

# 基于自然通风的长沙高校图书馆中庭形态研究

袁朝晖<sup>1,3</sup>, 周延彬<sup>1,4</sup>, 崔加楹<sup>1,4</sup>, 张国强<sup>2,3</sup>

(1. 湖南大学 建筑学院, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000;

3. 湖南大学 国家级建筑安全与环境国际联合研究中心, 湖南 长沙 410000; 4. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 为研究图书馆中庭形态对自然通风的影响, 通过对长沙地区的高校图书馆进行实地调研, 系统分析该地区高校图书馆自然通风特点和问题, 以图式提取该地区高校图书馆中庭基本原型, 并根据调研所得图书馆基本数据, 建立基础物理模型。采用 *Phoenics* 软件, 在考虑太阳辐射和室内外热环境的情况下, 对不同中庭方位、数量以及剖面形式的图书馆原型进行参数模拟。结合自然通风理论, 对比数据分析所得结果, 最终从中庭布局方位、中庭数量和中庭剖面形式三个方面, 提出有利于长沙地区高校图书馆自然通风的中庭空间形态, 为该地区高校图书馆被动低能耗设计提供参考。

**关键词:** 长沙地区; 高校图书馆; 自然通风; 模拟; 中庭形态

中图分类号: TU834.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0579-08

## Research on atrium form of Changsha university libraries based on natural ventilation

YUAN Zhaohui<sup>1,3</sup>, ZHOU Yanbin<sup>1,4</sup>, CUI Jiaying<sup>1,4</sup>, ZHANG Guoqiang<sup>2,3</sup>

(1. Architecture School, Hunan University, Changsha 410000, China; 2. Civil Engineering School, Hunan

University, Changsha 410000, China; 3. Hunan University National Center For International

Research Collaboration In Building Safety And Environment, Changsha 410000, China;

4. Zhuhai Insitute of Urban Planing & Design, Guangdong Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of library atrium form on natural ventilation, through the field research of university libraries in Changsha area, systematically analyzed are the characteristics and problems of natural ventilation of university libraries in the area, and the basic prototype of university library atrium in the region is extracted. Based on the major data of the library obtained from the survey, a basic physical model is established. Using *Phoenics* software, considering the solar radiation and the indoor and outdoor thermal environment, the parameters of the library prototypes of different atrium orientations, numbers and profiles are simulated. Combined with the natural ventilation theory, the results of the data analysis are compared, and finally the orientation from the atrium is In the three aspects of the number of atriums and the atrium profile, this paper proposes a space shape that is conducive to the natural ventilation of university libraries in Changsha, and provides a reference for the passive low energy design of university libraries in the region.

**Key words:** Changsha area; university library; natural ventilation; simulation; atrium form

高校图书馆作为校园标志建筑及重要学习空间, 为人员密集的场所, 通风状况直接影响学生的注意力、学习效率及身心健康。此外, 在中国公共建筑的能耗是普通居民住宅的 10~20 倍<sup>[1]</sup>, 高校图书馆作为公共建筑, 在使用时的能源消耗与热舒适性是建筑全生命周期评价的重要指标。由于计算机的快速发展, 利用 CFD 对空气流动进行数值模拟和改进, 是当代建筑设计的重要手段<sup>[2]</sup>。被动式设计是指在建筑规划中通过对建筑朝

向的合理布置、遮阳的设置、保温隔热技术以及有利于建筑自然通风的建筑开口设计等, 来实现建筑需要的采暖、空调、通风等能耗降低的一种设计手法<sup>[3]</sup>。在建筑设计的初期阶段, 建筑师应采取低能耗的设计策略, 考虑如何采用自然通风的方式, 进行建筑空间形式与形态设计, 促进室内外空气流通并带走多余热量, 营造健康的公共环境<sup>[4]</sup>。

本文基于长沙的气候特征, 分别从图书馆中

收稿日期: 2019-11-26

修改稿日期: 2020-07-10

基金项目: 国际能源机构基金资助项目(IEA EBC Annex 80, IEA EBC Annex 5); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2035)

第一作者: 袁朝晖(1970—), 男, 硕士, 副教授, 博导, 主要研究方向为应变气候自适应及生态技术集成设计方法。E-mail: 675803213@qq.com

庭方位、数量、竖向形态等不同视角,运用 Phoenix 软件对其风环境进行参数模拟并分析,提出长沙地区高校图书馆有利于自然通风的中庭空间形式与形态,最终研究成果为长沙地区高校图书馆被动低能耗设计提供参考。

## 1 长沙地区高校图书馆及风环境特点

### 1.1 长沙地区高校图书馆现状调研及归纳总结

#### 1.1.1 现状调研及总结

长沙市高校众多,笔者选取 12 所高校的 14 座


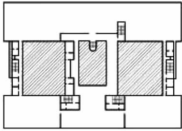

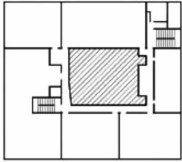

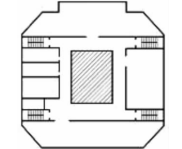

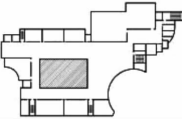

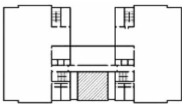

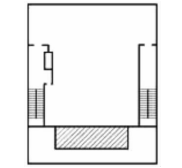

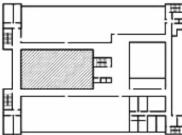
图书馆进行了实地调研。调研的主要目的是了解该地区高校图书馆的通风现状及其中庭基本形式。调研发现其中 12 座图书馆都设计了中庭,详见表 1。

主要从三个方面来进行总结:


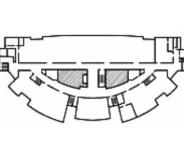
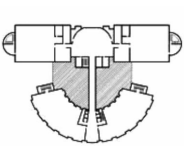
场地设计上,各高校图书馆周边环境都比较开阔,建筑选址都在校园建筑密度相对较小的区域,有的高校新校区选在了建筑密度较低的城市郊区。考虑到长沙夏季主导风向为南风,部分高校图书馆南侧还设计了大型水池,既美观又能够改善微气候环境。

表 1 长沙地区高校图书馆基本情况

Tab. 1 Basic situation of university libraries in Changsha

中庭形式	高校	图书馆	阅览层平面图	层数 /m	层高 /m	朝向	开间 /m	进深 /m	建筑形式	备注
单核式	湖南商学院			6	4.5	东西	43	32	集中式	
	长沙理工大学金盆岭校区			6	3.6	南北	45.8	40.8	集中式	均以单个中庭为核心,四周布置阅览空间和辅助空间;其中,长沙大学图书馆中庭为开敞无顶式,其余三个图书馆中庭都是封闭有顶式
	长沙大学			5	4.2	南北	44	45	围合式	
	湖南涉外经济学院			6	4	南北	114	70	附着式	
周边式	长沙理工大学云塘校区			10	4.2	南北	73.8	40.5	半围合式	长理和湖大的图书馆均为开放式阅览空间,且南侧设置了中庭,起到一定拔风的效果;财经学院图书馆为封闭式阅览空间,西侧设置中庭,北侧阅览室通风效果较差
	湖南大学			8	4.6	南北	34.4	33	附着式	
	湖南财经学院			6	4	南北	78	57	集中式	

续表 1

中庭形式	高校	图书馆	阅览层平面图	层数 /m	层高 /m	朝向	开间 /m	进深 /m	建筑形式	备注
多核式	中南大学新校区			7	4.5	东西	66	80	附着式	
	中南大学北校区			9	4	南北	70	50	集中式	由两个及以上中庭构成，平面布局较核心式空间更加灵活多变，但基本上也是围绕庭院布局；中庭均为封闭有顶式
	长沙民政职业技术学院			5	3.9	南北	100	84	附着式	
	湖南农业大学			6	5.1	南北	128	54	集中式	
穿越式	湖南第一师范学院			北 5 南 4	4.2	西南	108	70	串联式	“贯穿式”庭院，建筑主体分为两部分，通过连廊连接

平面组织形式上，以集中式图书馆类型居多。其中大部分图书馆进深较大，而且阅览空间以隔墙划分的半封闭式为主。部分墙体上没有开高窗，导致阅览室只能依靠单侧通风来换气，通风效果较差。

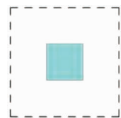
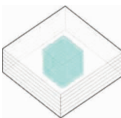
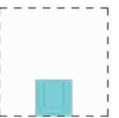
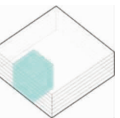

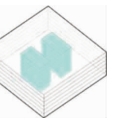
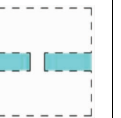
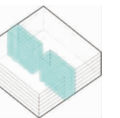
竖向空间设计中，大多数图书馆都设计有中庭。依照开敞形式可以区分为内庭院与外庭院。外庭院通风效果较好，可以有效的利用热压来促进空气流通；内庭院一般在顶部突出屋面，两侧设置通风天窗，形成竖向通风腔体，也可有效组

织建筑内部自然通风。而该地区高校图书馆内庭院顶部通常为封闭式玻璃顶，导致不能充分利用热压通风，达不到理想的通风效果。由此可见，中庭形式的选择不仅影响到空间布局，也会影响到图书馆室内通风效果。

1.1.2 中庭平面基本形式

根据调研的基本情况，笔者对长沙地区高校图书馆中庭类型进行了提取归类，总结了以下几种中庭原型(表 2)。

表 2 长沙地区高校图书馆中庭原型  
Tab. 2 Prototype of atrium of Changsha's university libraries

类型	核心式		周边式		多核式		穿越式	
图式								

其中，核心式中庭较为常见，以中央庭院为核心，阅览空间与辅助空间布置在庭院四周；周边式中庭位于图书馆建筑四周任一侧，与大气直

接接触；多核式中庭则是核心式中庭的一中衍生形态，即空间里有两个及以上的庭院，空间更加灵活多变；穿越式中庭则主要是串联式图书馆的

一种中庭形态,庭院设置连廊连接串联阅览空间。

### 1.2 长沙地区风环境特点

长沙全年风速不大,而市区建筑物密度大,影响风速的障碍物较多,增大了气流流动过程中的阻力,导致风速变小。合理选址,减小风速的受损,可以优化图书馆的外部风环境。由于长沙特殊的气候环境所致,在自然通风设计中,夏季应该主要考虑引风入室,加强室内空气流通,从而降低室内温度;而到了冬季,则主要考虑防风。因此本文也主要从加强图书馆夏季自然通风的角度切入,研究其通风设计方法。

根据《实用供热空调设计手册第二版》中长沙地区典型气象年数据设定夏季的模拟工况如下表3所示<sup>[5]</sup>。

表3 长沙地区气候参数表  
Tab.3 Climate parameter of Changsha

工况	季节	主导风向	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	频率/%
工况1	夏季	S	2.4	22

## 2 模拟研究准备

### 2.1 建立基础物理模型

研究得知,同样建设规模的图书馆,集中式布局的建筑体量最小,体型系数最小,外围护面积最小,综合评定能耗系数以及通风潜力,集中式是图书馆的最佳形式。相关资料显示,目前在校5000以上的各类大学图书馆建筑规模大多在20000 $\text{m}^2$ 以上<sup>[6]</sup>。因此,依据调研的基础数据,设定图书馆层数为6层,层高4m,建筑面积21600 $\text{m}^2$ ,建筑长宽比为4:3。假定图书馆的自然开启率为0.1,并对模型的界面进行均质性开窗设计,以简化模型。最终建立的基础物理模型如图1所示。

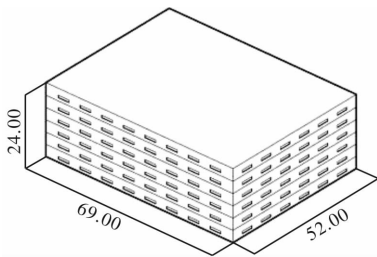


图1 基础模型图式

Fig.1 Basic model schema

### 2.2 参数设置

#### 2.2.1 数学模型的选择

建筑室内气流流动一般属于不可压缩、低速

湍流<sup>[7]</sup>。因此本文的湍流模型采用的是不可压缩气体的标准 $k-\epsilon$ 方程。采用的数学方程主要是能量守恒方程、质量守恒方程以及动量守恒方程。

#### 2.2.2 边界条件设置

入风口风速根据表3中夏季的风速设置为2.4 m/s,风向为正南向。由于地表摩擦的作用,地面以上的室外风速随高度递增<sup>[8]</sup>。即风速在380 m/s以下时,可以看作是沿高度增长的梯度风,采用的指数方程为

$$V = V_0 \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

其中: $V$ 为距离地面高度 $Z$ 的风速; $V_0$ 为距离地面 $Z_0 = 10 \text{ m}$ 高处的风速; $\alpha$ 为摩擦指数,本文取0.28。

在对图书馆中庭进行风环境模拟时,同步考虑热环境效果。笔者设置室外温度为32.3 $^{\circ}\text{C}$ ,时间为7月13日,日照时长为14 h。采用长沙地区经纬度:北纬28.12 $^{\circ}$ ;东经112.59 $^{\circ}$ 。设置直接太阳辐射为400  $\text{W}/\text{m}^2$ ;漫射太阳辐射为100  $\text{W}/\text{m}^2$ 。建筑模型外表面均设置为有摩擦的光滑表面,结构设置为混凝土结构,并设置其传热系数为10,辐射率为0.9。

#### 2.2.3 网格划分

笔者对模拟区域大小进行了多次模拟比对,最终确定了300 m $\times$ 300 m $\times$ 100 m的计算区域范围,在这个区域里模拟可以得出较理想的结果。并且对 $x$ , $y$ , $z$ 方向上的网格分别加密,保证室内单个网格尺寸为0.5 m $\times$ 0.5 m。计算最大步数设置为1600,收敛控制设置为0.01%,以确保计算精度和准确度。

## 3 集中式图书馆中庭自然通风设计

考虑自然通风的建筑,其进深通常不能大于14 m,这样可以形成较多的穿堂风<sup>[9]</sup>。但由于图书馆面积较大,功能比教学楼更复杂,其进深一般都比较大,因此无法形成有效的穿堂风。对于这种大进深类型的建筑,我们在设计上不能单纯靠水平方向的风压通风来改善图书馆室内风环境,同时需要依靠竖向上的热压通风来解决图书馆的通风问题,而解决这类问题的最有效的办法便是设计中庭。

宋德萱在《建筑环境控制学》中提出室内环境风速在0.5 m/s时最佳,此时人感觉最愉快,最适合工作学习<sup>[10]</sup>。因此,为了评判室内通风状况,特提出各层平面风速范围在0.3~0.8 m/s内的面

积占整个房间平面面积的百分比  $R_1$  作为衡量自然通风状态的判据<sup>[11]</sup>。

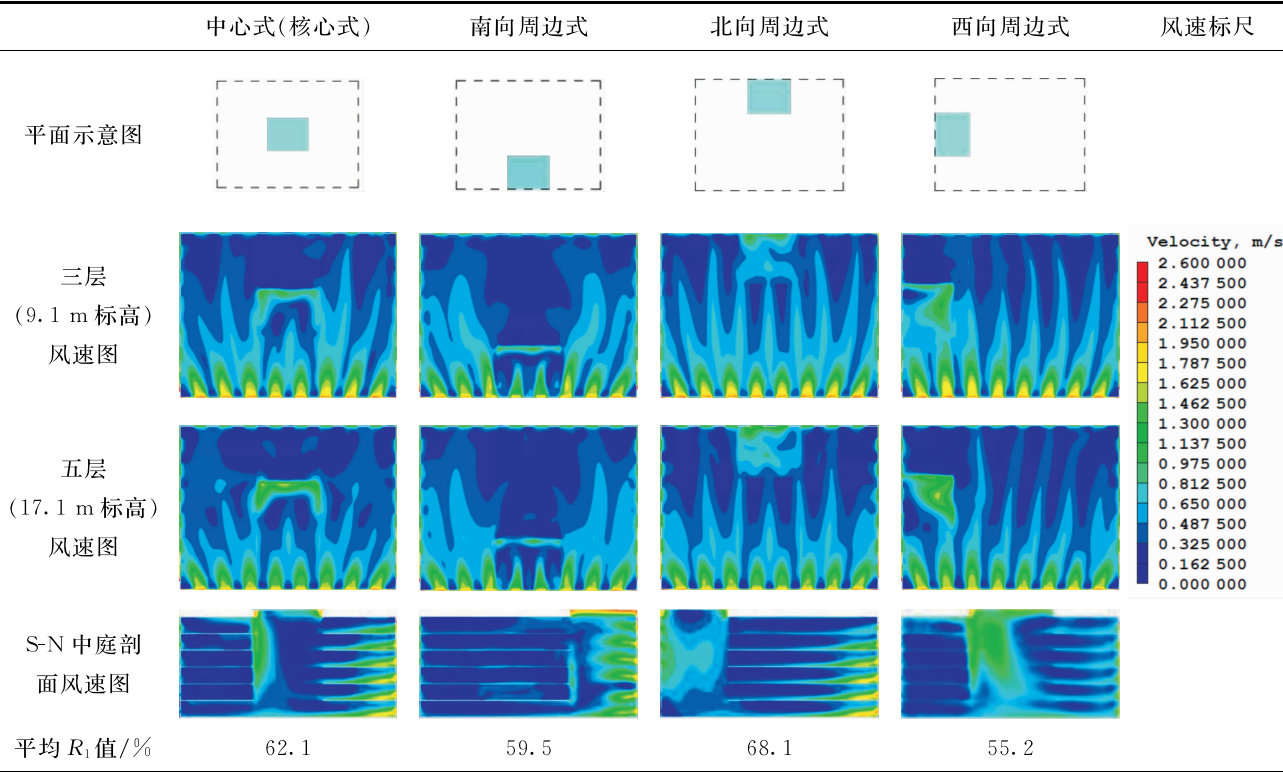
3.1 开放集中式图书馆中庭平面布局设计

3.1.1 中庭方位与自然通风

平面设计上, 核心式与周边式中庭的差异实际上是布局方位的不同。为了研究中庭方位对图

书馆风环境的影响, 笔者以图 1 中的模型为基础, 分别建立不同方位中庭的图书馆模型, 控制中庭方位为单一变量并逐个进行模拟。笔者取各工况第三、五层人体主要活动高度 1.1 m 的平面以及正南北向中庭剖面的模拟结果进行对比, 如下表 4 所示。

表 4 不同方位中庭图书馆室内风环境模拟结果  
Tab. 4 Simulation results of indoor wind environment in the atrium library in different directions



观察得知, 改变中庭的方位对图书馆室内风环境有很大影响。其中, 中心式(即核心式)南侧以及中部大部分区域风速都在 0.3 m/s 以上, 低风速区域主要集中在中庭背风面, 各层平均  $R_1$  值为 62.1%。南向周边式室内风速在 0.3 m/s 以上的区域主要集中在迎风面一侧以及东西两侧, 相比于中心式, 其中庭北侧低风速区域明显扩大, 平均  $R_1$  值低于中心式。北向周边式高风速区域面积最广, 中庭内部风速最均匀, 各层平均风速最大, 通风效果最好, 只有小部分区域风速在 0.3 m/s 以下, 平均  $R_1$  值最大。西向周边式中庭位于水平气流方向的一侧, 导致中庭影响范围小, 平均  $R_1$  值仅有 55.2%。因此, 北向周边式的自然通风效果最好, 西向周边式通风效果最差。

3.1.2 中庭数量与自然通风

核心式与多核式中庭的差异实际上就是中庭数量的不同, 因此继续研究中庭数量对通风的影响。在控制中庭总面积一定的条件下, 对不同中庭数量

的图书馆进行风模拟。最终结果如下表 5 所示。

对比单核式中庭图书馆的模拟结果发现, 双核式中庭室内平均风速有所提高, 并且中庭周围的风速分布更加均匀, 各层平均  $R_1$  值大于单核心式。由于双核式两个中庭距离较近, 主要影响区域还是集中在中心区域, 同时, 根据上文得出的结论, 笔者在对三核式中庭模拟时, 将中庭置于北侧。对比双核式模拟结果, 三核式中庭通风效果有了显著提高, 各层平均风速增大, 中庭北侧风速低于 0.3 m/s 的面积减少,  $R_1$  值为 67.6%, 大于双核式。

综上所述, 在设计图书馆中庭时, 可以通过增加中庭数量来提升室内通风效果。并且根据室内风速分布情况, 将中庭布置在背风区域, 可以提高大进深图书馆的室内风速。

3.2 开放集中式图书馆中庭剖面形态设计

3.2.1 中庭剖面基本形态

中庭在各类公共建筑中的广泛应用, 使其得



到了多样化的发展,中庭形式与建筑剖面结合设计,呈现出丰富多样的类型<sup>[12]</sup>。以剖面形态划分主要有四种:对齐式、错列式、缩进式以及扩张式。各剖面形态的中庭图式见表 6。

表 5 不同数量中庭图书馆室内风环境模拟结果  
Tab. 5 Simulation of indoor wind environment

	单核式(核心式)	双核式	三核式	风速标尺
平面示意图				
三层 (9.1 m 标高) 风速图				<div>Velocity, m/s</div> <div><div></div><div>2.600 000</div><div>2.437 500</div><div>2.275 000</div><div>2.112 500</div><div>1.950 000</div><div>1.787 500</div><div>1.625 000</div><div>1.462 500</div><div>1.300 000</div><div>1.137 500</div><div>0.975 000</div><div>0.812 500</div><div>0.650 000</div><div>0.487 500</div><div>0.325 000</div><div>0.162 500</div><div>0.000 000</div></div>
五层 (17.1 m 标高) 风速图				
S-N 中庭剖面 面风速图				
平均 R <sub>i</sub> 值(%)	62.1	63.5	67.6	

表 6 各中庭剖面形态示意  
Tab. 6 Profile of atrium

剖面形式	对齐式	错列式	缩进式	扩张式
图式				

其中,对齐式是最常见的中庭剖面形式,上下层中庭空间位置对齐排列,空间形式比较单一。反之,错列式中庭则上下错开布置,空间组织灵活多变。缩进式是一种从下至上中庭面积逐渐缩小,各层平台向中庭内部逐渐延伸的中庭空间形态。扩张式中庭的剖面形态则是从下至上中庭面积逐渐扩大,各层平台向外逐渐退让,形成退台空间。

3.2.2 中庭剖面形态与自然通风

由于上文研究的中心式中庭图书馆的庭院剖面形式为对齐式,因此笔者在控制中庭总面积不变的情况下,通过改变中庭剖面形态来研究其对自然通风的影响,模拟结果如下表 7 所示。

观察上表模拟结果并且分析得知,改变中庭

形态同样会对图书馆室内风环境产生影响。相比于对齐式,错列式中庭图书馆室内风速分布更加均匀,此外,由于错列空间对上升气流的引导作用使得中庭周围的风速有所提高。而缩进式中庭图书馆各层平均风速都有所降低,中庭内风速减小,平均 R<sub>i</sub> 值最小。相反的,扩张式的中庭内部风速增大,拔风效果提高,平均 R<sub>i</sub> 值则达到了 69.9%。因此,当中庭形式为单核心式时,中庭采用扩张式的通风效果最好,错列式与对齐式次之,缩进式的通风效果最差。

相较于对齐式的中庭剖面形式,扩张式及错列式中庭的室内通风效果更佳,因此,笔者以这两种剖面形态为基础继续深入研究多核式中庭的自然通风情况。模拟结果如下表 8 所示。

表 7 核心式中庭剖面形态图书馆室内风环境模拟结果  
Tab. 7 Simulation of atrium indoor wind environment

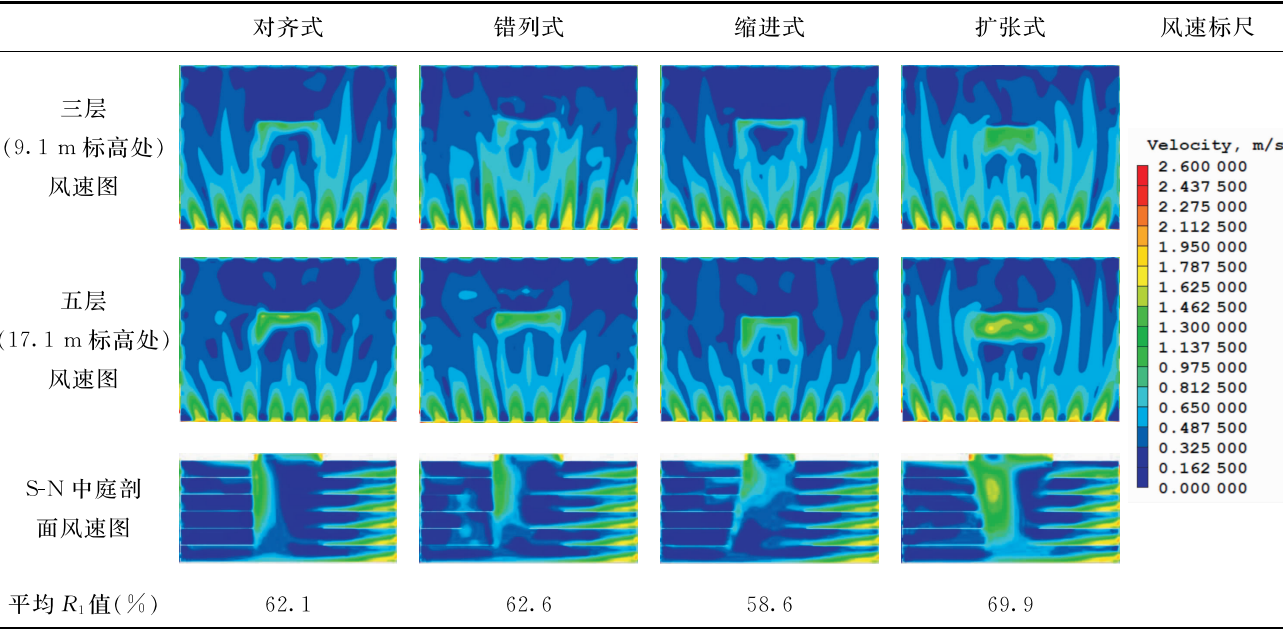
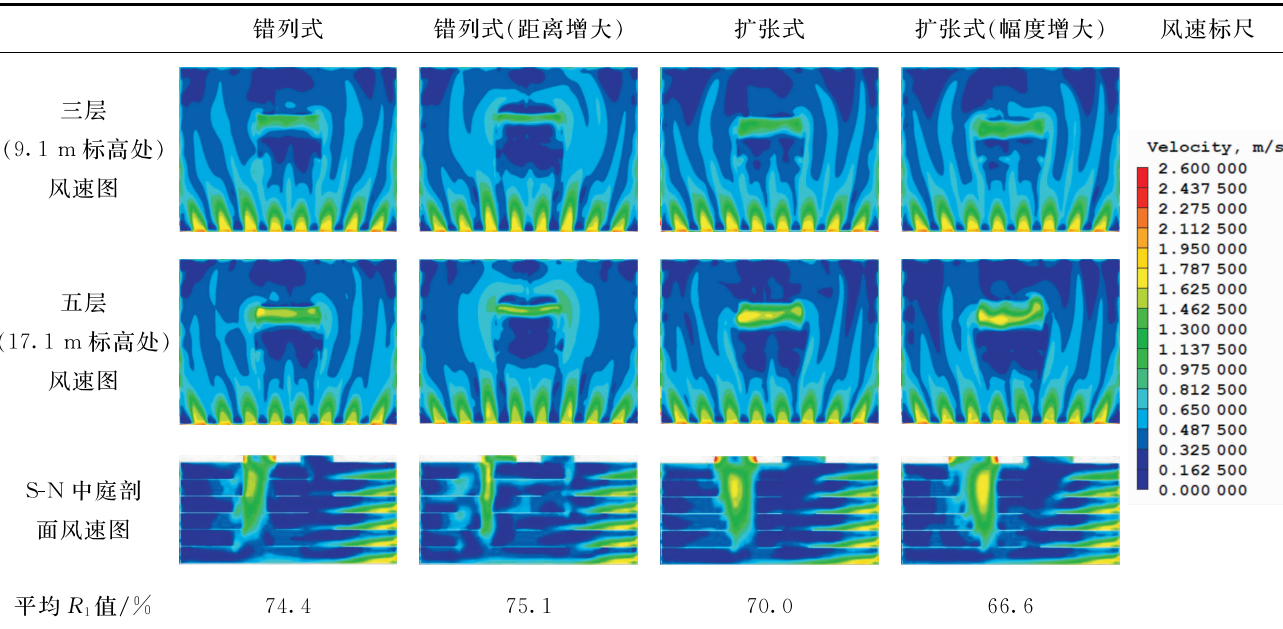


表 8 多核式中庭剖面形态图书馆室内风环境模拟结果  
Tab. 8 Simulation of multi-core atrium indoor wind environment



对比表 5 中双核式中庭图书馆的平均  $R_1$  值得知，采用错列式或者扩张式中庭剖面形态时其各层  $R_1$  值均提高了，并且错列式的平均  $R_1$  值大于扩张式。此外，增大中庭的错列距离可以加强空气水平方向的流通，提高了室内地面上方的平均风速。相反，增大扩张式的幅度反而使得部分楼层低风速区域面积有所增大，平均  $R_1$  值仅为 66.6%。所以，当中庭形式为多核心式时，中庭剖面形式采用错列式以及扩张式都可以提高通风效果，其中，错列式通风效果要优于扩张式。另外，增大中庭错列程度(即错位的距离)也能进一步加强室

内自然通风。

4 结论

本文通过对长沙地区各高校图书馆建筑的实地调研、计算机模拟等方法，结合自然通风理论，对图书馆的中庭空间形态进行研究，得出了以下结论：

- (1)中庭布局方位：北向周边式的自然通风效果最好，核心式以及南向周边式次之，西向周边式通风效果最差。
- (2)中庭数量：多核心式中庭通风效果优于单

核心式中庭,设计中可以采用多中庭组合方式提升室内通风效果。

(3)中庭剖面形式:当中庭平面形式为单核心式时,采用扩张式剖面形态的通风效果最好,错列式以及对齐式次之,缩进式的通风效果最差;当中庭平面形式为多核心式时,采用错列式剖面形态的通风效果最好。另外,增加中庭的错列程度(即错位的距离)也能够进一步增强。

## 参考文献 References

- [1] 沈婷婷,龚敏,葛坚.既有公共建筑节能改造初探[J]. 华中建筑,2008,26(11):63-66.  
SHEN Tingting, GONG Min, GE Jian. Energy-saving reconstruction for existing public buildings[J]. Huazhong Architecture,2008,26(11):63-66.
- [2] CHEN Qingyan. Using computational tools to factor wind into architectural environment design[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(12): 1197-1209.
- [3] 杨光,刘庆华.我国被动式建筑发展的制约因素及对策研究[J]. 城市建筑,2015(22):122-123.  
YANG Guang, LIU Qinghua. Research on the restrictive factors and countermeasures of the development of passive buildings in China[J]. Urbanism and Architecture, 2015(22): 122-123.
- [4] 韩阳,马航,吴潇逸.夏热冬暖地区高校教学建筑自然通风模拟分析与设计策略——以深圳大学城为例[J]. 华中建筑,2017,35(3):52-56.  
HAN Yang, MA Hang, WU Junyi. Imitation analysis and design strategies of natural ventilation in university educational building in hot summer and warm winter region: Cases studies in Shenzhen University Town [J]. Huazhong Architecture,2017,35(3): 52-56.
- [5] 段牵.基于自然通风理论的长沙地区高校教学楼设计[D]. 湖南:湖南大学,2017:123-124.  
DUAN Qian. Design of teaching building in Changsha area based on the theory of natural ventilation[D]. Hunan: Hunan University,2017: 123-124.
- [6] 刘征鹏.高校图书馆建筑规模探讨[J]. 大学图书馆学报,2010,28(2):115-118.  
LIU Zhengpeng. Discussion on building scale of university library[J]. Journal of Academic Libraries,2010, 28(2): 115-118.
- [7] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.  
WANG Ruijin, ZHANG Kai, WANG Gang. Fluent technical foundation and application examples [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2007.
- [8] FEUSTEL H E. COMIS: An international multizone airflow and contaminant transport model [EB/OL]. <http://epb. lbl. gov/publications/1998-08>.
- [9] 姜治. 利用竖向空间实现大进深建筑通风设计研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2011.  
JIANG Zhi. Study on ventilation design of large-depth buildings using vertical space[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2011.
- [10] 宋德萱. 建筑环境控制学[M]. 南京:东南大学出版社,2003:55-67.  
SONG Dexuan. Building environment[M]. Nanjing: Southeast University Press,2003: 55-67.
- [11] 闫凤英,王新华,吴有聪.基于CFD的室内自然通风及热舒适性的模拟[J]. 天津大学学报,2009(5):407-412.  
YAN Fengying, WANG Xinhua, WU Youcong. Simulation of interior natural ventilation and thermal comfort based on CFD[J]. Journal of Tianjin University, 2009(5): 407-412.
- [12] 刘筱舒.泉州地区公共建筑中庭风环境设计研究[D]. 厦门:华侨大学,2016:16-17.  
LIU Xiaoshu. Research on atrium ventilation environment design of public buildings in Quanzhou regions [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2016: 16-17.

(编辑 沈 波)