

# 双污染源对室内浓度场分布影响的数值模拟研究

王 怡, 刘 波, 曹莹雪, 杨 洋

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 在工业生产过程中会产生大量污染气体, 研究污染气体的分布规律将为改善工业室内空气品质奠定一定的基础. 通过运用计算流体力学 (CFD) 方法, 对单污染源单独散发和双污染源共同作用的情况进行了数值模拟, 分析和比较了单污染源单独散发时污染物浓度场的数值叠加值和双污染源共同作用下的污染物浓度场间的差异, 定义并运用了叠加差的概念, 分析和比较了室内污染气体的浓度分布, 得出单污染源单独散发浓度场的数值叠加值整体要高于双污染源共同作用值, 但是在源项上方时双污染源共同作用值要高于单污染源的数值叠加值, 所以研究多污染源散发时不能将单污染源进行简单的叠加; 并通过改变源项污染物浓度, 总结源项浓度对叠加差值的影响.

**关键词:** 双污染源; 浓度分布; 叠加差; 数值模拟; 源项浓度

**中图分类号:** TU834

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)04-0592-6

## Numerical simulation on concentration distribution of indoor room with two pollution source

WANG Yi, LIU Bo, CAO Yingxue, YANG Yang

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The industrial production process a large number of polluting gases are be generated. The studying the distribution of pollutants will lay a solid foundation for improving indoor air quality. In this paper, the method of Computational Fluid Dynamics (CFD) is employed to simulate the two pollution sources emission respectively and simultaneously. By defining the concept of superposition difference, the difference between the numerical superimposed concentration field of the single pollution source and the concentration field of the double pollution source that emit simultaneously are analyzed. The numerical results show that the superimposed concentration of the single pollution source is larger than the concentration of the double pollution source as a whole, while above the source, the value of the later is greater than that of the former. Thus the multi sources cannot be treated simply as a superposition of several single sources. Furthermore, by increasing the emitting concentration of the source, the effect of concentration of the source on the superposition difference is summarized.

**Key words:** Double pollution source; Concentration distribution; Superposition difference; Numerical Simulation; Source phase concentration

在工业生产过程中会产生大量的有毒有害污染物, 其中包括气体、固体悬浮颗粒和粉尘等. 这些物质无论是排放到大气中还是滞留在室内, 不仅对周围环境造成极大的破坏, 还会严重威胁到人的身心健康<sup>[1]</sup>. 因此如何控制工业有害物的排放和对环境的影响是当前亟需解决的问题.

为了解决此问题, 许多国内外学者运用数值模拟和实验研究的手段分析了室内存在单一污染源时, 污染物在室内的分布情况<sup>[2-4]</sup>, 并在此基础上分析了影响室内污染物浓度分布的多种因素. 对于分析室内房间的气流流动和污染物浓度分布, Brohus 和 Nielsen<sup>[5]</sup> 教授做了大量的有关于置换通风的实验和 CFD 数值模拟研究. H.Lee 等<sup>[6]</sup> 运用实验和数值模拟手段, 研究了不同污染源位置对室内污染物浓度分布的影响. A.Duci, K. Papakonstantinou<sup>[7]</sup> 通

过数值模拟方法对大空间室内污染物分布进行了研究, 结果得出选择合理的机械通风方式可以有效降低室内污染物浓度. Baoqing Deng<sup>[8]</sup> 运用数值模拟手段研究了不同通风方式下对室内地毯有机化合物排放的影响. 孙斌<sup>[9]</sup> 通过改变室内污染源的位置, 运用 CFD 软件模拟研究了在三种通风方式下办公室内的苯污染物浓度分布规律, 比较得出在三种通风方式下最佳的污染源位置, 并总结出不同的污染源位置对室内污染物浓度分布影响不同.

目前, 国内外对室内污染物浓度分布的分析多基于民用建筑, 但实际的工业建筑中往往存在多个工艺设备同时作业的现象, 而现有研究多针对室内仅存在单一污染源的情况进行分析, 对于建筑内部多存在多污染源的情况时, 设计人员进行设计估算时可能只是把单一污染源散发的浓度进行简单的

叠加,并没有考虑多污染源共同作用对室内污染物浓度分布的影响,对于室内环境影响评价,也存在这方面问题,这样会影响评价的准确性.因此,研究多污染源共同作用下室内污染物的分布情况显得尤为必要.

运用数值模拟手段,对比分析了单污染源单独散发污染物浓度场的数值叠加值与双污染源共同作用浓度场之间的差异,并在此基础上改变污染源散发强度,分析总结源项浓度对此差异的影响.

## 1 工业厂房污染物分布数值模拟方法及验证

### 1.1 数学模型

房间的模拟属于三维稳态模拟,数值模拟将采用  $k-\varepsilon$  模型,组分传输模型模拟浓度分布.本文采用有限容积法作为控制方程的数值模拟解法,综合考虑网格的划分和计算精度的要求,求解时选取二阶迎风格式,并选取 SIMPLE 迭代算法作为本文数值模拟中的压力速度耦合项<sup>[10]</sup>,动量方程和湍流量方程均采用二阶迎风格式.

根据质量守恒定律,建立的空间污染物输运方程如下<sup>[11]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_x c) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y c) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z c) = \Gamma \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + s(x, y, z) \quad (1)$$

$u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  为空间内任一点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上时均速度分量;  $\Gamma$  为空间任一点污染物扩散系数;  $s(x, y, z)$  为源项,即任意一点的污染物的释放强度.连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) \quad (3)$$

$k$  方程为

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon \quad (4)$$

耗散率  $\varepsilon$  微分方程为

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 \varepsilon}{k} \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

求解由方程(1), (2), (3), (4)和(5)构成的微分方程组,就可求出空间的污染物浓度分布<sup>[12]</sup>.

### 1.2 模型验证

通过与前人实验<sup>[13]</sup>结果进行对比分析,来验证数值计算的准确性.采用与实验一致的物理模型:实验通风系统为吹吸式通风,在工作台上放置一个均匀散发酒精的装置,散发速率为 4.2m/s,吹风口尺寸为 1 m (宽) × 0.5 m (高),吹风口尺寸为 0.9m (宽) × 1m (高),见图(1).在工作台上有两个监测点,在吹风口上端有三个监测点,图 2 显示当吹风口速度为 0.41m/s,吸风口速度为 0.37m/s 时,五个点的酒精浓度.由图 2 可知,数值模拟的结果和实验数据的平均误差为 22%,具有较好的吻合性.



图 1 实验室平面图(来自于文献 13)

Fig.1 Laboratory plan (from literature 13)

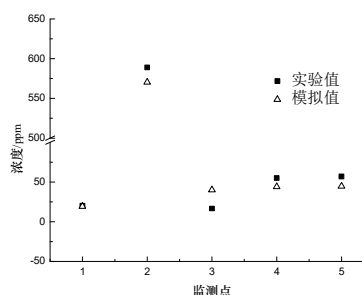


图 2 数值模拟的有效性验证

Fig.2 Validation of numerical simulation

### 1.3 物理模型建立

由于在工业建筑中空间非常高大,污染源的源相强度也非常大,因此我们采用数值模拟方法对一个工业建筑中的双污染源的情况进行研究.

建立的模型为某工业厂房,尺寸为长\*宽\*高=10 m×10 m×8 m,在本模拟中认为室内空气属于连续性介质,并且为不可压缩气体,室内温度设置为 300 K,房间中部有两个体积为 1 m×1 m×0.8 m 的污染源,分别为污染源 1 和污染源 2 (图 3),选取 N<sub>2</sub>O 为示踪气体进行研究.污染源选取质量流量边界条件,室内窗户为压力边界条件,墙壁壁面与屋顶等作为绝热边界条件处理.经过浓度场分析选取污染源 2 四周具有代表性的四个点(图 4),A(6.5, 6.7, Z), B(6.5, 5.2, Z), C(5, 5.2, Z), D(8, 5.2, Z)为典型点,研究沿房间高度上污染物浓度的变化,从而分析室内浓度场的变化规律.由于网格的疏密



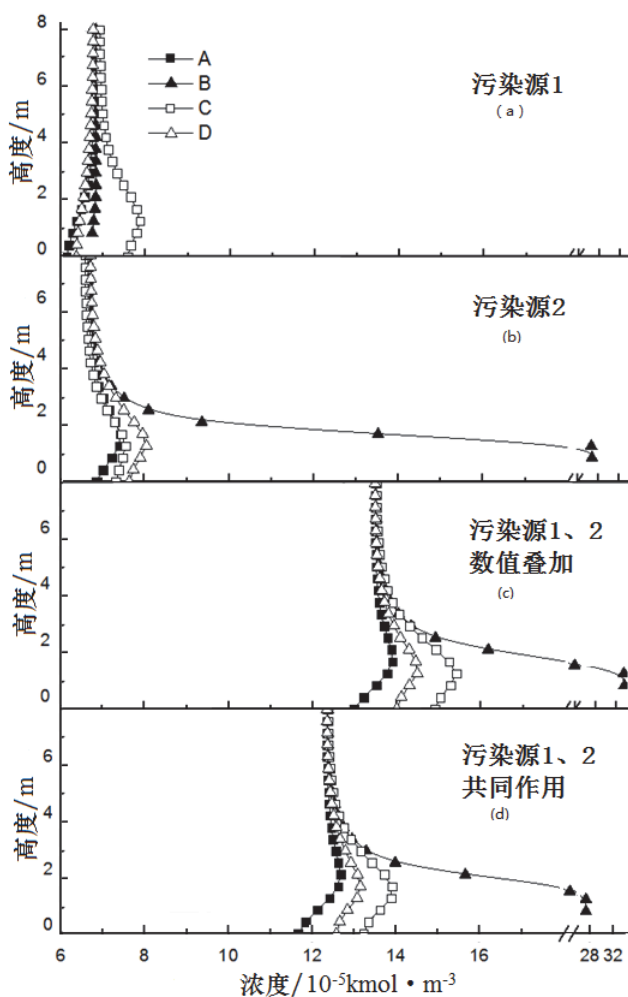


图5 不同工况下四点的浓度分布

Fig.5 The concentration distribution of four points under different conditions

由图 6 可知,两条曲线的变化趋势是一致的,在 2 m 以上的工作区范围之外,四点的浓度趋于接近,说明在工作区以外,浓度基本保持不变.在 2 m 以下的工作区范围之内浓度变化剧烈,浓度值相比于整体略大.从图中可知,B 点在此区域的浓度值要明显高于其他三点,这是由于 B 点处于源相的正上方,浓度值最大,而 C 点在工作区范围之内相比于 A 和 D 两点浓度值略大这是由于两污染源共同作用使得在两污染源之间浓度值较大.

由图 7 可知 B 点的 1-3 m 处的叠加差值与其他三点有较大的差异,可以看出随着高度的增加 B 点的叠加差值逐渐减小,甚至出现了负值,之后逐渐增大,最终趋于稳定.这是由于 B 点处于射流的中轴线上,具有较大的浓度梯度,叠加差逐渐减小并出现了负值这是由于边界效应<sup>[15]</sup>的存在导致的,由于污染源 1 和污染源 2 都存在各自的边界,并且边界之间存在着一一定的相互作用.当两污染源同时散发时,对对方的浓度扩散起到阻碍作用,使得污染

物被阻挡在了源项的上方,即污染源 1 的存在阻碍了污染源 2 散发的污染物越过其并向另一侧扩散的趋势,同时由污染源 1 处的上升气流将此部分污染物携带并送至出口处,因而此处的共同作用时污染物浓度值随着高度的增加逐渐大于单污染源单独散发时的浓度数值叠加值,虽然在此区域随着高度的增加射流不断卷席周围的空气,使得 B 点处的浓度不断减小,但是由于边界效应的存在,使得在此区域共同作用时的污染物浓度相对单污染源单独散发时的浓度逐渐增大.而超过 1.72 m 这一区域时,射流逐渐进入末端区,这是一个迅速扩散的区域,在这个区域中,射流开始趋同于周围的空气,卷吸作用减小,射流速度也逐渐减小<sup>[16]</sup>,浓度趋于平缓,叠加差值也将保持不变.

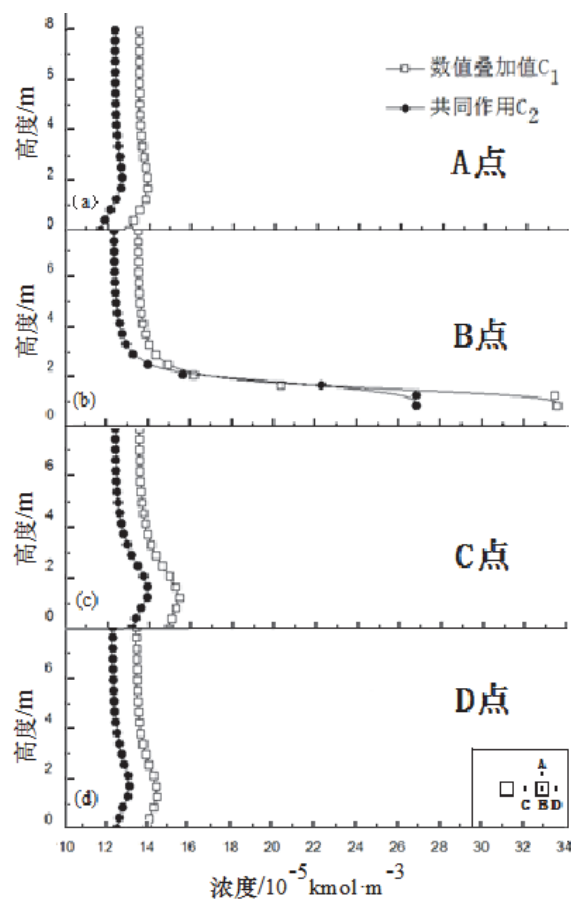


图6 数值叠加值与共同作用值在四点的对比

Fig.6 Superposition value and emitting simultaneously in the four points

由图 5 和图 6 可以看出,在 case1-3 中各点污染物浓度峰值均出现在 1.72 m 处,故图 8 给出了  $Z=1.72$  m 处平面上的等叠加差曲线.从图中可以看出只有在两个源项正上方的叠加差值小于零,而其他各点的叠加差值较均匀,同时证明了选取的四个典型点具有代表性,认为其流场的变化规律可以代



表整个流场的变化规律。

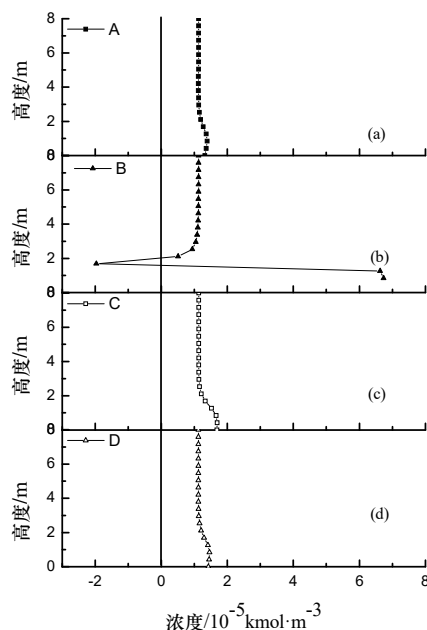


图7 四点的叠加差值

Fig.7 Superposition difference of the four points the four points

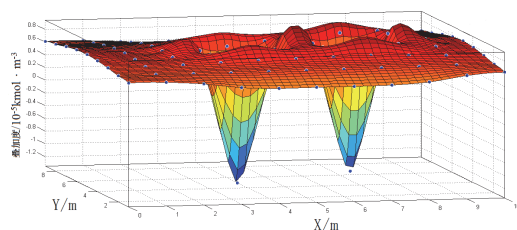


图8 Z=1.72m 处等叠加差曲线图 ( $10^{-5} \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Fig.8 Superposition difference distribution figure in Z=1.72m

## 2.2 源项污染物浓度对数值叠加浓度场与共同作用浓度场间差异的影响

为了分析源项浓度对单污染源数值叠加浓度场与双污染源共同作用浓度场之间的差异，文中通过改变污染源散发浓度，从 0.01-0.10 kg/s (见表 1) 均匀变化，并计算 A、B、C、D 四点的叠加差平均值，对比叠加差值的变化，以此来分析源项浓度对此差异的影响，结果如图 9 所示。

从图中可以看出随着浓度的增大，叠加差不断增大，这是由于源项浓度的增大使得多污染源相比于单污染源单独散发时浓度扩散速率加快，因此叠加差值逐渐增大，这说明随着浓度越大，多污染源的数值叠加值与共同作用值的差异越加明显，此时不能将污染源浓度进行简单叠加，而是要考虑污染源之间的相互作用。如果不考虑污染源之间的相互作用，在设计计算时，计算的浓度值偏大将会导致能耗偏高。在时间不充裕的情况下，在设计计算时

可对多污染源的浓度场进行简单的估算，本文将污染源浓度与叠加差值进行线性拟合，得到公式如下：

$$\delta = -0.47 + 95.26c \quad (R^2=0.94)$$

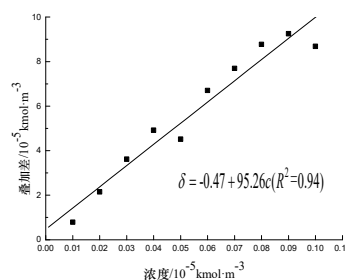


图9 浓度不同时叠加差的变化规律

Fig.9 the changes of the superposition difference in different concentration

目前公式的应用范围是源项浓度在 0.01~0.10 kg/s，后续的讨论中会逐渐扩大应用范围，为通过单污染源估算双污染源浓度场提出一个合理的方法。

## 3 结论

通过数值模拟手段，对比分析了单污染源单独散发污染物浓度场的数值叠加值与双污染源共同作用浓度场之间的差异，得到如下结论：

(1) 定义了叠加差  $\delta$  的概念，叠加差  $\delta$  越大，说明单污染源单独散发数值叠加值与双污染源共同作用值的差异越大。

(2) 分析了单污染源单独散发和双污染源共同散发时在四点的浓度分布，发现了在整体上单污染源单独散发数值叠加值要大于双污染源共同作用值；而在源项上方，由于射流作用和边界效应的存在，使得 B 点的叠加差先减小后增大，最后趋于稳定。

(3) 通过改变源项浓度，发现了叠加差与源项浓度呈线性变化，并进行线性拟合，得到公式如下：

$$\delta = -0.47 + 95.26c \quad (R^2=0.94, 0.01 \leq c \leq 0.1)$$

## 参考文献

## References

- [1] 孙一坚. 工业通风[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.  
SUN Yijian. Industrial Ventilation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1994.
- [2] 刘威. 室内污染物浓度分布的数值研究[D]. 广州: 广州大学, 2006.  
LIU Wei. Numerical simulation of air contamination dispersal in a room [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2006.
- [3] XING H, HAT ton A, AWBI HB. A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement

- ventilation. Building and Environment, 2001, 36(7):809-820.
- [4] ATILA Novoselac. Development of new and validation of existing convection correlations for rooms with displacement ventilation systems [J]. Energy and Buildings, 2006, 38: 163-173.
- [5] Brohus H, Nielsen P. Personal exposure in displacement ventilated rooms [J]. Indoor Air, 1996, 6(3): 157-167.
- [6] LEE H, AWBI H.B. Effect of internal partitioning on indoor air quality of rooms with mixing ventilation-basic study [J]. Building and Environment, 2004, 39: 127-141.
- [7] DUCI A, PAPAKONSTANTINO K, CHALOULAKOU A. Numerical approach of carbon monoxide concentration dispersion in an enclosed garage [J]. Building and Environment, 2004(39):1043-1048.
- [8] DENG Baoqing. CFD Simulation of VOCs concentrations in a resident building with new carpet under different ventilation strategies [J]. Building and Environment, 2007, (42): 297-303.
- [9] 孙斌, 韩克, 蒋能飞. 污染源位置对气体污染物影响的数值模拟 [J]. 2012, 35(2): 114-117.  
SUN Bin, HAN Ke, JIANG Nengfei. Numerical simulation of pollutant source position influencing on air pollutant concentration [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(2): 114-117.
- [10] 朱家鲲. 计算流体力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.  
ZHU Jiakun. Computational fluid dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [11] 张孟威, 康德梦. 环境问题的数学解法及计算机应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.  
ZHANG Mengwei, KANG Demeng. [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1989
- [12] 章梓雄. 粘性流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
ZANG Zixiong. Viscous Fluid Dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [13] OJIMA Jun. Worker exposure due to reverse flow in push-pull ventilation and development of a reverse flow preventing System [J]. National Institute of Industrial Health, Japan, 2002; 44: 391-397
- [14] 英克鲁佩勒. 弗兰克 P. 传热和传质基本原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.  
INCROPERA F P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Beijing: Chemical industry press, 2011.
- [15] 陆杰. 多污染源共同作用的非线性及边界效应研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.  
LU Jie. Nonlinear and boundary effect research under the interaction of multiple pollution sources [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [16] HAZIM B Awbi. 建筑通风 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
HAZIM B Awbi. Building ventilation [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.

(编辑 吴海西)

(上接第 574 页)

乐屋从拜殿中分离出来, 成为独立的元素位于神殿一侧, 由于日本日本人的习惯是芝居, 也就是坐在草地上, 坐时视线很低, 所以舞台的高度只能在一米左右才能满足最好的观看点. 这也就决定了山门舞台适合于中国, 而平舞台适合于日本.

#### 4. 结语

中国祭祀性观演场所中, 神的空间、观的空间、演的空间三部分, 从南向北沿中轴线依次分布, 其观赏近似于一个视轴. 而日本祭祀性观演场所中, 三种空间没有明显的北向和轴线关系, 而是形成了“三角视轴”关系, 神的空间和演的空间同时处于观者空间的对面. 从中日的祭祀性观演场所的空间秩序来看, 中国传统戏台的布局方式遵循着中轴对称、北向等特点, 而日本传统舞台遵循平行轴线、非对称、非北向等布局特点. 从行为影响上看, 中国的表演者是“造作的人”, 作为人的代言人向神献礼; 而日本的表演者则是“造作的神”, 作为神的代言人向人传达旨意. 所以表演者的舞台, 一个位于神庙的对面, 另一个位于神社一侧. 又由于观看者的习惯的不同, 中国人大多站着观看而日本人席地坐着观看, 导致舞台高度的不同, 进而影响了中国的山门戏

台与日本的斜向舞台的形成. 可以说, 宗教文化和祭祀观演行为的不同是影响中日观演建筑空间关系及空间演化最主要的原因.

#### 参考文献 References

- [1] 马彦祥, 余从. 中国大百科全书·曲艺卷 [M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1983.  
MA Yanxiang, YU Cong. Encyclopedia of China-Operas and Quyi forms, introductory volume [M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1983.
- [2] 西和夫. 祝祭的临时舞台 [M]. 东京: 彰国社株式会社出版, 1997.  
KA Zuo Nishi. Wish offering temporary stage [M]. Tokyo: kabuskiki kaisha, 1997
- [3] 清水裕之. 论演出空间形态的生成 [M]. 鹿岛市: 鹿岛出版社, 1988.  
SHIMIZU Hiroyuki. On the performance space form generation [M]. Kashima: Kashima publishing house
- [4] 翁敏华. 中日古典戏剧形态比较 [J]. 文学评论, 2010(6): 92  
WENG Minhua. The study of comparison on Chinese and Japanese classical theater form [J]. Literary Review, 2010(6): 92
- [5] 薛林平. 中国传统剧场建筑 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
XUE Linping. Chinese traditional theater building [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

(编辑 吴海西)