

基于流场验证的紊流施密特数对街道峡谷污染物扩散数值模拟的影响

谢海英, 关欣, 沐贤维, 李晓, 温雅
(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 以城市街道峡谷的水槽和风洞试验数据为依据, 利用 ANSYS Fluent 软件, 数值模拟了街道峡谷内的流场(包括时均流动和紊流强度)及污染物浓度。结果表明: 标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型、RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和标准 $k-\omega$ 紊流模型均能基本正确地模拟街道峡谷内的流场和浓度场; 紊流施密特数 Sc_t 对浓度值有明显的影响, 街道峡谷内的浓度值随 Sc_t 的增加而变大, 当 Sc_t 取 1.3 时, 浓度值和试验值吻合最好; 由于标准 $k-\omega$ 模型对流场的模拟结果相对最好, 其模拟的浓度场也与试验值吻合最佳。街道峡谷内的浓度分布由时均流输运和紊流扩散共同决定, 因此, 合理的 Sc_t 数不能仅仅依据浓度值与试验值的吻合度来选取, 而应首先保证流动模拟的准确性。

关键词: 街道峡谷; 紊流施密特数; 流场; 浓度场; 数值模拟
中图分类号: X 169 **文献标志码:** A

Effects of Turbulence Schmidt Number on the Pollutant Diffusion Simulation in a Street Canyon Based on Numerical Flow and Concentration Fields Validations

XIE Haiying, GUAN Xin, MU Xianwei, LI Xiao, WEN Ya
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on numerical flow field and pollutant concentration field validations, three turbulence models (standard $k-\varepsilon$ model, RNG $k-\varepsilon$ model, standard $k-\omega$ model) were chosen to study Sc_t (turbulence Schmidt number) effects on the pollutant diffusion simulation in a street canyon using ANSYS Fluent software. The results show that the three turbulence models all perform well in simulating the flow and concentration fields. The concentration values change significantly with Sc_t and the optimum Sc_t value is 1.3 by which the best agreement can be got between the concentration field results and the wind tunnel experimental data. Because of the accurate prediction of the flow field with the standard $k-\omega$ model, the corresponding concentration results are also closer to the experiment data than those by the other two turbulence models. The optimum Sc_t value should be determined not only by the validation of concentration field but also by the validation of flow field.

Keywords: street canyon; turbulence Schmidt number; flow field; concentration field; numerical simulation

随着我国城市快速发展和汽车保有量的迅速增加, 交通污染已成为城市空气污染的主要来源, 而城市街道及两旁高大建筑形成的峡谷结构(简称“街谷”)严重影响了交通污染物的迁移和扩散。数值模拟法是研究街谷内气流和污染物扩散问题的重要手段, 该方法通过求解时均化的流动控制方程得到街谷内的流场, 再根据流场求解污染物的输运方程得到浓度场^[1-3]。数值模拟法的研究结果需要试验数据的验证, 由于已有的风洞试验大多只有污染物的浓度测量值^[4-6], 因此, 大部分的数值模拟研究只是对特定空间位置处的污染物浓度值与风洞试验结果进行对比。当两者吻合较好时, 基于污染物符合标志物质的假定, 则认为数值模拟的算法正确, 模拟的流场也符合实际情况。

在数值求解污染物输运方程时, 需要设定紊流施密特数(turbulence Schmidt number, Sc_t)以确定紊流扩散系数^[7-10]。已有研究的 Sc_t 选取范围约为 $0.2\sim 1.3$ ^[1, 2, 8-9], 显然差别较大, 如文献[2]选取的 Sc_t 为 0.3, 文献[9]的则为 0.9, 两者均以文献[6]的试验数据来验证算法, 且浓度模拟值与试验值均吻合良好。而研究表明 Sc_t 对浓度分布有显著影响^[8-9], 这说明文献[2]和文献[9]模拟的流场有可能存在显著差异, 因调整了 Sc_t 才获得了相近的浓度值。因此, 仅用风洞试验的浓度测量值验证数值模拟的结果并不能保证流场预测的准确性, 应同时验证流场和浓度场, 在两者均吻合良好时, 才能说明数值模拟方法的可靠性。但是, 同时给出流场和

浓度场测量值的系统性风洞试验数据较少, 本文选择了两组流动相似的试验数据^[6, 11], 并采用 ANSYS Fluent 软件首先确定用数值模拟法研究街谷问题应选用的网格大小及 3 种紊流模型的预测差异, 同时利用水槽试验(简称“试验 A”)结果^[11]验证街谷内的流场模拟值, 再根据风洞试验(简称“试验 B”)测量值^[6]验证污染物浓度场, 最终给出合理的 Sc_t , 为街谷类问题的数值模拟研究提供参考。

1 计算方法

1.1 基于试验 A 的流场模拟计算设置

图 1 是根据试验 A^[11]给出的计算域设置情况, 试验中共有 8 个建筑物模型, 建筑物高(H_{B1})、宽(W_{B1})和街宽(W_{s1})相同, 均为 0.10 m, 即街谷的高宽比均为 1, 水槽进口来流速度为 U_1 , 其流动雷诺数 Re 为 12 000。由于街谷内水流沿着水槽宽度方向为二维流动, 因此本文仅模拟水槽长度和高度方向所组成的平面流动, 坐标系设置如图 1 所示, x 向速度为 u , y 向速度为 v 。计算域的进口距离第 1 个建筑为 $5H_{B1}$, 出口距离最后一个建筑为 $15H_{B1}$, 顶部距离水槽底为 $4H_{B1}$ 。图 1 中 2 个深灰色建筑围成的街谷为目标街谷, 水槽试验的流场测量位置如目标街谷中 5 条蓝色线段所示, 其中平行于 y 向的 3 条线段分别距离背风面 $0.25H_{B1}$, $0.5H_{B1}$ 和 $0.75H_{B1}$, 平行于 x 向的 2 条线段分别距离街谷底部 $0.5H_{B1}$ 和 H_{B1} 。

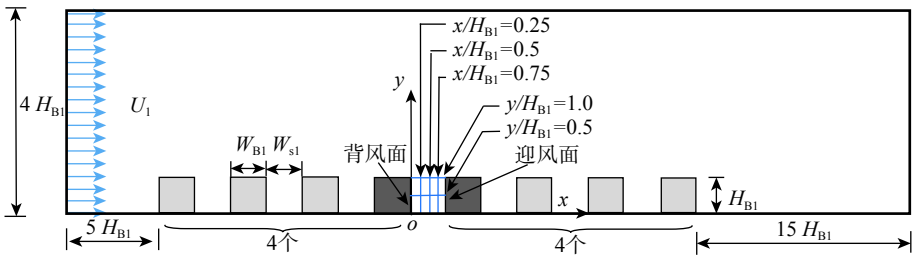


图 1 试验 A 的数值模拟计算域示意图

Fig.1 Schematic view of the numerical simulation domain for experiment A

由于水流无温差, 因此模拟的控制方程为连续性方程、Navier-Stokes 方程和紊流模型方程, 方程具体形式可参考文献[10]。计算域进口为均匀来流速度, 出口采用出流条件, 顶部设为所有流动

参数随 y 向无变化, 其余墙面和地面为固壁边界条件。数值模拟采用结构化非均匀网格, 壁面附近网格加密, 共设计了 4 套网格, 靠近壁面的第一层网格大小(与壁面垂直方向的尺寸)及网格总

数见表1。方程离散选用二阶迎风格式,计算收敛的标准为残差达到 1.0e^{-5} ,且流场无变化。

表1 网格情况
Tab.1 Mesh parameters

网格名称	壁面第一层网格的大小	网格总数
mesh-A	$0.04H_{B1}$	6 248
mesh-B	$0.02H_{B1}$	134 950
mesh-C	$0.01H_{B1}$	253 500
mesh-D	$0.005H_{B1}$	311 100

1.2 基于试验B的街谷内污染物浓度场模拟计算设置

试验B^[6]设置与试验A基本相似,但试验B中共有26个建筑模型,其中20个在目标街谷的上游,另6个在目标街谷的下游。建筑物高(H_{B2})、宽(W_{B2})和街宽(W_{s2})仍相同,但 $H_{B2}=0.06\text{ m}$,进口处空气来流速度为 U_2 ,其 Re 为20 000,流动仍为二维特征。由文献[4]可知,当街谷类流动的 $Re>3\ 400$ 时,则流动具有相似性,因此,本文选取的试验A和试验B应流动相似。本文对试验B数值模拟的计算域设置除了目标街谷上、下游建筑物的个数不同外,其余设置类似于图1。试验B模拟的污染物为线源,位于目标街谷地面中间,其具体设置可参考文献[6]。试验B给出了目标街谷的背风面和迎风面的无量纲浓度测量值 $K(K=cU_2H_{B2}L/Q_s, c$ 为污染物体积分, L 为污染物线源长度, Q_s 为污染物的源强)。除增加污染物组分输运方程外,其余有关控制方程、边界条件、离散格式及网格分布等情况与试验A的模拟设定相同。

2 计算结果与分析

2.1 街谷内流场模拟的验证与分析

在表1给定的4套网格上,选用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型及标准壁面函数求解了试验A的速度场,其速度解的变化不大,且均与试验值吻合良好,可认为流场为网格独立解。限于篇幅,此处未给出不同网格的速度值与试验值的对比情况。为尽可能提高求解精度,本文选用mesh-D进行后续研究。图2给出了标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型、重整化群

$k-\varepsilon$ (即RNG $k-\varepsilon$)紊流模型和标准 $k-\omega$ 紊流模型的模拟结果,以考察紊流模型对流动预测的影响。由于mesh-D网格下的壁面 $y^+\leq 5$ ($y^+=C_\mu^{1/4}k_p^{1/2}y_P/\nu, C_\mu=0.09, k_p$ 为邻近壁面节点P的紊动能, y_P 为节点P与壁面间的距离, ν 为流体运动黏度)。因此,对于标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型和RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型的壁面处理采用增强型壁面函数。图2中的紊流强度是假设流动为各向同性时的 x 向和 y 向模拟值。

由图2可知,在目标街谷内的3条垂直线段 $x/H_{B1}=0.25, x/H_{B1}=0.5$ 和 $x/H_{B1}=0.75$ (见图1)处,3种紊流模型对时均流速的模拟基本一致,但在 $0.9<y/H_{B1}<1.2$ 处的 u 值存在一定差异(见图2(a),(e)和(i))。当 $0<y/H_{B1}<0.9$ 时, $x/H_{B1}=0.5$ 位置的速度 v 模拟值明显小于试验值(见图2(f)),其余位置上的时均速度模拟值均与试验值吻合良好。文献[11-12]在 $x/H_{B1}=0.5$ 位置的 v 模拟值也与试验值相差较大,文献[12]认为该差异是由于模拟采用的时均法去除了流动中的某些脉动速度造成的。图3(见下页)是用标准 $k-\omega$ 紊流模型模拟得到的目标街谷内的流场,从该图可看到街谷内顺时针方向旋转的主涡以及在街谷底部两侧和背风面顶部附近的小旋涡区。实际上,试验观察到街谷内主涡的涡心位于 $x/H_{B1}=0.56$ 和 $y/H_{B1}=0.54$ 处^[11],而本文模拟的涡心位置偏左下方($x/H_{B1}=0.53, y/H_{B1}=0.52$),即更靠近 $x/H_{B1}=0.5$ 的位置。因此,笔者认为主涡涡心位置预测的偏差导致了 $x/H_{B1}=0.5$ 位置的 v 值小于试验值。当 $0.9<y/H_{B1}<1.2$ 时,标准 $k-\omega$ 紊流模型对 u 速度的模拟与试验值吻合最好,而RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型的模拟相对较差。在街谷内($0<y/H_{B1}<1.0$),标准 $k-\omega$ 紊流模型对3条垂直线段处紊流强度的模拟也最好,当 $1.0<y/H_{B1}<1.2$ 时,3种紊流模型预测的紊流强度均偏大。RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型在 $x/H_{B1}=0.75$ 处模拟的紊流强度与试验值的偏离较大。

在目标街谷的2条水平线段 $y/H_{B1}=0.5$ 和 $y/H_{B1}=1.0$ 处(见图1),3种紊流模型的 v 预测值相近(见图2(n)和(r)),RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对街谷顶部的 u 预测值偏小(见图2(q))。标准 $k-\omega$ 紊流模型仍能较好地模拟出这两条水平线段处的紊流强度。

综上所述,标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型、RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和标准 $k-\omega$ 紊流模型均能基本正确地模拟

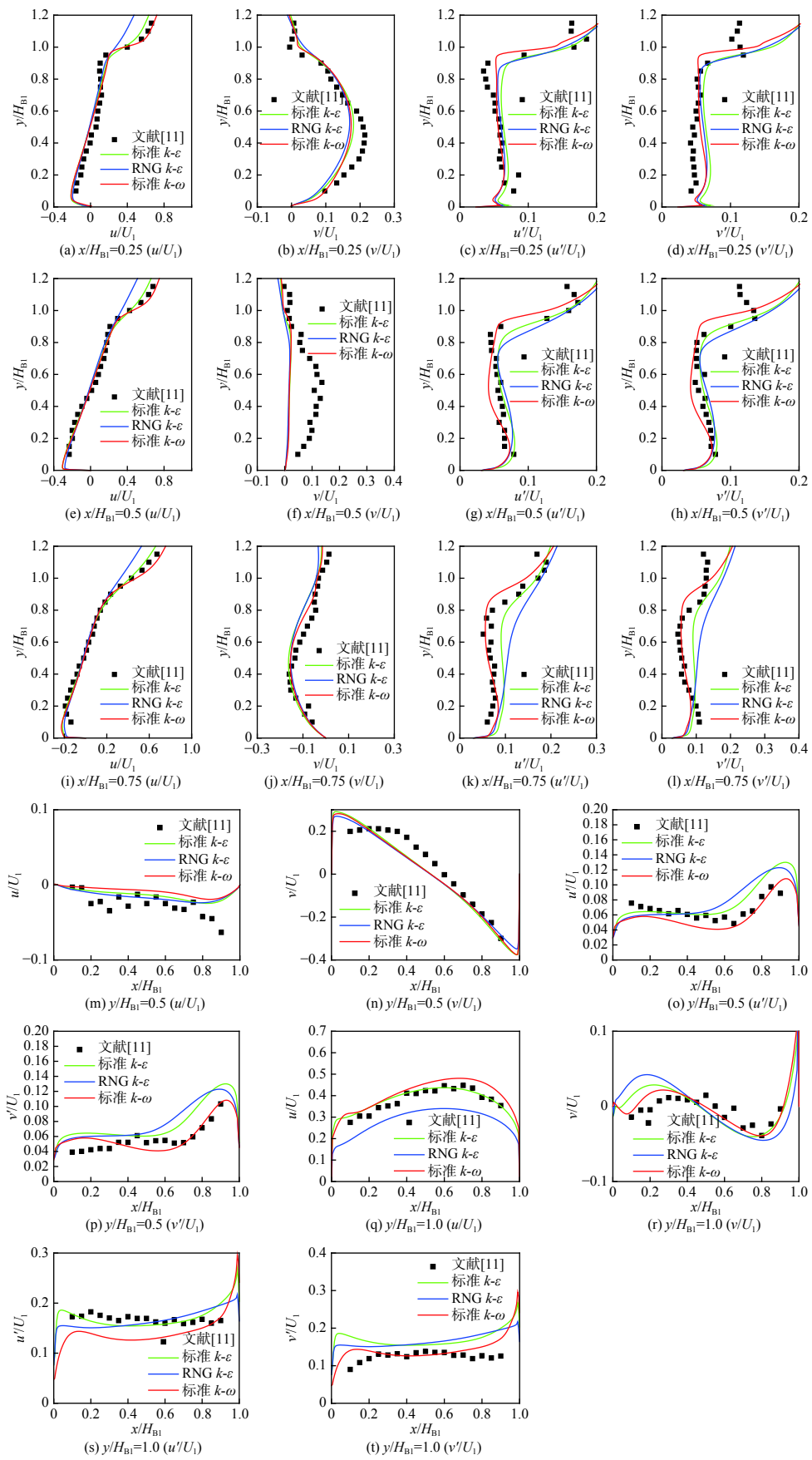


图 2 3 种紊流模型模拟的试验 A 街谷内的速度分布图

Fig.2 Flow field simulated with 3 turbulence models for experiment A

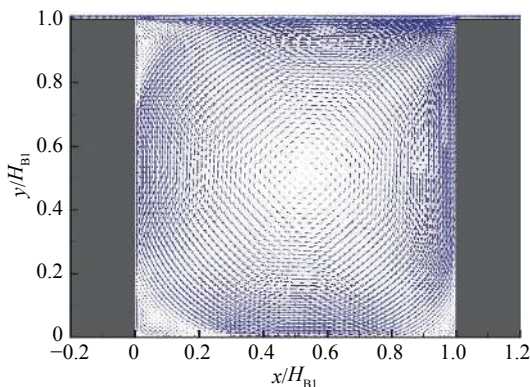


图3 标准 $k-\omega$ 紊流模型模拟的试验 A 街谷内流场

Fig. 3 Velocity vector with standard $k-\omega$ turbulence model for experiment A

出街谷内的时均流速和紊流强度,但就模拟值与试验值的吻合度而言,标准 $k-\omega$ 紊流模型的表现最佳。

2.2 街谷内浓度场模拟的验证及 Sc_t 数的选取

按表1中 mesh-D 网格的设置方法,并选取上文的3种紊流模型,本文模拟了试验B的流动,目标街谷内的速度分布见图4。由图4和图2的对比可知,用数值模拟法得到的试验A和试验B在目标街谷内的时均流动和紊流强度分布基本相同,本文的研究结果证明这两个试验目标街谷内的气流运动有相似性。3种紊流模型对时均流动的预测在目标街谷内几乎无差异,在街谷内高出屋顶的部分($1.0 < y/H_{B2} < 1.2$)的3条垂直线段 $x/H_{B2}=0.25$, $x/H_{B2}=0.5$ 和 $x/H_{B2}=0.75$ 处,模拟的试验B的 u 值均大于试验A的,这可能与两个试验在目标街谷上游布置的建筑物个数不同有关。同时,3种紊流模型对试验B目标街谷内紊流强度预测的差异性更小,标准 $k-\omega$ 紊流模型模拟的紊流强度值略小于另外2种紊流模型的。

图5为 Sc_t 取 0.3~1.3 时试验B目标街谷的壁面无量纲浓度 K 的模拟值分布。在 ANSYS Fluent 中,标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型和标准 $k-\omega$ 紊流模型的 Sc_t 可人为设定,而 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型的 Sc_t 根据模型本身的计算结果确定^[10]。因此,本文首先采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型计算出流场,再单独求解组分输运方程,并在求解时设定不同的 Sc_t ,本文同时也模拟了 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型直接计算的浓度场。

由图5可知,3种紊流模型的 Sc_t 对街谷壁面浓度值 K 的模拟有明显的影

变大,但当 Sc_t 增加到 0.9 以上时, K 的增加变缓。根据 $Sc_t = \nu_t/D_t$, 则当 $Sc_t < 1$ 时,有 $D_t > \nu_t$, 即污染物的紊流扩散系数大于紊流动量扩散系数,反之亦然。从图5可知,在流场模拟基本合理准确的情况下, Sc_t 取 1.3 得到的 K 和试验值吻合较好,这说明在街谷内污染物的紊流扩散系数 D_t 可能小于紊流动量扩散系数 ν_t , 该结论与文献[8]的结论一致。文献[2]选取的 Sc_t 为 0.3, 很可能是因其流动预测的 ν_t 偏小,因此需要选取较小的 Sc_t 以得到相对合理的 D_t , 但显然该做法是不合理的。用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型直接计算 K 值时,其结果与流动和组分输运分开模拟且 Sc_t 取 0.9 时的结果(见图5(b)和(c))相近,限于篇幅,其 K 的分布不再另外给出。

由图5还可知,3种紊流模型对 K 的模拟有差异,在相同 Sc_t 时,标准 $k-\omega$ 紊流模型的模拟值与试验值吻合更好,而标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型与 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型的模拟值较相近,这与3种模型模拟的流场情况相符。从图4可知,无论是时均流速还是紊流强度的分布,标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型与 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型的模拟结果更相近,这2种紊流模型对迎风面的浓度模拟值偏小,尤其是地面附近。

图6给出了街谷内 K 的等值线图,标准 $k-\omega$ 模型模拟的 K 值,无论在壁面还是街谷中部,均高于另外2种模型。为了解释3种紊流模型对 K 值模拟的差异,图7和图8给出了街谷内的时均速度和紊流强度(turbulence intensity, TI)的分布。

从图7可知,由于街谷内主涡的作用(见图3和图7), u 和 v 均是在街谷中部时的值小,而在靠近街谷壁面、底部和顶部时的值逐渐增大,当临近壁面处又快速减小至零。因此,街谷中部的污染物对流输运作用较小,此处污染物主要来源于紊流扩散。试验B的污染源位于地面中间(污染源位置在图6中地面的白色矩形区域),源的开口分别朝向背风面和迎风面,在主涡的输运作用和街谷左下角旋涡的作用下(见图3),背风面的地面附近是街谷内的浓度高区。由于标准 $k-\omega$ 模型模拟的紊流强度明显小于标准 $k-\varepsilon$ 与 RNG $k-\varepsilon$ 模型的值(见图8),因此其紊流扩散作用也弱,所以标准 $k-\omega$ 模型模拟的背风面靠近地面的浓度明显高于另外两个模型的模拟值(见图5(a)~(c)及图

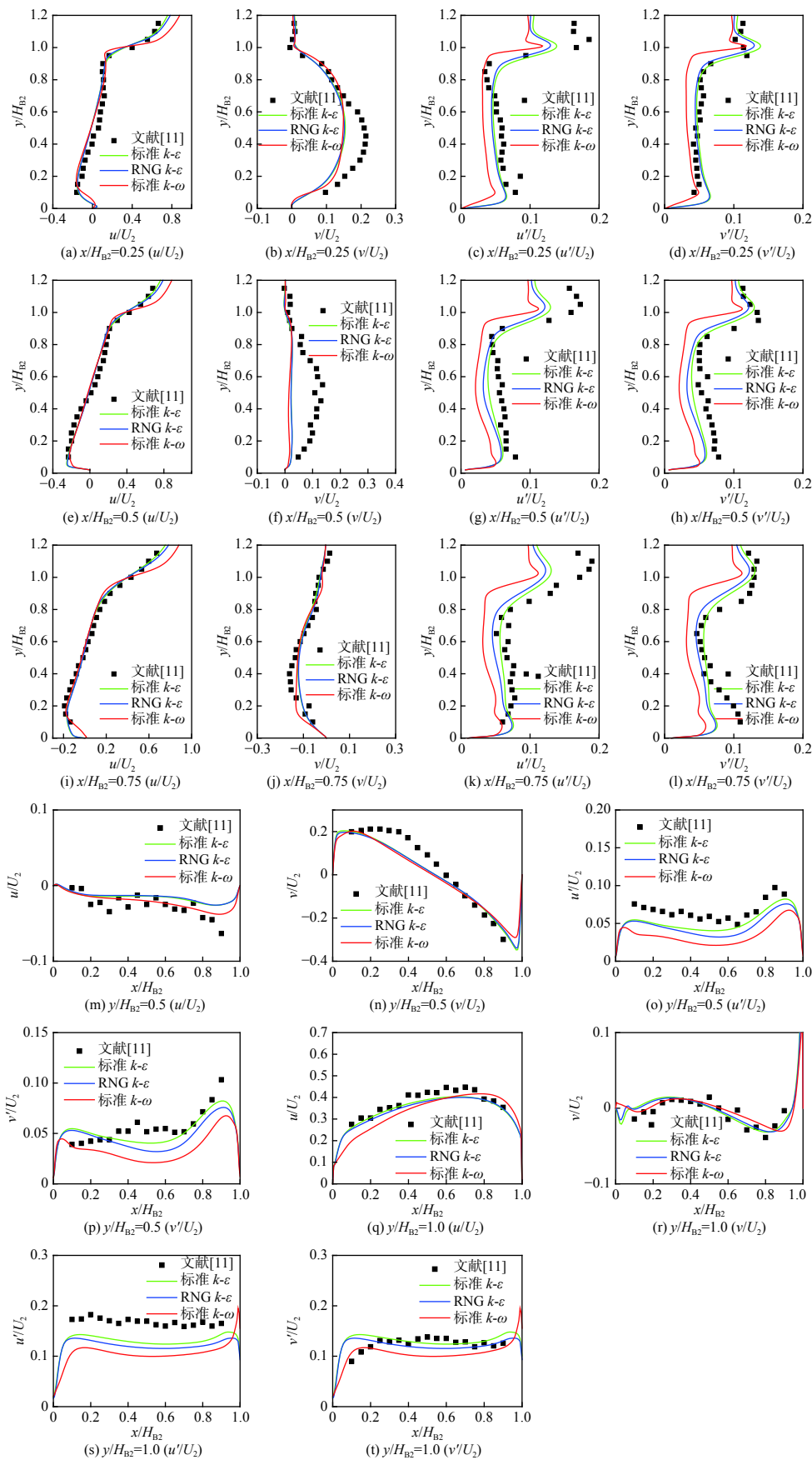


图 4 3 种紊流模型模拟的试验 B 街谷内速度分布图

Fig.4 Flow field simulated with 3 turbulence models for experiment B

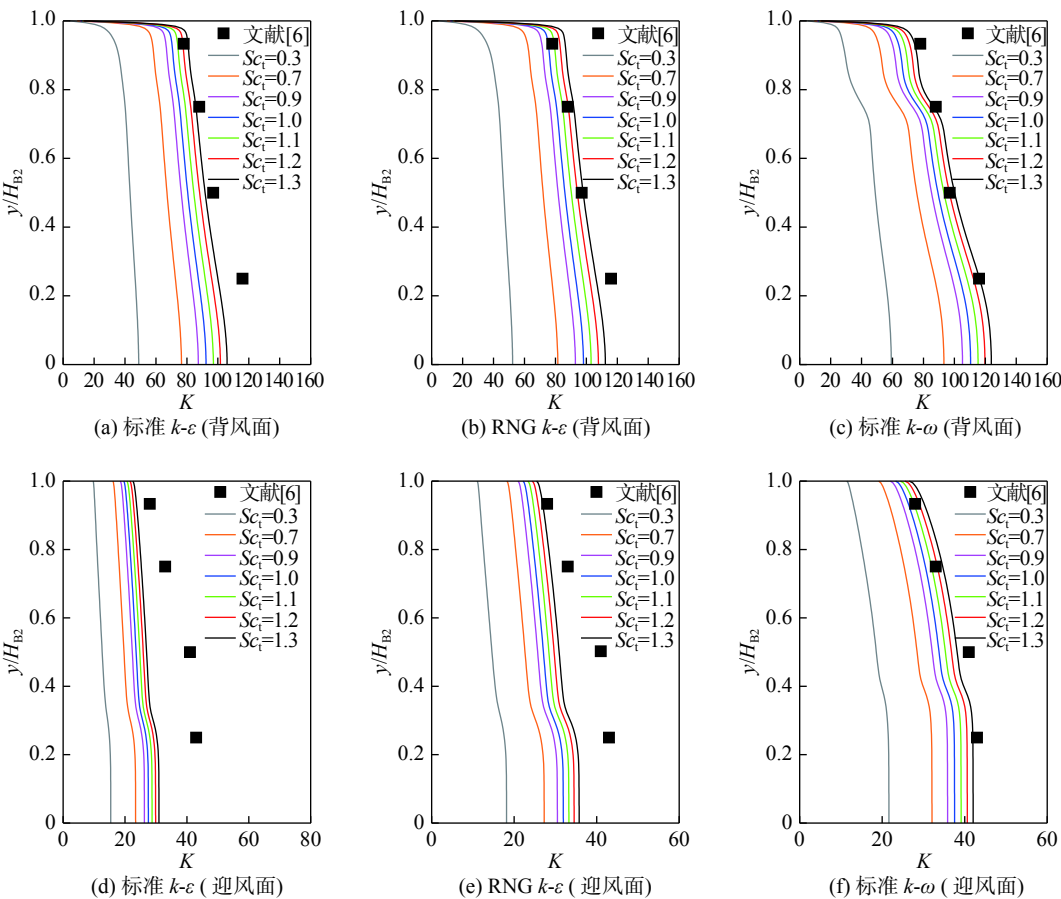


图 5 3 种紊流模型模拟的试验 B 街谷壁面 K 的分布图

Fig.5 Pollutant concentration K simulated with three turbulence models for experiment B

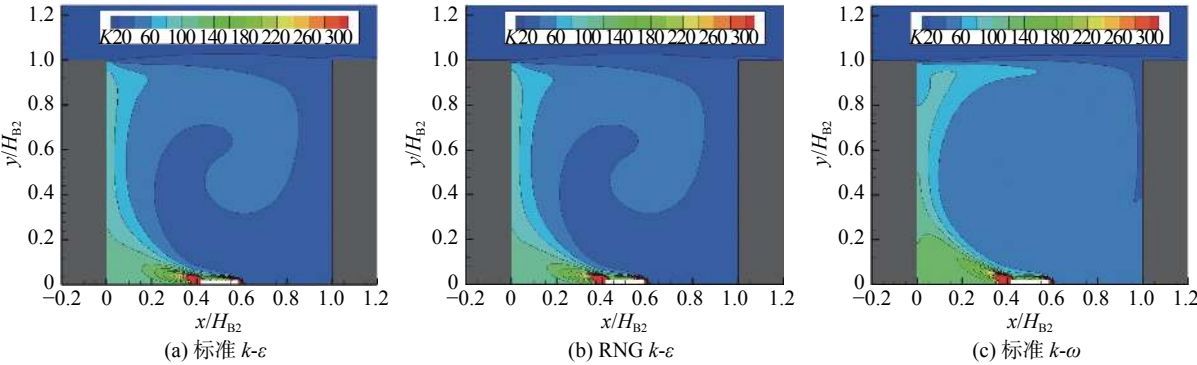


图 6 $Sc_i=1.3$ 时 3 种紊流模型模拟的试验 B 街谷内 K 的分布图

Fig.6 K contour simulated with 3 turbulence models for experiment B when $Sc_i=1.3$

6)。同时，主涡在迎风面附近的作用使得源的污染物无法通过对流作用进入街谷，因此，迎风面附近是街谷内的浓度低区。

主涡的对流作用将污染物从背风面底部带入了背风面的上部和街谷顶部，但由于标准 $k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 模型模拟的紊流强度在背风面附近大于标准 $k-\omega$ 模型的，因此，较强的紊流扩散作用使得

背风面附近的浓度减弱，导致前 2 种紊流模型的 K 值小于标准 $k-\omega$ 模型。同时，尽管标准 $k-\omega$ 模型模拟的紊流强度在街谷中部较弱，但从图 7(f)可知，标准 $k-\omega$ 模型模拟的源和迎风面附近的 v 速度均相对较小，即该处的流动对源污染物散出的抑制作用较小。因此，标准 $k-\omega$ 模型模拟的街谷中部和迎风面附近的 K 值较高。

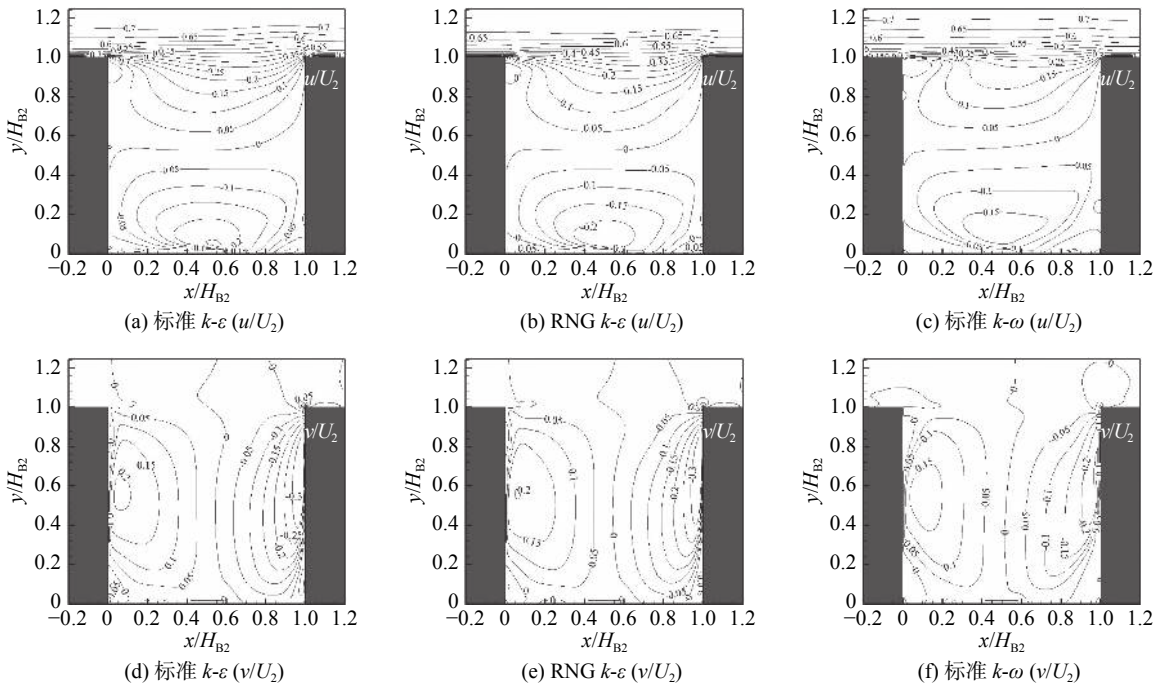


图 7 3 种紊流模型模拟的试验 B 街谷内时均速度分布图
Fig.7 Velocity contour simulated with 3 turbulence models for experiment B

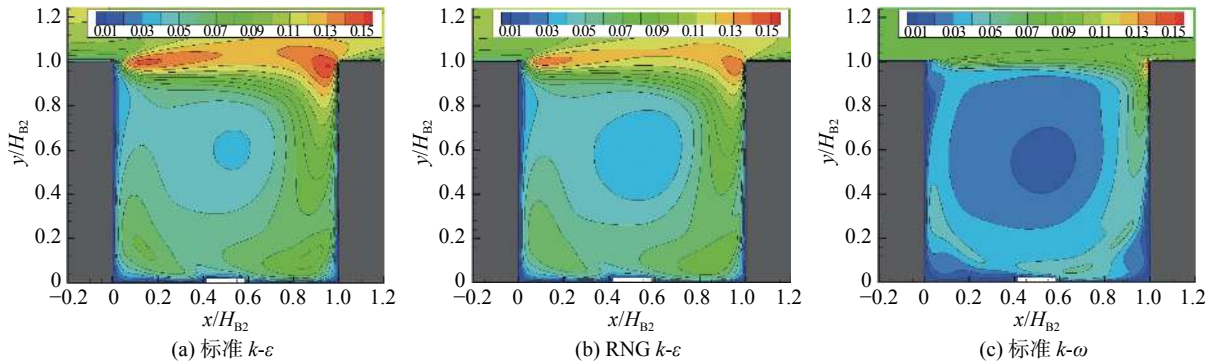


图 8 3 种紊流模型模拟的试验 B 街谷内紊流强度的分布图
Fig.8 TI contour simulated with 3 turbulence models for experiment B

3 结 论

本文以街道峡谷的水槽试验和风洞试验为依据, 利用 ANSYS Fluent 软件, 选用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型、RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和标准 $k-\omega$ 紊流模型, 数值模拟了街谷内的流场和污染物的浓度场, 比较了不同 Sc_t 对浓度值影响, 得出以下结论:

a. 标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型和标准 $k-\omega$ 模型均能基本正确地模拟出街谷内的时均速度和紊流强度, 但就模拟值与试验值的吻合度而言, 标准 $k-\omega$ 紊流模型的表现最佳;

b. Sc_t 对街谷内污染物浓度值有明显的影响, 浓度值随 Sc_t 的增加而变大, 在本文模拟的工况下, Sc_t 取 1.3 时模拟值与试验值吻合最好, 对于 Sc_t 的选取不应仅根据浓度值的吻合情况决定, 而应同时验证流场和浓度场, 再确定最佳的 Sc_t ;

c. 本文选取的 3 种紊流模型对浓度值模拟的差异性与其速度场的差异性一致, 时均速度和紊流强度共同决定了街谷内浓度的分布, 由于标准 $k-\omega$ 紊流模型对流场的模拟表现最佳, 因此其浓度场的模拟值与试验值吻合最好, 再次说明了流场验证对合理选取 Sc_t 数的必要性。

参考文献:

- [1] 谢海英, 陈康民. 风向对街道峡谷内污染物扩散的影响[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 497–504.
- [2] TAKANO Y, MOONEN P. On the influence of roof shape on flow and dispersion in an urban street canyon[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 107–120.
- [3] LLAGUNO-MUNITXA M, BOU-ZEID E, HULTMARK M. The influence of building geometry on street canyon air flow: validation of large eddy simulations against wind tunnel experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 165: 115–130.
- [4] MERONEY R N, PAVAGEAU M, RAFAILIDIS S, et al. Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1996, 62(1): 37–56.
- [5] KASTNER-KLEIN P, PLATE E J. Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(24/25): 3973–3979.
- [6] RAFAILIDIS S, SCHATZMANN M. Concentration measurements with different roof patterns in street canyon with aspect ratios $B/H=1/2$ and $B/H=1$ [R]. Hamburg: Universität Hamburg, Meteorologisches Institute, 1995.
- [7] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2011: 229–231.
- [8] TOMINAGA Y, STATHOPOULOS T. Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flowfield[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(37): 8091–8099.
- [9] BLOCKEN B, STATHOPOULOS T, SAATHOFF P, et al. Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10/11): 1817–1831.
- [10] ANSYS Incorporated. ANSYS FLUENT theory's guide[M]. 13th, ed. Canonsburg, PA: ANSYS Incorporated, 2010.
- [11] LI X X, LEUNG D Y C, LIU C H, et al. Physical modeling of flow field inside urban street canyons[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(7): 2058–2067.
- [12] AI Z T, MAK C M. CFD simulation of flow in a long street canyon under a perpendicular wind direction: evaluation of three computational settings[J]. Building and Environment, 2017, 114: 293–306.

(编辑: 丁红艺)