文章编号:1674-2974(2024)01-0170-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024016

π形山脉主山脊线风速加速效应研究

鲍旭明[1†],楼文娟[1],廖孙策[1],林晨琦[1],陈科技[2],卞荣[2]
(1. 浙江大学 结构工程研究所, 浙江 杭州 310058;
2. 国网浙江省电力有限公司 经济技术研究院, 浙江 杭州 310008)

摘 要:为研究真实地形的加速效应,提取真实地形的几何特征建立理想简化地形,提出一种π形山脉模型.采用CFD数值模拟研究顺子山脉风向下子山脉间距、长度及坡度对主山脊线加速效应的影响,结合地形特征比较π形山脉与三维余弦山脉的主山脊线加速比差异,在后者基础上获得π形山脉主山脊线特征点的风速加速比简化计算公式,并通过一处真实π形山脉加以验证.结果表明:π形山脉主山脊线中点的加速比受子山脉间距、长度影响较大,而山脊线交点的加速比受子山脉长度、坡度影响较大;与三维余弦山脉相比,π形山脉主山脊线加速比在山脊线端部相同,但整体偏小,尤其受子山脉遮挡的部分显著偏小,超过离地70 m高度后差异基本消失;通过与真实π形山脉的风场比较,发现简化地形和简化计算公式能较好反映真实地形主山脊线特征点的加速效应.

关键词:山脉;简化地形;加速比;计算流体力学(CFD);数值模拟
中图分类号:TU973.32 **文献标志码**:A

Study on Wind Speed-up Effect on Main Ridge Line of π-shaped Mountain Range

BAO Xuming[1†], LOU Wenjuan[1], LIAO Sunce[1], LIN Chenqi[1], CHEN Keji[2], BIAN Rong[2]
(1. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Research Institute of Economic Technology, Zhejiang Provincial Corporation of State Grid, Hangzhou 310008, China)

Abstract: To study the wind speed-up effect of real terrain, the geometric features of real terrain were extracted to establish an ideal simplified terrain. Then, the π-shaped mountain range was proposed in this paper. The CFD numerical simulation was used to study the influence of the distance, length, and slope of subsidiary mountain ranges on the wind speed-up effect at the main ridge line in the wind direction along subsidiary mountain ranges. The difference in the speed-up ratio of the main ridge line between the π-shaped mountain range and the three-dimensional cosine-shaped mountain range was compared by combining with the terrain characteristics. Based on the latter, a simplified calculation formula of the wind speed-up ratio at the feature points of the main ridge line of the π-shaped mountain range was obtained and verified by a true π-shaped mountain range. The results showed that the speed-up ratio at the midpoint of the main ridge line of the π-shaped mountain range was greatly affected by the

* **收稿日期**:2023-01-11
基金项目:国家自然科学基金资助重点项目(51838012), National Natural Science Foundation of China (51838012);国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY20001T), Science and Technology Project of Zhejiang Provincial Corporation of State Grid (5211JY20001T)
作者简介:鲍旭明(1994—),男,浙江舟山人,浙江大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: baoxmzjdx@163.com

distance and the length of the subsidiary mountain ranges, and the speed-up ratio at the intersection point of the ridge line was greatly affected by the length and slope of the subsidiary mountain ranges. Compared with the three-dimensional cosine-shaped mountain range, the speed-up ratio of the main ridge line of the π-shaped mountain range was the same at the end of the ridge line, but it was smaller as a whole, especially the part shielded by the subsidiary mountain ranges was significantly smaller. The difference disappeared after exceeding the height of 70m above the ground. Compared with the wind field of the real π-shaped mountain, it was found that the simplified terrain and simplified calculation formula can reflect the speed-up effect of the feature points at the main ridge line of the real terrain.

Key words: mountain range; simplified terrain; speed-up ratio; computational fluid dynamics (CFD); numerical simulation

针对山区地形开展风速加速效应的研究有助于分析抗风不利区域，对山区中结构物的设计和运行均能提供有效保障.但真实地形复杂多变，地形对风的加速效应难以被准确地预测和描述.真实地形的风场可通过风洞试验[1]和数值模拟[2]获得，但仅能针对特定地形，需要具体地形具体分析.因此基于理想简化模型的多参数研究有助于分析真实地形的加速效应.

真实地形通常采用二维山峰[3-4]、二维山坡[5-6]来表示.对于孤立地形，可采用三维轴对称山体[7-8]、三维余弦山脉[9]及变截面余弦山脉[10]加以描述.李正良等[11]对一系列不同高度、不同坡度和不同形状的三维轴对称山体进行数值模拟，分别得到迎风面、背风面和侧风坡面的风速地形修正系数.李正昊[12]通过数值模拟获得垂直山脉风向下三维余弦山脉山脊线端点和中点两个典型位置的风压地形修正系数计算公式，其间数据采用线性插值获得.但以上孤立简化地形较为理想，在真实地形中难以单独存在.而对于组合地形，可采用垭口/峡谷地形[13]进一步考虑地形之间相互干扰的结果.沈国辉等[14]基于两个三维轴对称山体开展山体间距、坡度和风向角对峡谷风场的影响.李正昊[12]对一系列不同长度、宽度和坡度的峡谷及垭口形山脉进行数值模拟，获得峡谷及垭口中轴线入口处风压地形修正系数计算公式.陈科技等[15]根据真实地形建立Y形山脉的简化模型，采用数值模拟研究Y形山脉峡谷内部山谷线区域的总风速比计算公式，对子山脉山脊线坡度、山谷夹角和子山脉长度进行讨论.显然以上组合地形在真实地形中更加常见.但峡谷、垭口及Y形山脉仅能代表一类组合地形，比如Y形山脉无法改变子山脉间距.

通过对浙江沿海地形的梳理，发现存在一部分地形难以用现有简化地形准确描述，需要研究几何差异对加速效应的影响，明确地形简化的必要性.

本文通过考察浙江沿海地形，提出一种常见的π形山脉模型，对其提取地形参数，建立数值模型.通过CFD数值模拟研究顺子山脉风向下子山脉间距、长度及坡度对主山脊线风速加速效应的影响，比较π形山脉与三维余弦山脉的主山脊线风场差异，获得π形山脉主山脊线特征点的风速加速比计算公式，并通过一处真实π形山脉加以验证简化地形和加速比计算公式的合理性.

1　π形山脉数值模型及模拟工况

真实地形地貌中，π形山脉情况较为常见，主山脉在侵蚀作用下会在两侧形成山谷地形，延伸出更多的山脊线(如图1所示).为便于表述，将该地形交汇前的两山脉称为子山脉，将交汇后的山脉称为主山脉.与余弦山脉相比，额外的子山脉相当于增加一个垭口[图1(a)]或峡谷[图1(b)]地形，在顺子山脉风向下改变了主山脉的风加速效应.



(a)π形山脉1　　(b)π形山脉2

图1　真实地形中的π形山脉

Fig.1　π-shaped mountain ranges in real terrain

2019年“利奇马”台风期间,浙江某地于图1(a)处发生一起跳线风偏事故,事故风向和线路分布见图2.因此,讨论π形山脉引起的加速效应,对预防此类事故具有应用价值.



图2 事故风向和线路分布

Fig.2 Wind direction during the accident and distribution of power lines

1.1 模型参数

针对此类真实复杂地形,通过参数化描述可提取出典型π形山脉的理想简化模型,如图3(a)所示.与Y形山脉相比,π形山脉为峡谷/垭口地形与余弦山脉的组合地形,子山脉直接构成峡谷/垭口地形,可控制峡谷/垭口的宽度,几何参数及参数化模型如图3(c)所示.D表示主山脉底部直径,D_X表示子山脉底部直径,H表示主山脉高度,L表示主山脉长度,α表示子山脉坡度,W表示子山脉距离,L_X表示子山脉长度.当$W<D_X$时,子山脉为垭口;当$W\geqslant D_X$时,子山脉构成峡谷.为比较π形山脉与三维余弦山脉的风场差异,提取π形山脉的主山脉,如图3(b)所示,将其作为三维余弦山脉进行数值模拟.余弦山脉的几何参数可由图3(c)中的H、L和D表示.

1.2 测点布置及模拟工况

与余弦山脉和Y形山脉相比,π形山脉的不利风向和区别风向均为顺子山脉风向,故以此作为本文的研究风向.为更好地衡量π形山脉与三维余弦山脉的风场差异,本文沿主山脉山脊线方向设置3个测点,针对π形山脉主山脊线端点A1、山脊线交点A2及主山脊线受子山脉遮挡的中点A3(以下简称主山脊线中点)的水平平均风速特性展开研究,如图3(c)所示.图中测点位置仅代表其平面分布.测点A1和A3是垂直山脉风向下三维余弦山脉的特征点,而测点A2能清晰反映子山脉对主山脉风场的影响.测点

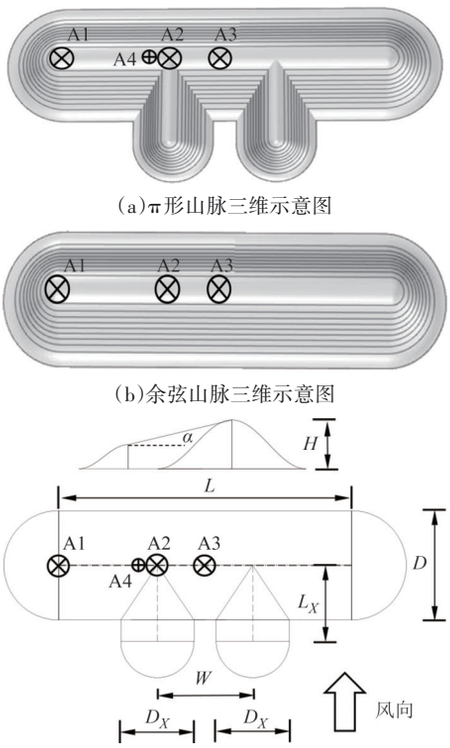


图3 π形山脉和余弦山脉模型及测点设置

Fig.3 The model and measuring point setting of π-shaped mountain range and cosine-shaped mountain range

A4位置在结果分析中获取.

重点探索子山脉山顶之间距离W、子山脉长度L_X及子山脉坡度α这三个参数对风场的影响.研究中将其余参数分别设置为定值,即主山脉相对海拔高度H=100 m,主山脉底部直径D=300 m,主山脉长度L=800 m,子山脉底部直径D_X=200 m.可变地形参数的计算工况如表1所示.

表1 数值模拟工况

Tab.1 Conditions of numerical simulation

工况	固定参数	变化参数
变子山脉间距	L_X=100;tanα=0	W=50,100,150,200,300,400,500
垭口,变子山脉长度	W=100;tanα=0	L_X=100,150,200,300,400,600
峡谷,变子山脉长度	W=200;tanα=0	
变子山脉坡度	L_X=200;W=200	tanα=0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5

1.3 数值模拟主要参数设置

计算域尺寸设置如下:地形上游及左右两侧长度设置为3 km(10D),下游长度设置为5.4 km(18D),计算域高度设置为1.5 km(15H),控制模型阻塞比小于2%(见图4).采用结构化网格对计算域进

行划分.山体表面网格尺寸为5 m,以1.1倍增长率向周围扩展,计算域入口及两侧的最大网格尺寸为280 m.竖向首层网格高度为1 m,增长率为1.05,顶部最大网格尺寸为75 m.网格总数为363万~588万.计算域的网格划分结果见图4.

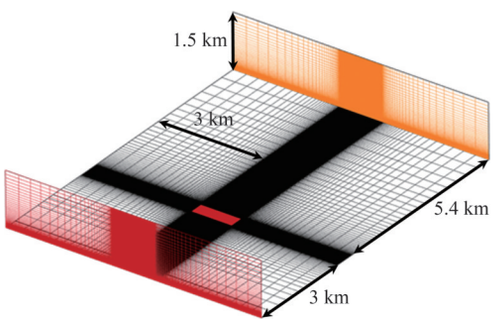


图4　数值模拟计算域网格

Fig.4　Computational domain grid of the numerical model

采用ANSYS Fluent软件进行流场模拟,选用Realizable $k-\varepsilon$湍流模型以及Scalable壁面函数,利用稳态定常方法进行计算.冯林[16]及Blocken等[17]比较了现场实测与稳态Realizable $k-\varepsilon$模型的计算结果,表明Realizable k-ε模型可准确评估复杂地形的平均风速.来流风向为顺子山脉风向,计算模型缩尺比为1∶500.入口选用B类场地的速度入口,出口设为自由出口,两侧和顶部壁面选用对称壁面,山体和平地设为无滑移壁面.地表粗糙高度为0.002.求解器采用SIMPLEC算法,对流项的离散采用二阶迎风格式.当所有物理量残差小于10^{-6},或者监测点的风速值趋于稳定,则判定为计算收敛.

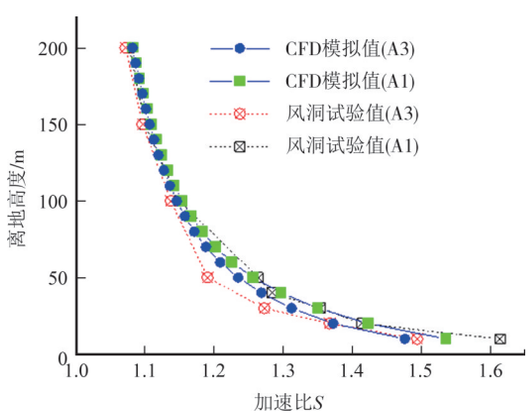


图5　CFD数值模拟结果与风洞试验结果对比

Fig.5　Comparison of CFD numerical simulation and wind tunnel experiment

更详细设置可参考文献[18-19].根据本文中的数值模拟参数设置,与已有的余弦山脉风洞试验数据[12]进行对比.余弦山脉模型如图3(b)所示,山脉底部直径D=300 m,山脉高度H=100 m,山脉长度L=300 m,比较A1和A3测点的加速比,结果见图5.二者结果基本吻合.

2　π形山脉主山脊线加速效应

采用测点的风速加速比来衡量地形加速效应,加速比定义为微地形测点的顺风向风速与平地地面(入口)相同高度处的风速比值.

2.1　子山脉间距的影响作用

将三维余弦山脉作为比较对象,比较整条主山脊线的加速比,如图6所示.图6中的工况编号代表L_X-W-tanα,数值可参考表1.以山脊线中点为中心,根据山脉长度L进行归一化,采用无量纲水平距离X/L表示山脊线相对位置.全文采用相同定义.图6(a)中主山脊线中点A3和主山脊线端点A1位置固定,山脊线交点A2的位置会随子山脉间距变化.由图6可知:1)子山脉间距对主山脊线中点加速比影响较大,对山脊线交点加速比影响较小,而对主山脊线端点的加速比基本无影响,仅子山脉间距为500 m时主山脊线端点加速比偏大,这是因为此时子山脉靠近主山脉端点,对其风场造成了影响.2)与三维余弦山脉相比,π形山脉主山脊线受子山脉宽度遮挡的部分存在较大差异,其中山脊线交点的加速比远小于三维余弦山脉.此外,子山脉间距为100 m时的主山脊线中点,以及子山脉为峡谷时距山脊线交点0.25D_X处A4测点的加速比大于三维余弦山脉.3)随离地高度增加,子山脉影响削弱,π形山脉主山脊线的加速比与三维余弦山脉接近,加速比差异主要存在于主山脊线中点.

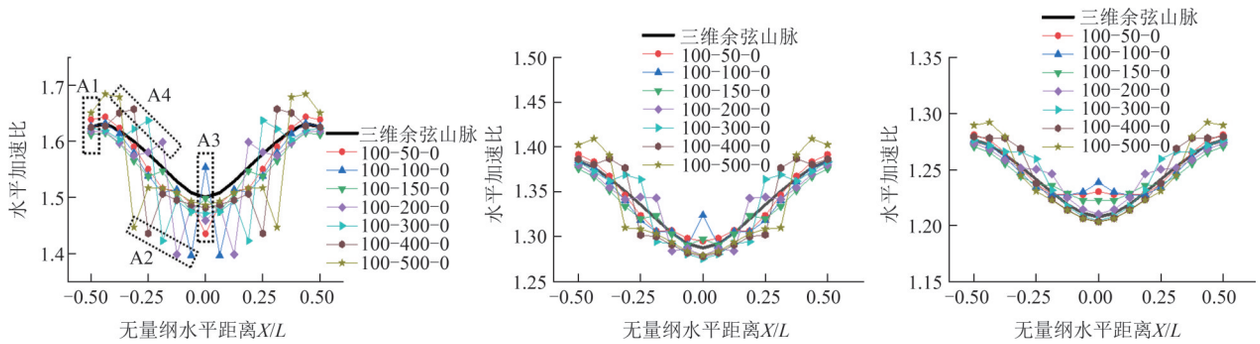
选取子山脉间距为50 m、100 m、200 m、400 m和500 m的工况,进一步比较主山脊线中点的加速比剖面差异,如图7所示.分析图7可知:1)主山脊线中点的加速比随子山脉间距的增加先增大,后减小,最后逐渐增大并接近三维余弦山脉.2)当子山脉间距为子山脉底部直径的50%(100 m)时,加速效应最大且大于三维余弦山脉;当子山脉为峡谷时,加速效应减小,随着峡谷宽度的继续增大,子山脉影响消失.

2.2　子山脉长度的影响作用

子山脉可构成峡谷或垭口地形,对风场的影响存在差异.因此分别研究子山脉山顶之间距离为100 m(垭口)和200 m(峡谷)时主山脊线加速比.

2.2.1　垭口长度的影响作用

比较整条主山脊线的加速比,如图8所示.由



(a)离地 10 m (b)离地 30 m (c)离地 50 m

图 6 子山脉间距对主山脊线的加速比影响

Fig.6 Influence of the distance between subsidiary mountain ranges on speed-up ratio at the main ridge line

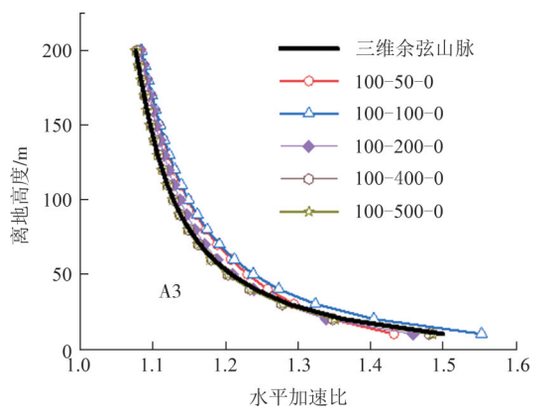
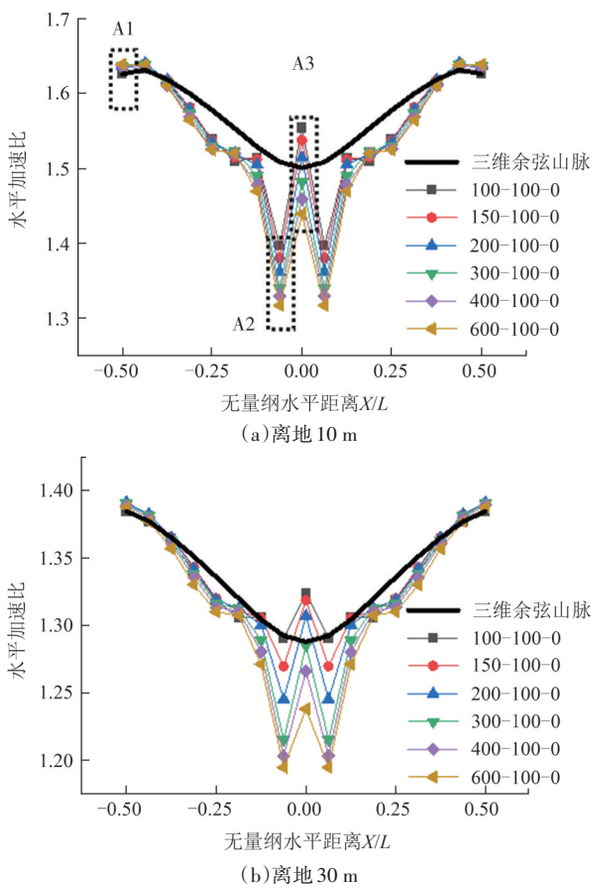


图 7 子山脉间距对主山脊线中点加速比影响

Fig.7 Influence of the distance between subsidiary mountain ranges on speed-up ratio at the midpoint of the main ridge line



(a)离地 10 m (b)离地 30 m

图 8 垭口长度对主山脊线的加速比影响

Fig.8 Influence of the col length on speed-up ratio at the main ridge line

图 8 进一步可知:1)π形山脉在山脊线交点和主山脊线中点均受垭口长度影响较大,总影响范围为子山脉的总遮挡宽度 300 m($2D_X-W$)范围内,而对主山脊线端点的加速比基本无影响;2)随着垭口长度增加,π形山脉主山脊线受子山脉遮挡范围内的水平加速比显著减小;3)与三维余弦山脉相比,π形山脉主山脊线的加速比整体偏小,具体呈现为两端相同但遮挡部分显著偏小的分布,仅当垭口长度小于子山脉宽度时π形山脉主山脊线中点的加速比偏大,这在不同离地高度下均成立.分析该现象主要原因:1)垭口在子山脉山顶形成山顶平台,对山脊线交点的流场造成遮挡,同时山顶平台越长,风在越过山顶平台后减速越明显,因此山脊线交点加速比显著偏小;2)垭口内部的山体摩擦耗能随垭口长度的增加而增加,流动受到加速效应和山体摩擦能耗的综合影响,因此主山脊线中点的加速比变化较大.

选取垭口长度为 100 m、200 m、400 m 和 600 m 的工况,进一步比较主山脊线中点和山脊线交点的加速比剖面差异,如图 9 所示.由图 9 可知:1)随着垭口长度增加,山脊线交点和主山脊线中点的水平加速比均逐渐减小;2)垭口长度对山脊线交点离地 70 m 以下的水平加速比影响显著,尤其是离地 20 m 高度处;3)与余弦山脉相比,加速比差异均集中在离地 70 m 高度以下.

2.2.2 峡谷长度的影响作用

比较整条主山脊线的加速比,如图 10 所示.进一步可知:1)π形山脉在主山脊线上仅山脊线交点

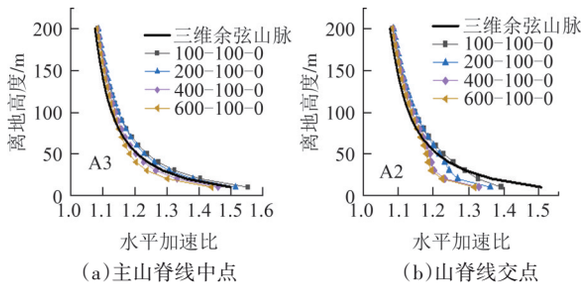


图 9　垭口长度对测点加速比影响

Fig.9　Influence of the col length on speed-up ratio at the measuring points

受峡谷长度影响较大,总影响范围为子山脉的总底部直径400 m($2D_X$)范围内;2)随着峡谷长度增加,主山脊线受影响范围内的水平加速比显著减小;3)与三维余弦山脉相比,π形山脉主山脊线的加速比总体偏小,结合图6(a)、图8(a)和图10(a),发现仅当子山脉呈现为峡谷,且长度小于子山脉宽度时,A4测点处的加速比偏大.

选取峡谷长度为100 m、200 m、400 m和600 m的工况,进一步比较山脊线交点的加速比剖面差异,如图11所示.由图11可知:1)峡谷长度对山脊线交点离地70 m以下的水平加速比影响显著,峡谷长度越长,山脊线交点的加速比越小;2)与三维余弦山脉相比,加速比差异均集中在离地70 m高度以下.

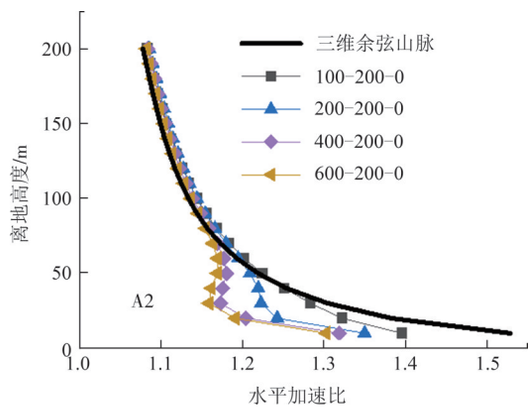


图 11　峡谷长度对山脊线交点加速比影响

Fig11　Influence of the canyon length on speed-up ratio at the intersection point of ridge line

2.3　子山脉坡度的影响作用

比较整条主山脊线的加速比,如图12所示.进

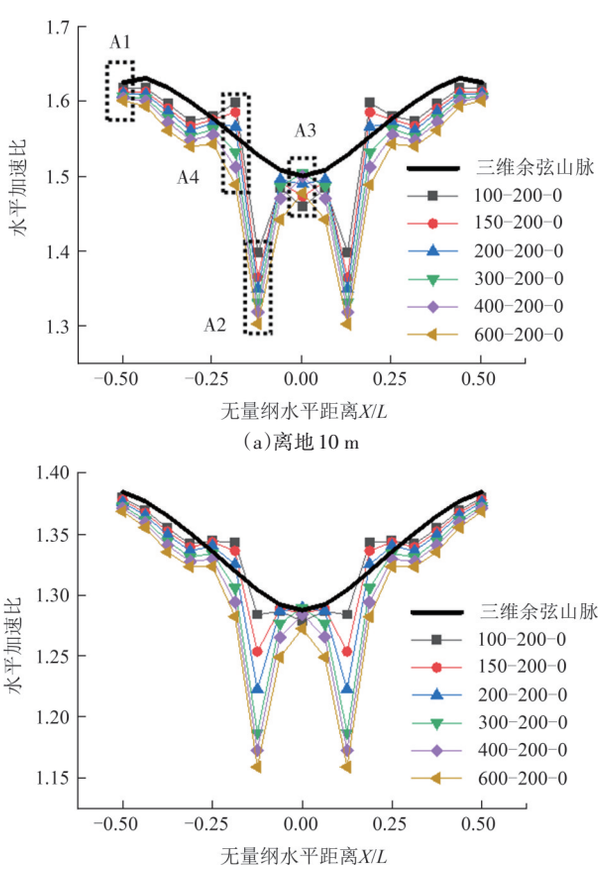


图 10　峡谷长度对主山脊线的加速比影响

Fig.10　Influence of the canyon length on speed-up ratio at the main ridge line

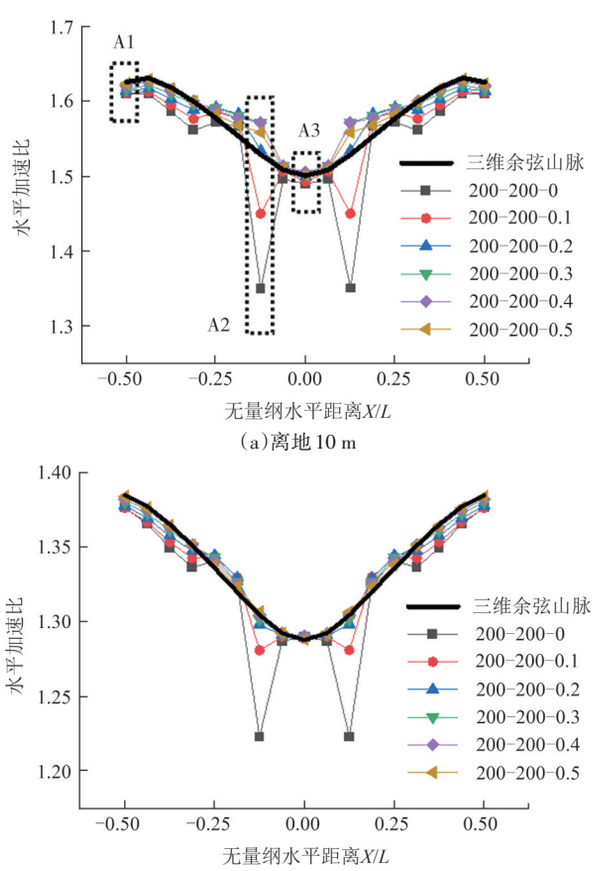


图 12　子山脉坡度对主山脊线的加速比影响

Fig.12　Influence of the slope of subsidiary mountain ranges on speed-up ratio at the main ridge line

一步可知:1)π形山脉在主山脊线上仅山脊线交点受子山脉坡度影响较大,总影响范围为子山脉的总底部直径400 m($2D_X$)范围内;2)随着子山脉坡度增加,主山脊线受影响范围内的水平加速比显著增大,主要是由于子山脉坡度的存在有利于流场向上翻越主山脉;3)与三维余弦山脉相比,子山脉坡度越小,π形山脉的主山脊线加速比差异越小,子山脉的影响逐渐消失.

进一步比较山脊线交点的加速比剖面差异,如图13所示.由图13可知:1)随着子山脉坡度增加,交点处水平加速比增大,但坡度余弦值在16.7°(tanα=0.3)~26.6°(tanα=0.5)之间变化时,水平加速比几乎无变化.主要是因为此时子山脉的坡度大于余弦山脉山顶处的斜率,即余弦山脉山顶处的斜率成为子山脉的有效坡度.2)与三维余弦山脉相比,加速比差异均集中在离地高度50 m以下.

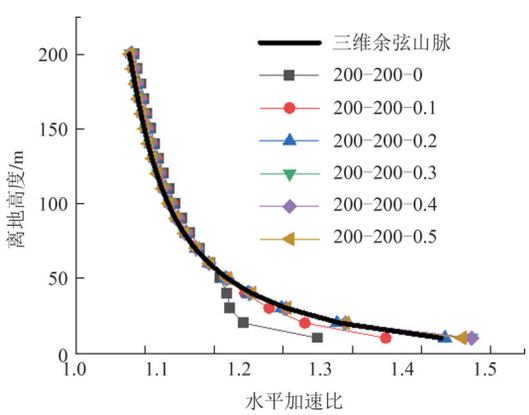


图13 子山脉坡度对山脊线交点加速比影响

Fig13 Influence of the slope of subsidiary mountain ranges on speed-up ratio at the intersection point of ridge line

3 π形山脉主山脉加速比拟合

π形山脉的主山脉与余弦山脉具有相同的几何特征,区别在于π形山脉在余弦山脉基础上增加了两个子山脉组成的垭口/峡谷地形.经多种工况验证,参考文献[12]中的拟合公式能准确反映三维余弦山脉的加速比,且已包含较大的参数范围,具有较强的适应性.考虑到本文参数分析集中在子山脉的三个参数,而主山脉的风场影响不可忽略,因此对于π形山脉主山脊线水平加速比的拟合可通过相关余弦山脉的计算结果修正得到.重点拟合主山脊线中点及山脊线交点处的水平加速比.

3.1 余弦山脉垂直山脉风向的加速比结果梳理

参考文献[12]对余弦山脉垂直山脉风向的水平加速比计算公式梳理如下.

3.1.1 山脊线端点

$$\begin{cases} S(z)^2 = \dfrac{S_{\max}^2}{az/H + b} + c \\ S_{\max}^2 = \eta_L \eta_D \end{cases} \tag{1}$$

$$\eta_L = \begin{cases} 0.100\,7x_L^2 - 0.301\,1x_L + 2.449\,8, & L \leqslant 2H \\ -0.001\,6x_L^3 + 0.026\,4x_L^2 - 0.133\,1x_L + 2.477\,6, & L > 2H \end{cases} \tag{2}$$

$$\eta_D = 0.427\,1x_D^2 - 0.833\,7x_D + 1.364\,5 \tag{3}$$

式中:S为水平加速比;$S_{\max}^2$为水平风速加速比最大值的平方(离地高度10 m);η_L与η_D分别表示考虑山脉长度和山脉底部直径影响的修正系数;x_L=L/H;x_D=$2H/D$;a、b与c分别表示高度方向修正系数;H为山脉高度;D表示余弦山脉底部直径;z为离地高度.参数a、b同样受到两个地貌参数的影响,具体计算公式见表2;c的取值相对简单,当D>600 m时,取为1.02,D≤600 m该值时,取为1.12.

表2 山脊线端点处的加速比修正系数参数

Tab.2 Correction coefficient parameters of speed-up ratio at the endpoint of ridge line

修正项目	参数
长度修正	$a_L = \begin{cases} -0.940\,6x_L^3 + 3.093\,7x_L^2 - 2.652\,2x_L + 6.354\,9, & L \leqslant 2H \\ 0.008\,6x_L^2 - 0.144x_L + 6.120\,9. & L > 2H \end{cases}$
	$b_L = \begin{cases} 0.107\,4x_L^3 - 0.404\,1x_L^2 + 0.482\,3x_L + 1.022, & L \leqslant 2H \\ -0.002\,1x_L^2 + 0.029\,4x_L + 1.159\,3, & L > 2H \end{cases}$
底部直径修正	$a_D = 0.593\,6x_D^2 - 0.572\,9x_D + 1.118\,3$
	$b_D = -0.210\,6x_D^2 + 0.370\,3x_D + 0.842\,8$
$a = a_L a_D; b = b_L b_D$	

3.1.2 山脊线中点

山脊线中点的加速比计算公式同式(1),但η_L与η_D需要进行调整.高度方向参数a、b与c均受到两个地貌参数的影响,参数结果见表3.

$$\eta_L = -0.000\,6x_L^3 + 0.014\,x_L^2 - 0.113x_L + 2.303\,4 \tag{4}$$

$$\eta_D = 0.889\,2x_D^2 - 1.561\,7x_D + 1.632\,3 \tag{5}$$

使用条件:离地高度250 m以下,x_L=0~8,x_D=2/9~1.其余位置的加速比可由线性插值获得.

3.2 π形山脉主山脊线加速比计算

充分考虑子山脉地形参数对π形山脉主山脊线水平加速比的影响,得出如下结论:1)π形山脉主山脊线的加速比与三维余弦山脉的差异集中在受子山脉遮挡范围内,影响高度为离地70 m以内;2)π形山

表 3　山脊线中点处的加速比修正系数参数

Tab.3　Correction coefficient parameters of speed-up ratio at the midpoint of ridge line

修正项目	参数
长度修正	$a_L=-0.066\,6x_L^2+0.985\,7x_L+4.848\,8$ $b_L=-0.005\,2x_L^2+0.056\,4x_L+1.217\,1$ $c_L=0.001x_L^3-0.016\,5x_L^2+0.086\,4x_L+0.935\,2$
底部直径修正	$a_D=0.636\,7x_D^2-0.120\,4x_D+0.807$ $b_D=-0.800\,2x_D^2+1.111\,7x_D+0.616\,6$ $c_D=0.294\,5x_D^2-0.409\,6x_D+1.135$
$a=a_La_D;b=b_Lb_D;c=c_Lc_D$	

脉主山脊线中点的加速比需要考虑子山脉间距和长度的修正，山脊线交点的加速比需要考虑子山脉长度和坡度的修正；3）子山脉地形参数变化对主山脊线端点的加速比几乎没有影响.

π形山脉主山脊线加速比计算公式如下：

$$S(z)=\lambda_{XL}\lambda_\alpha\lambda_W S_s(z) \tag{6}$$

式中：$S_s(z)$为垂直山脉风向下三维余弦山脉对应位置的水平加速比；λ_{XL}为子山脉长度修正系数；λ_α为子山脉坡度修正系数；λ_W为子山脉间距修正系数，均给出离地高度为 10 m时的取值，当离地高度$z\geqslant$70 m时，取$\lambda_{LX}=\lambda_\alpha=\lambda_W=1$，其间数值采用线性插值得到.

3.2.1　主山脊线端点

π形山脉主山脊线端点的水平加速比与三维余弦山脉的结果基本一致，此时$S(z)=S_s(z)$.

3.2.2　山脊线交点

子山脉长度和坡度均会对山脊线交点的水平加速比产生影响，此时取$\lambda_W=1$. 离地高度为 10 m时的参数结果如下：

$$\lambda_{XL}=\begin{cases}0.073\,33x_{XL}^{-0.4849}+0.809\,7, \text{峡谷}\\ 0.167\,5x_{XL}^{-0.1844}+0.735\,3, \text{垭口}\end{cases} \tag{7}$$

$$\lambda_\alpha=(1.229\tan\alpha+0.350\,6)/(\tan\alpha+0.397\,4) \tag{8}$$

式中：$x_{XL}=L_X/D_X$，为子山脉长度与子山脉底部直径的比值，范围为0.5~3；tanα为子山脉坡度的余弦值，范围为0~0.5，当tanα>0.3时，取λ_α=0.3，当tanα=0时，取λ_α=1.

3.2.3　主山脊线中点

当子山脉呈现为垭口时，其长度和间距会对主山脊线中点的水平加速比产生影响，此时取λ_α=1. 离地高度为 10 m时的参数修正结果如下：

$$\lambda_{XL}=-0.534\,6x_{XL}^{0.083\,19}+1.543 \tag{9}$$

$$\lambda_W=1.389x_W^3-3.03x_W^2+1.988x_W+0.625\,6 \tag{10}$$

式中：$x_W=W/D_X$，为子山脉间距与子山脉底部直径的比值，范围为0.25~2.5，当$x_W\geqslant$1时，取λ_W=1.

3.2.4　主山脊线

子山脉对主山脉风场的影响范围为子山脉的遮挡长度，即子山脉底部直径. 可通过主山脊线端点和主山脊线中点结果对主山脊线其余各点的水平加速比进行插值，然后确定山脊线交点结果，对子山脉底部直径范围内的主山脊线加速比结果进一步插值，进而获得整条主山脊线的加速比结果.

以子山脉长度L_X=200 m，子山脉间距W=100 m，坡度tanα=0为例，比较主山脊线中点加速比公式的拟合效果，如图 14 所示. 拟合公式的结果与 CFD 模拟的结果较为吻合.

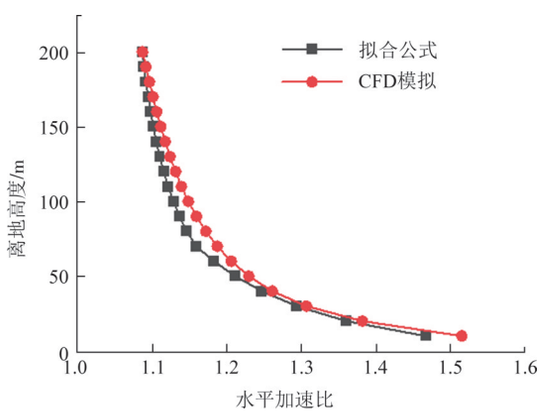


图 14　加速比对比

Fig.14　Comparison of speed-up ratio

4　与真实地形加速比对比

选择乐清某地的真实π形山脉，位于东经 121°8′14.23″，北纬 28°26′32.72″，如图 1(a)所示. 等高线、风向及测点见图 15，测点 A3 为主山脊线中点，测点 A2 为主山脉与子山脉的交点. 地形直径为 4.65 km. 提取几何参数建立简化模型，主山脉相对海拔高度H=250 m，主山脉底部直径D=1 150 m，主山脉长度L=1 756 m，子山脉底部直径D_X=970 m，子山脉坡度α=13.4°，子山脉间距W=595 m，子山脉长度L_X=840 m. A2 与 A3 分别位于主山脉中点两侧，距离分别为 17 m和 280 m. 选择顺子山脉风向对真实π形地形进行 CFD 风场建模，建模过程可参考文献[10]. 对简化地形同样进行风场数值模拟. 均采用第 1 节所述的流场条件和网格划分方案. 影响数值模拟结果的主要因素是地形的几何、边界条件及湍流模型，因此采用相同设置进行真实地形的数值模拟是合理的.

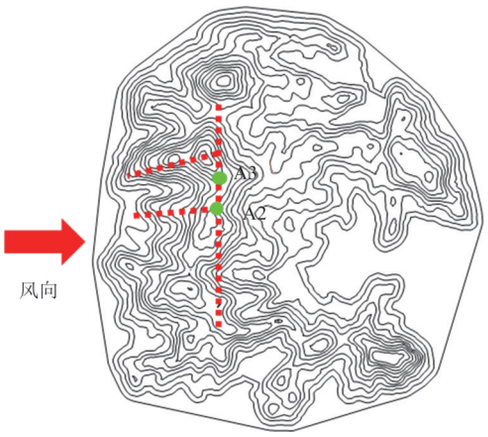
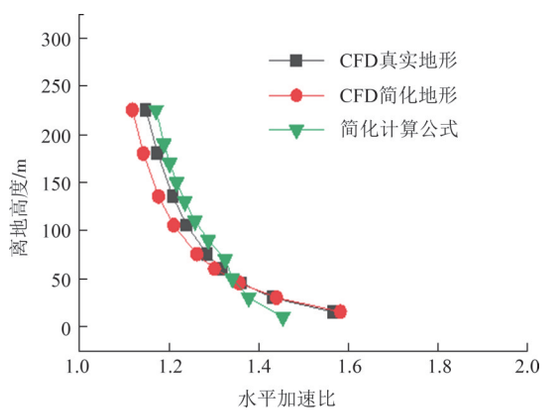


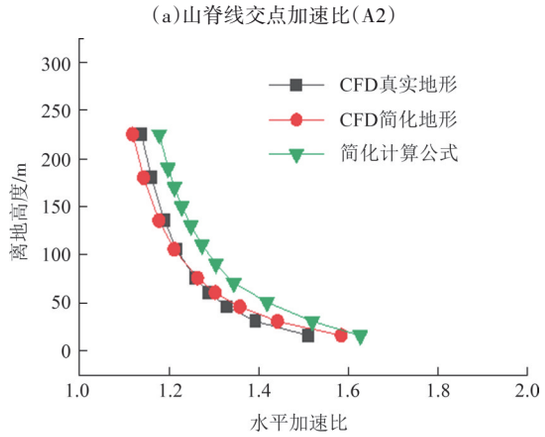
图 15 真实π形山脉等高线及测点

Fig.15 Contours and measuring points of real π-shaped mountain range

比较测点的加速比,结果如图 16 所示.由图中结果可得:1)简化地形和真实地形在两个特征点的加速比结果较为吻合,说明简化地形能较好反映真实π形山脉主山脊线特征点的风场特征.2)简化公式的计算结果能够基本反映加速比变化趋势,对于快速判断地形的加速效应具有应用价值.



(a)山脊线交点加速比(A2)



(b)主山脊线中点加速比(A3)

图 16 测点加速比对比

Fig.16 Comparison of speed-up ratio at measuring points

5 结 论

本文以π形山脉作为研究对象,研究顺子山脉风向下子山脉间距、长度及坡度对主山脊线加速效应的影响,得出主要结论如下:

1)π形山脉主山脊线中点的加速比受子山脉间距和子山脉长度影响较大,随子山脉间距的增加先增大,后减小,随子山脉长度的增加而减小.

2)π形山脉山脊线交点的加速比受子山脉长度和子山脉坡度影响较大,随子山脉长度的增加而减小,随子山脉坡度增加而增大.子山脉的地形参数对主山脊线端点的加速比几乎没有影响.

3)与三维余弦山脉相比,π形山脉主山脊线加速比整体偏小,在被子山脉遮挡的部分存在较大差异,其中山脊线交点的加速比远小于三维余弦山脉;当子山脉间距为 50% 子山脉宽度且长度小于子山脉宽度时,主山脊线中点的加速比大于三维余弦山脉;当子山脉为峡谷且长度小于子山脉宽度时,距山脊线交点 25% 子山脉宽度处的加速比大于三维余弦山脉;加速比均随子山脉长度的增加而减小.通过比较加速比剖面,发现二者差异限制在离地 70 m 高度范围内,超过该高度后子山脉影响基本消失.

4)对于π形山脉主山脊线的加速比计算仅需要对离地 70 m 以下进行修正,简化地形和简化计算公式能较好反映真实π形山脉主山脊线特征点的加速比.

定常算法忽略时间变化,无法预测间歇性流动分离,不能准确估计陡峭地形背风面风速.因此将来考虑采用非定常算法进一步准确揭示风场结构.

参考文献

[1] 沈国辉, 翁文涛, 王轶文, 等. 某复杂山体的三维风场特征研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 75-80.
SHEN G H, WENG W T, WANG Y W, et al. A study on three-dimensional wind field characteristics of a complex hill [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39 (4): 75-80. (in Chinese)

[2] 沈炼, 韩艳, 蔡春声, 等. 山区峡谷桥址处风场实测与数值模拟研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 16-24.
SHEN L, HAN Y , CAI C S, et al. Experiment and numerical simulation for wind field of a long-span suspension bridge located in mountainous canyon[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 16-24. (in Chinese)

[3] JACKSON P S, HUNT J C R. Turbulent wind flow over a low hill [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975, 101(430): 929-955.

[4] CAO S Y, TAMURA T. Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(1): 1-19.

[5] BOWEN A J, LINDLEY D. A wind-tunnel investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1977, 12(3): 259-271.

[6] BITSUAMLAK G, STATHOPOULOS T, BÉDARD C. Numerical modeling of wind flow over different types of topography [C]// Proceedings of the 2004 Structures Congress. Nashville, Tennessee, United States: Structural Engineering Institute of ASCE, 2004.

[7] ISHIHARA T, HIBI K, OIKAWA S. A wind tunnel study of turbulent flow over a three-dimensional steep hill[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/2/3): 95-107.

[8] YANG Q S, ZHOU T, YAN B W, et al. LES study of topographical effects of simplified 3D hills with different slopes on ABL flows considering terrain exposure conditions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 210: 104513.

[9] 楼文娟,梁洪超,李正昊,等. 典型山地地形竖向风速分布特征[J]. 空气动力学学报,2018,36(5):791-797.
LOU W J, LIANG H C, LI Z H, et al. Vertical wind velocity distribution in typical hilly terrain [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(5): 791-797. (in Chinese)

[10] 鲍旭明,楼文娟,徐海巍,等. 基于风场效应等代的真实山脉简化模型对比研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(9):108-116.
BAO X M, LOU W J, XU H W, et al. Comparative study on simplified models of real mountains based on similar wind field effects [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(9): 108-116. (in Chinese)

[11] 李正良, 徐姝亚, 肖正直, 等 山地风速地形修正系数沿山坡的详细插值分布[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 23-31.
LI Z L, XU S Y, XIAO Z H, et al. Detailed interpolation distribution of hilly wind topographic factor along hillside [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3): 23-31. (in Chinese)

[12] 李正昊. 山脉地形下的平均风场特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 74-83.
LI Z H. Study on characteristics of mean wind field of mountain range terrain [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 74-83. (in Chinese)

[13] YU C J, LI Y L, ZHANG M J, et al. Wind characteristics along a bridge catwalk in a deep-cutting gorge from field measurements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 186: 94-104.

[14] 沈国辉, 姚旦, 楼文娟, 等. 单山和双山风场特征的CFD数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 37-44.
SHEN G H, YAO D, LOU W J, et al. Investigation of the wind field characteristics on isolated hill and two adjacent hills using CFD numerical simulation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 37-44. (in Chinese)

[15] 陈科技, 卞荣, 潘晨, 等. 交叉山脉地形下的山谷平均风速特性研究[J]. 电工技术,2022(5):123-127.
CHEN K J, BIAN R, PAN C, et al. Study on characteristics of valley average wind speed in crossed mountain terrain [J]. Electric Engineering, 2022(5): 123-127. (in Chinese)

[16] 冯林. 基于峡谷地形的风场数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016: 20-23.
FENG L. Numerical simulation of wind field based on canyon terrain[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016: 20-23. (in Chinese)

[17] BLOCKEN B, HOUT A, DEKKER J, et al. CFD simulation of wind flow over natural complex terrain: case study with validation by field measurements for Ria de Ferrol, Galicia, Spain [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 147:43-57.

[18] 楼文娟, 刘萌萌, 李正昊, 等. 峡谷地形平均风速特性与加速效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 8-15.
LOU W J, LIU M M, LI Z H, et al. Research on mean wind speed characteristics and speed-up effect in canyon terrain [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 8-15. (in Chinese)

[19] 李正昊, 楼文娟, 章李刚, 等. 地貌因素对垭口内风速影响的数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5): 848-855.
LI Z H, LOU W J, ZHANG L G, et al. Numerical simulation of effects of topographic factors on wind speed in col [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(5): 848-855. (in Chinese)