指标主要有水体降温强度（Water Cooling Intensity, WCI）、水体降温距离（Water Cooling Distance, WCD）和水体降温梯度（Water Cooling Gradient, WCG）等（Yao et al., 2022）。然而，这些指标均不能反映水体热环境效应的动态变化特征。事实上，在一天的不同时间，水体热环境效应的影响因素以及驱动机制存在差异。在清晨，增强的太阳辐射使水面升温，诱发对流垂直输送，水面蒸发增强，同时水体与周边环境的温度梯度也逐渐增加。在午后时段，大气对流不稳定，蒸发通量和水体与周边环境的温度梯度通常达到最大值。由于建筑物、植被等的遮挡作用，此时城市滨水区域内部的净辐射值也存在较大的空间分异。而在夜间，周边区域温度随时间的变化主要受地表储热释放的影响，且由于水体的储热效应，水体降温效应减弱或者甚至转变为升温效应（Oke et al., 2002）。另外，遥感图像的反演不考虑从显热到潜热的转换，遥感监测的每个栅格值也仅代表特定区域内的平均情况，不能有效反映温度在小尺度范围内的空间分异特征。总之，基于遥感的地表温度分析有一定的局限性，尤其是在对居民户外活动活跃时间段内的累积和平均效应的理解方面存在不足，有必要提出新的指标来表示水体热环境效应随时间变化的综合作用。

对气象参数的实地观测分析方法主要包括固定站点观测和移动观测分析。固定站点观测通过选定合适观测站点并固定仪器以进行相对长期的气象观测。该方法对观测站点周边环境的稳定性具有一定要求。而移动测量方法则是利用可移动的气象观测设备沿着预先规划的路线在研究区域内开展相关数据的测量。相对于固定站点观测，移动观测更为灵活，测量设备的安装较为容易，可以以相对较低的成本进行高密度城市气候观测。由于其便利性，该方法已经在部分城市气候测量研究中使用（江斯达等，2020）。在该测量方法中，仪器的移动主要依赖机动车或者步行，其中后者由于受到移动速度的限制只适用于微尺度的测量。总之，基于固定站点观测和移动观测相结合的手段的研究可以有效弥补遥感观测分析的不足，有助于准确认识水体在行人水平高度的热环境效应及其与环境因素的关系。

随着城市化的推进和气候变化的持续，预计未来我国城市热浪的发生频率将会继续增加。目前相关研究对热浪事件的描述主要基于最大强度、持续时间和发生频率等指标（Xu et al., 2016），其可通过空气温度、表观温度或热指数（Heat Index, HI）来计算。与基于温度计算的指标相比，基于表观温度和热指数计算的热浪指标同时考虑了温度和湿度，这可能更好地反映了人类的热应激，尤其是在气候湿润的城市。高湿度对人体通过汗液排热的有负面影响，不利于人体温度的下降（An et al., 2020）。已经有大量研究分析并量化了各城市热岛缓解措施的降温增湿效应。然而，目前未发现有研究对各措施对热浪特征的具体影响进行量化，如热浪强度、持续时间以及热浪的发生频率。有必要将水体的热环境效应与当地夏季气候数据相结合，以量化具体城市热岛缓解措施对特定城市热浪特征的影响。

湖泊和河流是城市水体的主要类型，两者具有不同的形态特征。多数城市湖泊面积较小，并分散于城市内各处，而河流呈狭长型线性布局，多数贯穿整个城市或绕城市而过。由于上述不同，河流与湖泊对周边区域的热环境效应存在差异。比如，在我国东北城市长春和吉林市，河流对周边区域的降温作用显著强于湖泊和绿地 （Xue et al., 2019）。目前，针对湖泊对周边区域热环境影响的研究较多，如朱春阳 （2015）利用小尺度野外观测的方法分析了武汉14个湖泊的降温效应。相对应的是，河流热环境效应的研究较为有限，尤其是对河流对气温和相关热浪特征影响的理解还非常匮乏，更不清楚相应的驱动机制。

针对上述的研究进展和不足，我们拟以重庆市为例，通过将移动观测、固定站点观测和模型模拟相结合的手段来分析不同尺度下河流对滨江地区热环境效应的空间格局及其在一天中随时间的变化，量化环境因素对河流热环境效应的影响，并估算相应因素对典型热浪特征的缓解作用，尤其是关注建筑三维特征的角色及其与二维特征影响的关系，解释相应过程背后的驱动机制，从而为城市滨江地区的城市规划与设计提供参考，以科学应对未来城市化和气候变化带来的城市过热、居民健康风险增加等问题。

主要参考文献：

袁振, et al. "基于 TM 影像的哈尔滨市主城区绿地降温作用研究." 地理科学 10 (2017): 1600-1608.

江斯达, et al. "局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展." ACTA GEOGRAPHICA SINICA 75.9 (2020).

朱春阳. "城市湖泊湿地温湿效应——以武汉市为例." 生态学报 35.16 (2015): 5518-5527.

李书严,轩春怡,李伟,等.城市中水体的微气候效应研究[J].大气科学,2008, 32(3):552-560.

Oke, Timothy R. Boundary layer climates. Routledge, 2002.

An, N.; Dou, J.; González-Cruz, J.E.; Bornstein, R.D.; Miao, S.; Li, L. An Observational Case Study of Synergies between an Intense Heat Wave and the Urban Heat Island in Beijing. J. Appl. Meteorol. Climatol. 2020, 59, 605–620

Xu, Z.; FitzGerald, G.; Guo, Y.; Jalaludin, B.; Tong, S. Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: A systematic review and meta-analysis. Environ. Int. 2016, 89–90, 193–203.

Yang, Chaobin, Fengqin Yan, and Shuwen Zhang. "Comparison of land surface and air temperatures for quantifying summer and winter urban heat island in a snow climate city." Journal of environmental management 265 (2020): 110563.

Cao, Jie, et al. "Within-city spatial and temporal heterogeneity of air temperature and its relationship with land surface temperature." Landscape and Urban Planning 206 (2021): 103979.

Azevedo, Juliana Antunes, Lee Chapman, and Catherine L. Muller. "Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations." Remote Sensing 8.2 (2016): 153.

Muniz-Gäal, Lígia Parreira, et al. "Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate." Building and Environment 169 (2020): 106547.

Huang, Xin, and Ying Wang. "Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 152 (2019): 119-131.

Jamei, Elmira, et al. "Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort." Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 (2016): 1002-1017.

Yang, Feng, Feng Qian, and Stephen SY Lau. "Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai." Building and environment 70 (2013): 122-137.

Priya, Udayasoorian Kaaviya, and Ramalingam Senthil. "A review of the impact of the green landscape interventions on the urban microclimate of tropical areas." Building and Environment 205 (2021): 108190.

Pan, Zhuokun, et al. "Characterizing urban redevelopment process by quantifying thermal dynamic and landscape analysis." Habitat International 86 (2019): 61-70.

Muniz-Gäal, Lígia Parreira, et al. "Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate." Building and Environment 169 (2020): 106547.

Mohajerani, Abbas, Jason Bakaric, and Tristan Jeffrey-Bailey. "The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete." Journal of environmental management 197 (2017): 522-538.

Jusuf, Steve Kardinal, et al. "The influence of land use on the urban heat island in Singapore." Habitat international 31.2 (2007): 232-242.

Patz, J.A.; Campbell-Lendrum, D.; Holloway, T.; Foley, J.A. Impact of regional climate change on human health. Nature 2005, 438, 310–317

Yao, R., Wang, L., Huang, X., Liu, Y., Niu, Z., Wang, S., & Wang, L. (2021). Long-term trends of surface and canopy layer urban heat island intensity in 272 cities in the mainland of China. Science of the Total Environment, 772, 145607.

Understanding the relationship between urban blue infrastructure and land surface temperature

Lin, Yi, et al. "Water as an urban heat sink: Blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration." Journal of Cleaner Production 262 (2020): 121411.

Hooker, Josh, Gregory Duveiller, and Alessandro Cescatti. "A global dataset of air temperature derived from satellite remote sensing and weather stations." Scientific data 5.1 (2018): 1-11.

Sun, R., Chen, A., Chen, L., & Lü, Y. (2012). Cooling effects of wetlands in an urban region: The case of Beijing. Ecological Indicators, 20, 57-64.

Li, C., Yu, C.W., 2014. Mitigation of urban heat development by cool island effect of green space and water body. Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, pp. 551–561. <https://doi.org/10.1007/978-3-642->39584-0\_62.

Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q., & Hu, H. (2017). Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. Ecological Indicators, 72, 738-746.

Cao, J., Zhou, W., Zheng, Z., Ren, T., & Wang, W. (2021). Within-city spatial and temporal heterogeneity of air temperature and its relationship with land surface temperature. Landscape and Urban Planning, 206, 103979.

Wong, Man Sing, et al. "A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis." Building and Environment 45.8 (2010): 1880-1889.

Steeneveld, Gert J., Sytse Koopmans, Bert G. Heusinkveld, and Natalie E. Theeuwes. "Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect." Landscape and Urban Planning 121 (2014): 92-96.

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., ... & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). International journal of biometeorology, 56(3), 481-494.

Bernard, Thomas E. "Prediction of workplace wet bulb global temperature." Applied occupational and environmental hygiene 14.2 (1999): 126-134.

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. International journal of biometeorology, 51(4), 323-334.

Xu, Min, et al. "Outdoor thermal comfort of shaded spaces in an urban park in the cold region of China." Building and Environment 155 (2019): 408-420.

Sun FY, Liu M, Wang YC, Wang H, Che Y(2020) The effects of 3D architectural patterns on the urban surface temperature at a neighborhood scale: relative contributions and marginal effects. J Clean Prod. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120706

Xue, Zhenshan, et al. "Quantifying the cooling-effects of urban and peri-urban wetlands using remote sensing data: Case study of cities of Northeast China." Landscape and Urban Planning 182 (2019): 92-100.

Cheng, L., Guan, D., Zhou, L., Zhao, Z., & Zhou, J. (2019). Urban cooling island effect of main river on a landscape scale in Chongqing, China. Sustainable Cities and Society, 47, 101501.

Yao, X., Zhu, Z., Zeng, X., Huang, S., Liu, Q., Yu, K., ... & Liu, J. (2022). Linking maximum-impact and cumulative-impact indices to quantify the cooling effect of waterbodies in a subtropical city: A seasonal perspective. Sustainable Cities and Society, 82, 103902.

### 2. 项目的研究内容、研究目标，以及拟解决的关键科学问题（此部分为重点阐述内容）

本项目以重庆市城市滨江地区为研究区域，基于移动观测、固定站点观测和模型模拟相结合的手段，对河流的热环境效应及其驱动因素开展多尺度研究。首先，在微尺度（100 m × 100 m）开展河流热环境效应的观测与分析；然后，将研究扩展至局部气候区尺度，通过该尺度的观测与分析建立热环境效应与环境因素的定量关系；最后，对不同局地气候区进行城市气候建模，分析不同建筑和植被布局下的气候变量的时空格局。

#### 2.1. 研究内容

##### 2.1.1. 河流热环境效应的微尺度观测与分析

（1）河流热环境效应的微尺度观测

针对城市滨江区域的每个土地利用类型（广场、中低层建筑和高层建筑），选择一个代表性的微尺度样地（100 m × 100 m）。在一年四个季节各选择一天，对每个样地通过固定站点观测和移动观测相结合的方式，在居民活动的主要时间段（9:00 - 21:00）开展气象参数的测量活动。

（2）河流热环境效应的微尺度分析

基于微尺度观测的数据分析各测量点的气温、热指数以及河流热环境效应指标，探究不同土地利用类型下的河流热环境效应及其在一天内随时间的变化。选择具有代表性的环境因素，通过量化热环境效应与背景气候、场地空间形态特征和土地覆盖与利用的相关性，刻画气流、建筑遮阴等多个过程对河流热环境效应的作用，厘清其时空变化背后的驱动机制。

##### 2.1.2. 河流热环境效应的局地气候区尺度观测与分析

（1）河流热环境效应的局地气候区尺度观测

根据长江流域上游城市常见的局地气候区类型，选择3个典型街区，分别代表紧凑型中低层街区、开放型高层街区和大型低层街区。基于各街区内部的空间形态特征，相对均匀地布置站点，并在一年四个季节各选择一天，通过固定站点观测和移动观测的方式，在居民活动活跃的时间段测量包括气温、相对湿度在内的气象变量。

（2）河流热环境效应的局地气候区尺度分析

利用遥感和地图数据分析量化各站点邻近区域的空间形态特征和土地利用特征指标，理解不同街区空间格局的差异性。同时计算各街区的河流热环境效应相关指标及其随时间的变化特征，通过相关分析探究各环境因素（尤其是三维空间形态因素）对各街区河流热环境效应的影响，厘清局地气候区尺度下背景天气和空间形态对气候的影响机制。

##### 2.1.3. 河流热环境效应的局地气候区模拟

（1）模型模拟的初始化和情景设置

将实地观测的数据作为输入，基于Envi-met城市气候模型对上一部分观测的3个典型局地气候区尺度街区开展热环境模拟，再通过基于固定气象站测量的数据对模拟精度进行验证。验证指标采用均方根误差RMSE和R2。当模型模拟精度达到要求时，通过对建筑高度和建筑密度的调整来设置不同的模拟情景，并进一步模拟分析不同情景下的气象变量和河流热环境效应。

（2）模型模拟结果的分析

在不同情景设置下对不同气象变量的模拟结果进行分析，量化街区尺度的空间形态特征及土地利用特征对城市气候的影响，尤其是要关注对河流热环境效应的影响。通过对气候变量空间格局的可视化，阐释不同城市地表要素（如广场、植被、不同类型的建筑）对城市气候的驱动机制。该研究可作为对实地调查数据在区域空间分析上的不足的补充，同时也为城市规划与设计提供更全面地参考。

#### 2.2. 研究目标

本项目围绕城市化背景下的城市气候调节这一前沿科学问题，聚焦前人研究中较少关注的河流热环境效应，以长江流域上游城市重庆市为例，旨在通过固定站点观测、移动观测和模型模拟相结合的方法，建立河流热环境效应的新的评估体系，量化环境因素对河流热环境效应的影响，并估算相应因素对典型热浪特征的缓解作用，尤其是关注建筑三维特征的角色及其与二维特征影响的关系，解释相应过程背后的驱动机制，从而为城市滨江地区的城市规划与设计提供参考。

#### 2.3. 拟解决的关键科学问题

（1）如何突破当前对河流热环境效应遥感研究的局限性，在行人水平高度针对不同尺度理解该效应的时空特征？

（2）三维视角下河流热环境效应的影响因素有哪些？三维空间形态特征对该效应时空变化的贡献有多少？如何基于三维空间形态特征与河流热环境效应的关系为未来城市规划与设计提供建议？

### 3. 拟采取的研究方案及可行性分析（包括研究方法、技术路线、实验手段、关键技术等说明）；

针对上述的研究内容和目标，本项目构建河流对周边区域热环境效应的评估体系，尤其关注对热浪特征的影响，以“指标评估——时空响应——驱动机制”作为研究线索，通过基于实地测量和模型模拟的分析，对应开展河流热环境效应的微尺度观测、局地气候区尺度观测和局地气候区模拟三大研究内容，理解长江流域上游城市的热环境过程，为未来通过城市规划和设计实现更宜居的城市环境提供科学依据。项目技术路线如图1所示：

本项目拟在位于我国长江流域上游的重庆市开展观测和模拟研究。研究区域为滨江城市区域，江面宽度在700 - 1000米之间，而研究区域的海拔略高于江面。研究区气候类型为亚热带季风气候，夏季炎热潮湿，冬季阴冷，日照偏少。建筑和道路沿江岸布局，包含不同类型的局地气候区，包括紧凑型中低层街区、开放型高层街区、大型低层街区等，在长江流域上游城市中具有很好的代表性。

#### 3.1. 研究方案

##### 3.1.1. 河流热环境效应的微尺度观测与分析

城市街区内空间形态特征对周边局地微尺度气候有显著的影响。本项目将选择滨江城市区域代表性的城市土地利用类型来分析相应空间形态特征的作用。根据长江流域上游城市滨江区域的主要土地利用状况，广场、中低层建筑和高层建筑被选择为研究对象。对每一类型，根据地理位置、空间形态特征、场地条件和地形条件选择一个样地。各样地的空间尺寸为100 m×100m ，涵盖选定的土地利用类型和周边的相关区域（如广场和周边的建筑、住宅和周边的道路等）。各样地在重庆市的位置和遥感图像如图2所示。对每个样地设置25 - 30个移动测量点进行实地测量。在每个小时的整点开始一轮气象观测，因此在一个研究日需进行12轮观测。由于各样地内不同移动测量点的测量时间存在差异，因此需要在各样地中心位置分别设置一个固定测量站点，作为移动测量的校准。在进行数据分析时，来自移动测量点的气象数据需要根据测量时刻与参考时刻（每一轮测量的起始时刻）对应气象变量在固定观测站点的差值进行调整，从而在最大程度上降低移动测量时间不一致对数据分析造成的影响。

对每个样地，在一年四个季节各选择一个低风速无云晴天，通过固定站点观测和移动观测的方式开展实地测量活动。低风速无云晴天的选择是为了避免大尺度天气背景因素（背景风、云量、降水等）对研究范围内气象变量的影响。考虑到安全问题和后勤安排，测量从9:00到21:00进行，涵盖了白天最热的时段和人们户外活动仍然活跃的晚间时段。使用HOBO便携式气象站进行测量，测量的气象变量包括气温、相对湿度、风速、风向和太阳辐射。

对于研究区域内的3个样地，分别分析不同季节的气象变量以及河流热环境效应的相关指标，探究其空间分布及其随时间的变化，阐释一天内不同时期土地利用对微尺度气候的影响机制。在上午、午后、夜间三个时期各选择一个时刻，对每个时刻的热环境效应相关指标与环境因素进行相关分析，判断热环境效应对各环境因素的敏感性，并筛选出影响显著的环境因素，基于多元回归模型建立河流热环境效应的估算模型。

##### 3.1.2. 河流热环境效应的局地气候区尺度观测与分析

根据重庆市的局地气候区特征选择了位于长江沿岸的三个街区（图2）。街区一位于江津区几江街道，代表紧凑型中低层街区。该街区的建筑主要以6-7层旧式建筑为主，分布较为密集，绿色植被较少。街区内多数道路狭窄，宽度小于20米。街区二位于江津区鼎山街道，代表开放型高层街区。该街区的建筑多为约90米高的高层住宅，建筑密度相对较低，且街区内绿色植被分布较多，以草本为主。同时，该街区内多数道路较宽，宽度大于30米。街区三位于巴南区的大江工业园，代表大型低层街区。街区内植被分布较少，以乔木为主。建筑以一层工业用房为主，高度低于10米。在每个街区各设置30余个移动观测点。各移动观测点需均匀地布置在对应的街区范围内，能较为全面地代表各街区内部的空间形态特征分异。在实际的实地测量活动中，出于安全性的考虑且为了避免车辆的干扰，移动测量点应设置在人行道上距建筑相对较远的位置。



图2 本项目所选3个局地气候区在重庆市的位置

 

1. (b)



(c)

图3 本项目所选3个局地气候区的遥感图像

在四个季节各选择一个低风速无云晴天，通过固定站点观测和移动观测的方式在9:00到21:00期间使用HOBO便携式气象站分别对气温、相对湿度、风速、风向和太阳辐射进行测量。在每个小时的整点开始一轮气象观测。

根据以前的研究，除滨河区域的空间形态特征以外，可能影响河流热环境效应的因素还包括河流特征、背景气象条件等。本研究在数据可获取的前提下，选择以下变量作为潜在的影响因素用于后续分析：

1. 城市三维空间形态特征：平均建筑高度、天空开阔度、容积率、正面面积指数（Frontal Area Index）和建筑高度标准差。
2. 城市土地覆盖与利用特征：不透水面覆盖率、建筑面积比、建筑的斑块形状指数、绿地覆盖率、归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）、绿地的斑块形状指数。
3. 其它因素：与河流的距离、经度、纬度、河面温度、河岸线曲率、背景风速、背景风向。

其中，正面面积指数表示每单位水平面中垂直于盛行风向的建筑墙面面积（Wong et al., 2010）。天空开阔度表示建筑物和植被遮挡天空的比例，定义为平面接收（或发射）的辐射与整个半球发射（或接收）的辐射之比。需要注意的是，多数三维空间形态特征变量和土地覆盖与利用特征变量的计算基于特定缓冲区。缓冲区大小的设置通过将不同大小的预设缓冲区内对应的环境因素与气温进行相关分析并选择相关性最显著的尺寸而得到。

在该部分研究中采用的数据包括研究区域的地形数据、土地覆盖数据以及三维建筑数据。土地覆盖数据由地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn/）下载的TM影像反演得到。三维建筑数据主要用于计算相关的三维空间形态特征变量，其源自在线地图服务平台高德地图API开放平台（http://lbs.amap.com/），包含城区建筑的轮廓和总层数信息。将楼层数乘以3 m可估算建筑高度信息（Sun等，2020）。

在大多数城市热岛效应相关的研究中，气温是反映热环境的关键指标。相对于气温，热指数考虑了温度和相对湿度的综合影响，能反映综合舒适度的状况。该指数的计算公式如下：

（1）

其中，T表示气温，RH表示相对湿度。

除了基本的气象变量和热指数以外，河流对区域热环境变化的影响是本研究的重点。为此，本项目采用远离河岸的固定站点作为参考站点。参考站点温湿度与各研究站点的对应值之间的差值即可被视为河流导致的温湿度变化。需要注意的是，在对参考站点温度进行分析时，要基于参考站点与所分析站点的海拔高差进行温度的调整。

在各研究站点的河流降温幅度被定义为局地河流降温强度（Local River Cooling Intensity，LRCI）。同样地，河流在各研究站点导致的热指数变化值被定义为局地河流热指数效应（Local River Heat Index Effect, LRHIE）。另外，我们将上述两个指标在居民活动的主要时间段内随时间的变化值进行叠加，所得到的值分别被定义为累积局地河流降温强度和累积局地河流热指数效应。通过对这两个累积指标及其影响因素的分析，可以较好地评估河流的综合热环境效应，这对于相关部门制定城市规划决策起着关键作用。

为了对河流热环境效应进行进一步的分析，我们拟建立逐步多元回归模型，分别以累积局地河流降温强度和累积局地河流热指数效应为因变量，上述具有潜在影响的环境因素为自变量，探讨环境因素对热环境效应指标的相对贡献。在建模过程中，首先将相关系数最高的变量（P < 0.05）作为自变量加入，其余变量（P < 0.05）以90%的置信区间逐一重新评估。采用调整后的 R2和残差进行分析以评估拟合优度和检验假设。相应的统计算法通过Python代码的编写和运行来实现。

##### 3.1.3. 河流热环境效应的局地气候区模拟

基于实地测量的分析依赖于有限的站点数量。为了更全面地探究河流对周边城市区域气候的影响，我们选择一个夏季热浪日，在上一部分观测研究的基础上继续在相应的3个局地气候区进行城市气候模拟研究。通过对气象变量的模拟，使得各热环境变量空间可视化。

模型采用ENVI-met，其已被广泛用于分析不同城市区域的中尺度和微尺度气候及热舒适特征。在ENVI-met模拟中，利用Google Earth卫星影像图，在CAD中绘制修改底图，将其BMP格式图像导入ENVI-met中作为模型模拟的底图。需要输入的边界条件包括气象参数和模拟街区各地表要素的相关参数。初始气象参数包括逐小时气温、相对湿度、风速和风向。模拟街区地表要素参数主要包括建筑分布和高度、建筑和地表材料的热属性、植被特征等，其根据重庆典型建筑和植被的特征来设置。街区内乔木的三维形态特征需通过对典型树木尺寸的测量来获取。其中，树木高度由树木测高仪测量。基于典型树木的水平和垂直尺寸，三维树木模型被建立，以作为ENVI-met模拟的输入。

为了对ENVI-met的模拟结果进行验证，本项目采用各研究日对应街区内部固定观测站点的气温和相对湿度测量值作为参考，将模拟与观测之间回归分析的决定系数R2和RMSE（Root Mean Square Error）作为验证模型模拟精度的指标。当模拟精度满足要求时，根据不同的情景设置对不同建筑和植被布局下的局地气候区尺度气候开展模拟分析，比较其差异。

根据长江流域上游城市的典型建筑特征，对于每个局地气候区类型，通过对建筑高度和建筑密度的调整来设置不同的模拟情景，探究不同情景下的气温、相对湿度、风速和太阳辐射的时空格局，并计算河流热环境效应。通过对气候变量和空间格局的可视化，阐释不同城市地表要素（如广场、植被、不同类型的建筑）对城市气候的驱动机制。同时，将不同情景设置下的气象变量和河流热环境效应与三维空间形态特征进行相关分析，以量化对应因素的影响。最后，根据研究结果并结合相关理论知识，针对长江流域上游城市特征，为不同的局地气候区提出城市规划优化方案，以最大程度改善滨江地区的热环境特征。

#### 3.2. 可行性分析

本项目的实施具有较强的可行性，主要表现在以下方面：

首先，该项目具有良好的前期研究基础。最近若干年来，已经有不少学者进行了从微尺度到局地气候区尺度的城市气候实地观测，积累了丰富的经验，为本项目的开展提供了方法上的参考。另外，申请人曾在澳大利亚攻读博士学位期间在阿德莱德开展了海风降温效应的多尺度观测与建模研究，在阿德莱德CBD区域和大都市区分别进行了气温数据的分析研究工作。前期对海风降温效应及其与环境因素相关性的研究将为本项目中河流热环境效应的观测与建模工作提供理论和方法基础。

其次，该项目具有良好的研究平台。

最后，该项目的研究方案切实可行。本项目以长江流域上游城市的河流热环境效应为核心研究内容，以移动观测、固定站点观测并结合局地气候区气候模拟的手段揭示城市滨江区域热环境特征，阐明河流及城市空间形态对当地气候的影响机理，总体思路清晰。本项目拟使用的遥感土地覆盖信息反演、数据的逐步回归分析等方法通过ENVI软件、Python等编程语言及相应模块实现。申请人在博士研究阶段已经熟练掌握相关软件的使用和代码的编写，将基于已有算法针对本研究的具体情况进行优化，为本项目的河流热环境效应分析提供基础。

### 4．本项目的特色与创新之处；

#### 4.1. 本项目的特色

重庆市所在的成渝地区双城经济圈为我国的重要人口聚集区。2020年，《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》发布，该区域未来将继续大力推进城市化。成渝地区双城经济圈属于亚热带季风气候，受夏季副热带高压影响，为我国受高温热浪影响最严重的区域之一。同时，这些区域河流众多，对城市气候起着重要作用。因此，作为热浪事件频发且正在快速城市化的区域，重庆市在相关城市气候研究中具有较强的代表性。本项目具有区域特色。

本项目结合实地观测和模型模拟，建立河流对滨江地区热环境效应的评估体系，在不同尺度分析其时空格局，并量化各环境因素对该效应的关系，以期加深对河流热环境效应的认识，尤其是揭示三维空间形态因素的角色，具有城市气候学理论特色。

#### 4.2. 创新之处

1. 本项目根据气象变量计算了局地河流降温强度、局地累积河流降温强度等指标，**突破现有河流热环境效应研究在行人水平高度的时空格局方面理解不足的问题，建立了河流热环境效应的新的评估体系，**并基于该体系以重庆市为例系统分析了河流热环境效应。

（2）关于城市水体热环境效应的影响因素，以往研究侧重于地理位置、土地覆盖与利用、二维景观格局等指标。鉴于城市内建筑高度、天空开阔度等三维空间形态因素对城市热环境过程的重要性，本文在河流热环境效应的影响因素分析中，**量化了各三维因素的角色，弥补了对该效应驱动机制理解的不足**，更有助于为城市规划提供参考。