

DOI: 10.5846/stxb202007241939

王凯, 梁红, 严岩. 基于 CFD 模拟的不同地形格局风场规律及其风感规划对策. 生态学报, 2021, 41(9): 3499-3511.

Wang K, Liang H, Yan Y. Wind field law of different terrain patterns based on computational fluid dynamics simulation and application in wind sensing planning. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3499-3511.

基于 CFD 模拟的不同地形格局风场规律及其风感规划对策

王 凯^{1,2}, 梁 红¹, 严 岩^{2,*}

1 青岛农业大学园林与林学院, 青岛 266109

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:近地表地形的风场受坡度坡向、地表形态和空间格局等地形要素的控制, 从而影响人的“风感”体验, 是人居环境的选址与布局需要考虑的重要因素。通过建立地形 3D 模型、划分网格、设定模拟工况, 运用 Fluent 14.0 软件对不同山体地形坡度、形态和格局的风场进行 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模拟。结果发现: (1) 坡度在 0.3 以下对地形风场影响较小; 当坡度大于 0.5 时, 随坡度增大背风坡风影区逐渐增大, 挡风效果更加明显; 坡度大于 0.7 以后, 随着风影区加大, 回流涡旋更加明显。 (2) 风场受到周边地形形体的影响, 尤其是迎风面和背风面截面变化率。迎风面截面变化率越大, 风速变化越快; 背风面截面变化越大, 背风面的出现风影区和回流涡旋的几率越大。迎风面出现凹形迎风口会形成气体滞留区, 而背风面凹形口后部会增加风影区和回流涡旋出现的几率。 (3) 不同地形格局对单个地形的风场具有强化和减弱效果。“三面环山”的相对封闭的地形格局有利于形成稳定的风场, 并提高风感舒适度。在人居环境的风感营造和优化中, 需要避开风感敏感区域, 即风速激增区、回流涡旋区、无固定风向的强烈湍流区、气流不流通的静风区和气流死循环涡旋区等风感敏感区, 并利用植被或者人工构筑物来消除敏感区或削弱这一影响。并根据不同的气候类型和城市特点进行选址、地形改造或者进行内部地形格局调整和优化, 以提高风感舒适度。选择开放型地形格局和低坡度、平行风向的流线型地形能够加强通风, 而塑造封闭性地形格局和垂直风向的陡坡地形能够减小风速。

关键词:景感生态学; 风感; CFD 模拟; 地形; 风场

Wind field law of different terrain patterns based on computational fluid dynamics simulation and application in wind sensing planning

WANG Kai^{1,2}, LIANG Hong¹, YAN Yan^{2,*}

1 School of Landscape Architecture and Forest, Qingdao Agriculture University, Qingdao 266109, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The wind field of near surface topography is controlled by the terrain factors such as slope and aspect, surface morphology and spatial pattern, thus affecting people's "wind feeling", which is important in the site selection and layout of human settlements. By establishing 3D terrain model, dividing grid and setting simulation conditions, this paper uses Fluent 14.0 to simulate the wind field of different slope, shape and pattern of mountain terrain. The results show that: (1) the slope below 0.3 has little influence on the terrain wind field; when the slope is greater than 0.5, the wind shadow area of leeward slope gradually increase with the increase of slope, and the wind resistance effect is more obvious; when the slope is larger than 0.7, the return vortex becomes more obvious with the increase of wind shadow area. (2) The wind field

基金项目:国家自然科学基金青年基金(31800448); 青岛农业大学高层次人才科研基金(6631119001)

收稿日期:2020-07-24; **修订日期:**2021-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyan@rcees.ac.cn

is affected by the surrounding terrain, especially the change rate of the windward and leeward sections. The larger the change rate of windward section is, the faster the wind speed changes; the greater the change of leeward cross-section is, the greater the probability of occurrence of wind shadow area and circumfluence vortex on leeward side. The presence of a concave inlet on the windward side will strengthen the gas retention zone, while the rear of the concave opening on the leeward side will increase the probability of the occurrence of wind shadow area and reflux vortex. (3) Different terrain patterns can strengthen and weaken the wind field of a single terrain. Through the simulation of the traditional terrain pattern of "surrounded by mountains on three sides", it is found that the relatively closed pattern is conducive to the formation of stable wind field and the improvement of wind comfort. When constructing and improving the windsense of human settlements, it is necessary to avoid the wind sensitive areas in different terrain, such as high wind speed ratio area, reflux vortex area, turbulent area without fixed wind direction, no wind area and vortex area of air circulation. Vegetation or artificial structures should be used to remove or weaken the wind sensitive area. According to different climate types and urban characteristics, the windsense can be improved through site selection, terrain transformation or internal terrain pattern adjustment. The open terrain pattern, the streamlined terrain parallel to wind with low slope can enhance ventilation, while the closed terrain pattern, the steep terrain vertical to wind can reduce wind speed.

Key Words: Landsenses ecology; windsense; CFD simulation; terrain; wind field

“风感”是景感规划所关注的八个类型的感觉之一。城市风感规划通过对城市物理空间的改变来改善城市通风,提升城市小环境的气候品质,从而优化风感^[1-4]。地形是构成城市覆盖层最基本的地表自然单元,从宏观上来讲,地形的褶皱影响地面纹理和粗糙度,影响近地面层的空气流通,从而影响区域的通风和风速,影响区域生态系统。从中观和微观上来讲,地形所形成的风场不仅影响城市规划选址与内部空间布局。利用地形的风场特点和“风感”规律进行选址或营造气候适应型空间格局,对于谷地、盆地和环山型等山地城市的人居环境优化,解决雾霾频发城市的通风问题,并提升城市内部微空间“风感”舒适度具有一定的指导意义^[5-9]。风感规划对于城市气候适应性规划,改善风敏感型城市生态环境,并基于风感做相应的土地利用和规划建设具有较好的指导价值。风感是基于人的物理和心理感知,风感的好坏直接反映生态系统的服务功能优劣,提升风感能够提高生态系统服务功能^[10-13]。

目前,计算流体力学(CFD)数值模拟技术已经逐渐成为了研究风场的主要研究手段,也逐渐被应用到不同地形风场模拟中。在进行山地建筑设计和山地环境的建筑规划时,可以应用 CFD 模拟的方法研究中小尺度的山地地形的风场规律,在此基础上合理设计和布局山地建筑^[14-17]。随着计算机运算能力的提高和 CFD 模拟计算的日趋成熟,CFD 数值模拟的方法逐渐被应用到更大尺度的山地风场研究上,并将模拟结果直接用于分析宏观尺度生态环境和气候问题^[18-20]。通过上述研究结果对比发现,不同尺度地形格局的风场模拟结果具有一定的相似性,均反映了地形风场的一般规律。理清这一规律,有助于指导城市的选址与布局,优化人居生态环境。但是,目前对于不同坡向、形态和空间格局的地形风场的一般性规律所做的研究并不深入,也并未总结出可供风感规划直接利用的简单、且易于操作的方法。据此,本文以地形的风场作为研究对象,通过 CFD 模拟分析,总结出不同地形风场的一般性规律,并根据人的主观感受确定地形的风感敏感区,制定城市风感规划策略。本研究对于指导新城的选址与布局,优化老城内部风场,提升生态环境的宜居程度具有一定的指导意义^[21-22]。

1 研究方法和数据

1.1 研究方法

计算流体力学(CFD)数值模拟作为当前研究风场的有效手段之一,具有高效、直观、周期短、费用低等优势。随着计算模型的改进,其准确性也越来越高^[22-23]。本文运用 Fluent 14.0 来模拟不同地形格局的风场

特征和影响因素,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对地形模型进行 CFD 模拟计算。为排除其他地物因素的干扰,设定的模拟场景为旷野地带,地面风粗糙度指数为 0.16。计算域以目标地形(高度 H)为中心,半径 $5H$ 范围内为地形计算域。在来流方向上,地形计算域前方距离外场计算边界要大于 $2H$,后方距离外场边界要大于 $6H$ 。模拟工况设定模型入口 10 m 高速为 10 m/s ,并用指数方程描述气体入口界面的风速变化。通过对从不同地形坡度、形态和格局的模拟,能够分析地形的风场特点和影响因素。本文所选用的理想化的模型和模拟条件进行模拟,因为模型边界条件比较具体,和实际情况有一定的差异性,实际应用时要综合考虑边界和其他因素的干扰,不可一概而论^[24-30]。

1.2 不同地形的 CFD 模拟设定

1.2.1 不同坡度坡地的模型建立和模拟工况设定

坡度和风场的关系是研究地形风场的基础。为了分析坡度的影响,选择带状地形进行研究^[27-28]。本次主要研究坡地的风速、风向和风速加速比(坡地上同水平高度风速增减量和原始风速的比值)特征与坡度的关系。带状地形长远大于宽,当风向和地形垂直时,影响风场的主要因素是地形横剖面的坡度,所以,可用贝尔模型(Bell shaped)描述的简化二维地模型来表达地形,如图 1 所示。6 组模型的坡度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1,设定坡度为 0.7 时地形的高度为 200 m ,其他的坡度的高度随着地形坡度变化而变化。

1.2.2 单体山丘地形 3D 模型建立和模拟工况设定

单体山丘基本的形态有圆形,即“O”形,以及山脊向不同的方向延展而形成的“L”形、“U”形、“T”形和“I”形,这些基本形体能够概括自然界中大多数单体山丘。“O”形地形有些学者已经做了一些论述,“I”形山丘向两端延展,中部风场和带状坡地基本相似,本文不再两种地形进行模拟。

山丘地形按照不同的延展方向形成“L”、“U”和“T”形。通过 3D 软件建立地形模型,山顶垂直切面坡度设定为 0.5,其中“T”形地形的横向半坡坡度为 0.5。所有地形切面符合贝尔模型(Bell shaped),地形高度均为 18 m ,地形的长度和宽度如图 2—4。对“L”、“U”和“T”形地形的 3 个模型按照 0° 、 45° 、 90° 、 180° 、 225° 五个风向进行模拟,“L”地形增加 270° 的风向模拟。

1.2.3 组合地形 3D 模型建立和模拟工况设定

单个地形经变化组合后形成格局不同的地形地貌。其中最为典型并被历代城市选址采纳的最佳格局是“三面环山”环抱式地形格局,如图 5。参考诸多传统城市所选地形格局的山水关系描述后,确定地形格局模型并进行模拟。“三面环山”地形格局属于一种典型景观格局,尺度可大至千米,微至数十米^[31-32]。本次选择中观尺度进行模拟,地形南北长为 1800 m ,东西宽为 1350 m 。为了便于对比,陡坡和缓坡模型的平面格局完全相同。陡坡北山 A 高 200 m ,南面坡度为 0.5,北坡为 0.7,且满足地形北坡急,南坡缓的要求;东山 B 高 129 m ,坡度为 0.5;西山 E 高 120 m ,坡度为 0.5;南山高 80 m ,坡度均为 0.6,3D 模型如图 6 所示。缓坡地形北山 A 高 88 m ,南面坡度为 0.22,北坡为 0.3;东山 B 高度为 52 m ,坡度为 0.22;西山 C 高为 48 m ,坡度为 0.22。南山 F 高 32 m ,小丘 E 高 16 m ,坡度均为 0.24,3D 模型如图 7 所示。

对两组模型的北风- 360° 、西北风- 315° 、南风- 180° 、东南风- 135° 进行 4 次模拟,导出 1.5 m 行人高度 4 种风向的风场分布图和流线图,以及北风- 360° 和南风- 180° 的立面风场分布图和流线图,重叠后绘制出风场分布及流线图。

2 模拟结果与讨论

2.1 不同坡度坡地的风场 CFD 模拟结果和风场特点

Fluent 模拟结果如图 1,按照迎风坡和背风坡的风场的模拟结果,以及背风坡有无明显的回流涡旋,将坡地分为陡坡($H/2L_1 > 0.5$)、中坡($H/2L_1 = 0.3—0.5$)和缓坡($H/2L_1 \leq 0.3$)三类。迎风坡分山脚、山腰和山顶 3 段,背风坡分山腰到山脚和山脚顺向延伸段 2 段,根据模拟结果绘制示意图,如图 8 和图 9,风场规律如下:

陡坡和中坡的迎风坡段近地面风速在山脚段减小,加速比为负数,坡度越大、沿坡地上升风速减小越明

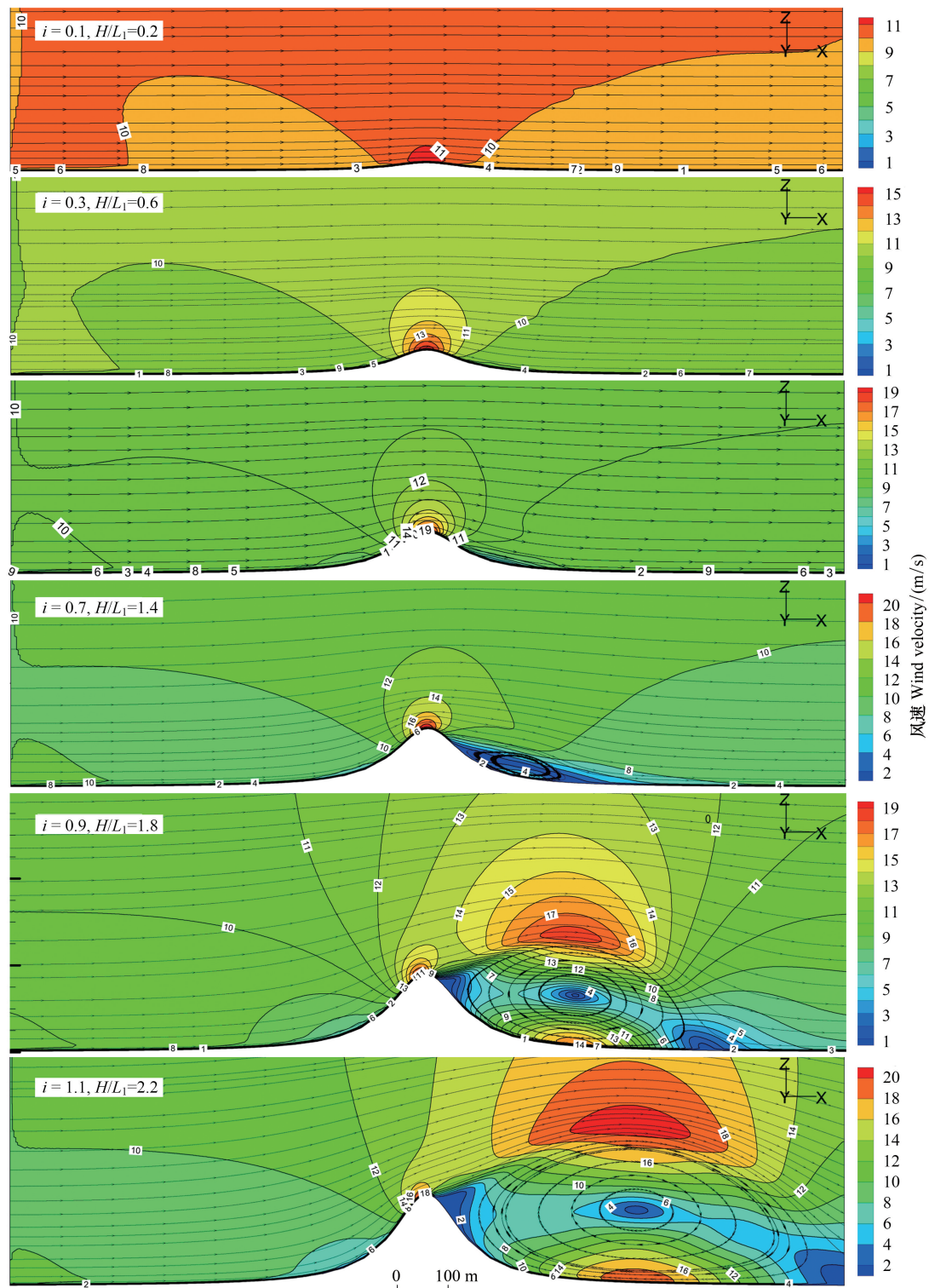


图1 不同坡度地形的风场特点

Fig.1 The wind field characteristics of different topographical slopes

H : 山顶到地面的高度, L_1 : 山顶到山坡一半高度处的水平距离, H/L_1 : 高宽比, i : 坡度

显;山腰段风速逐渐增加,在进入山顶端之前趋于相等,此时加速比仍为负数并减小至零,坡度越大加速比为零的位置越靠近坡顶。到山顶部分后近地面风速激增,平均风加速比达到最大值。过山顶后背风面有一个风

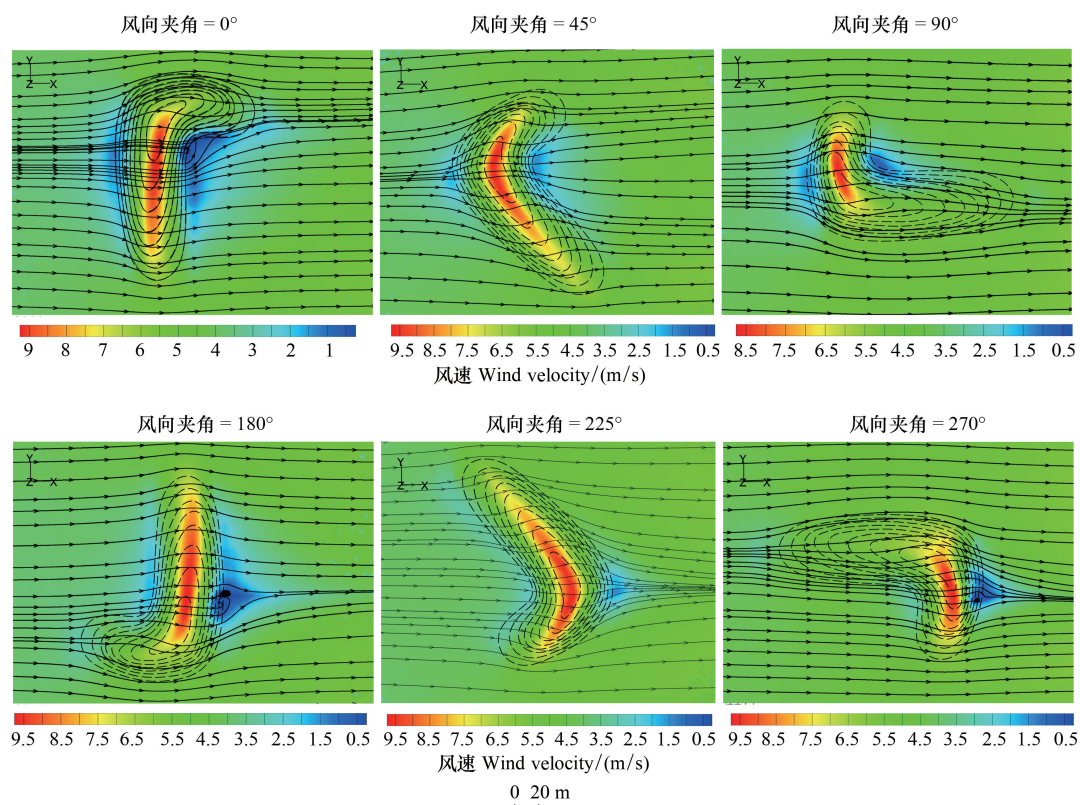


图2 “L”形山体 1.5 m 高风场流线图

Fig.2 U-shape terrain's wind streamlines at the height of 1.5m above the ground

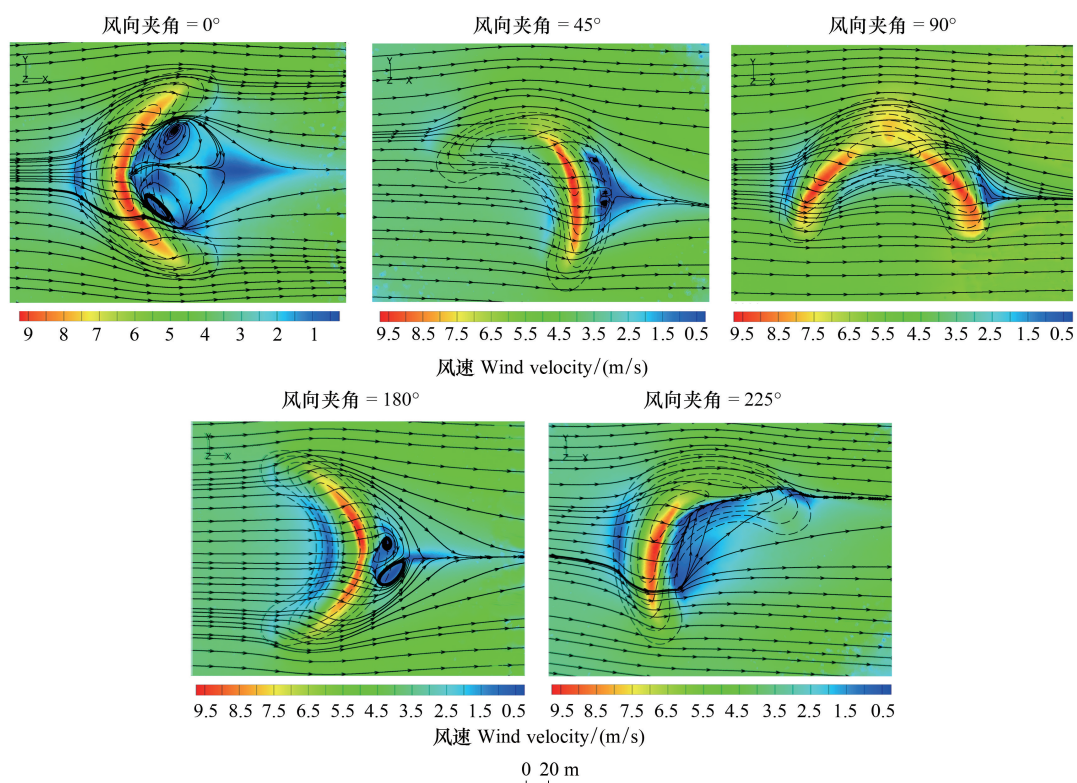


图3 “U”形山体 1.5 m 高度风场流线图

Fig.3 L-shape terrain's wind streamlines at the height of 1.5 m above the ground

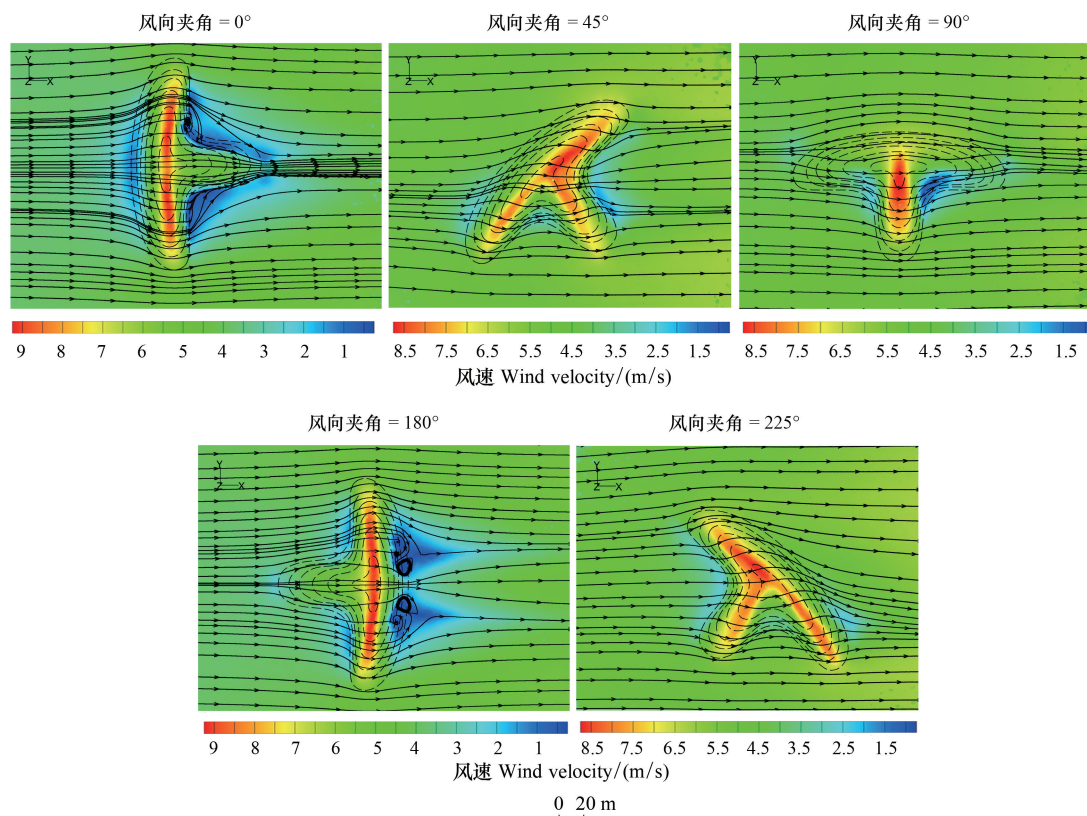


图4 “T”形山体 1.5 m 高风场流线图

Fig.4 T-shape terrain's wind streamlines at the height of 1.5 m above the ground

速减小区域,随后进入回流涡旋区,最后进入尾流区。回流涡旋区近地面风速先增大,到山脚后逐渐减少,至山脚后方尾流区后逐渐趋于正常。背风坡形成了明显的回流涡旋(又称转子气流),回流涡旋的中心大致位于山脚的上方,近地面附近出现了逆向风,高空为顺向风。回流涡旋主要受到坡地坡度的影响,同样的坡度,坡高越高,后方的影响也越大,山脚后方的尾流也更强。回流涡旋后方气流下潜和地面气流辐合,最后逐渐趋于正常,如图8。

当坡度为0.3—0.5时,背风坡的回流涡旋并不明显,风速从山腰到山脚处逐渐变小。当坡度大于0.5时,背风面才会有小面积的回流区出现。通过模拟结果可知,坡度0.5可以作为回流涡旋是否明显的分界点。

坡度小于0.3的缓坡,风场的特点与陡坡和中坡有所不同。迎风坡和背风坡的风速基本沿着山顶呈轴线对称分布,迎风坡的风速增长规律与陡坡和中坡相似,但由于山体的遮挡效应,背风坡风速略小于同等高度的迎风坡。由于坡度较缓,风速在迎风坡呈递增趋势;背风段没有回流涡旋,到山脚处风速减小,并趋于正常风速,如图9。

2.2 单体山丘地形风场 CFD 模拟结果和风场特点

根据模拟结果输出“L”、“U”和“T”形山丘地形 1.5 m 高风场流线图,结果如图2—4,其中:

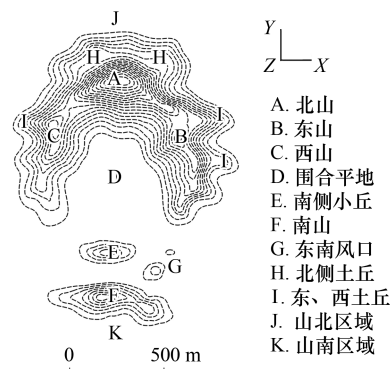


图5 模拟地形的平面格局示意图

Fig.5 Plane pattern of simulated terrain

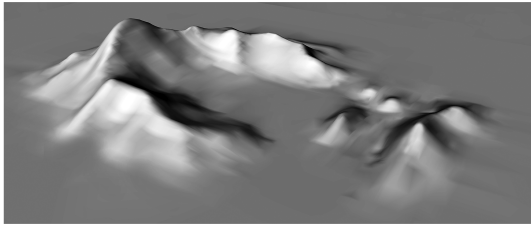


图 6 陡坡地形模型

Fig.6 Terrain model on steep slope

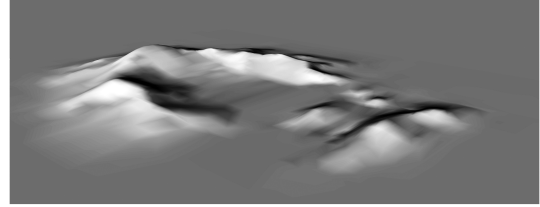


图 7 缓坡地形模型

Fig.7 Terrain model on gentle slope

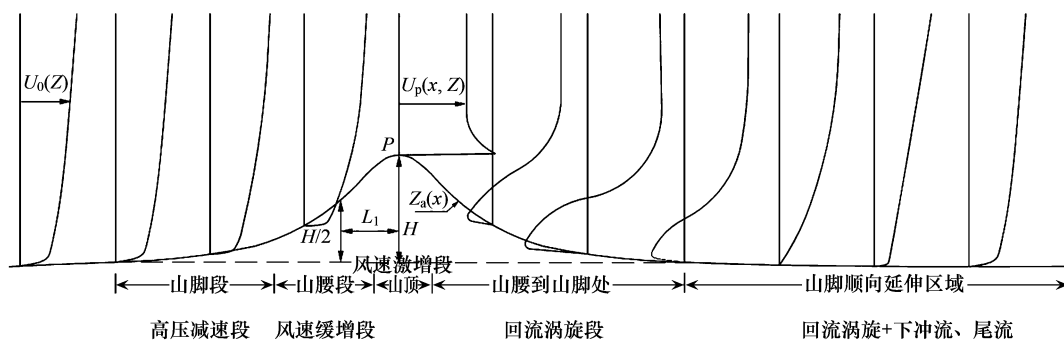


图 8 陡坡、中坡风廓线示意图

Fig.8 Steep and moderate slopes' wind profile diagram

H : 山顶到地面的高度, L_1 : 山顶到山坡一半高度处的水平距离, H/L_1 : 高宽比 P : 山顶

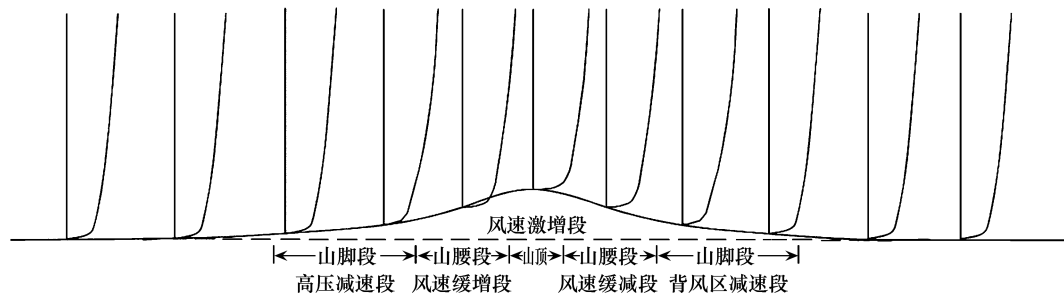


图 9 缓坡风廓线示意图

Fig.9 Gentle slope's wind profile diagram

(1) “L”、“U”和“T”形山丘地形从山前滞留区到山顶再到背风坡风影区整个剖面,风速增大的方式和带状坡地相似。迎风坡风速先减小后增加,但风速减小或增加比同等高度和坡度的带状坡地缓慢。山顶部分风速激增,但比带状坡地山顶风速增加程度小。背风坡的风速从山顶到山底不断下降,且降速的绝对值要大于迎风坡从山顶到山底降速的绝对值,即同高度的背风坡风速要小于迎风坡。

(2) “L”、“U”和“T”形山丘地形的山脊部分风场和“O”形山丘类似,在山丘两个侧翼山脊处,由于山脊的阻滞作用风速激增,但山脊位置的平均风加速比不及山顶;山脊风速从山顶到山脚逐渐下降,且下降速度比迎风坡和背风坡慢。山脊和风向所成夹角越小,则山脊风速增加越小。

(3) “L”、“U”、“T”形山丘地形的风场和垂直于风向的地形截面变化率有关。迎风面垂直风向截面变化程度越大,对气流阻滞越大;背风面截面变化程度越大,风速、风压风速变化越快,风影区和回流涡旋越大,挡

风效果也越明显。如图 2 和图 4,当风向夹角为 0° 和 180° 时“L”和“T”形地形后部的风影区比较明显。

(4) 山丘地形风场和地形流线形态以及风向夹角有关。如图 3,当风向夹角为 0° 和 225° 时,气流顺着“凹”地形两翼向外导风,则内部的风影区较大,很容易形成风影区和回流涡旋,形成相对静风的环境;而风向夹角为 45° 和 180° 时,“凹”形地形向迎风面和背风面向内侧导风,则迎风面形成的滞留区和背风面风影区均较小。

3 组合地形格局的风场 CFD 模拟结果和风场特点

根据地形 CFD 模拟导出的平面和立面风场模拟图 10—17 可以发现,该地形所形成的风场和地形格局有着极其密切的关系:

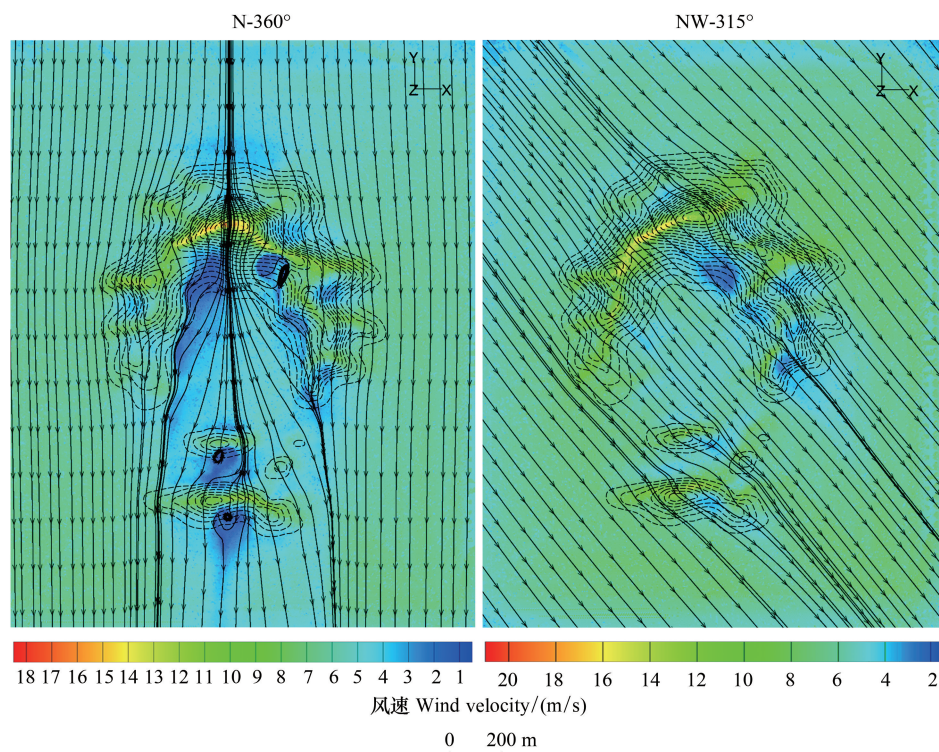


图 10 陡坡北风、西北风风场分布及流线图

Fig.10 Wind field distribution on deep slope (N-360°, NW-315°)

(1) 不同地形格局能够改变风场的分布。如图 10 左图,地形格局对北风- 360° 阻挡效果最为明显,北风越过山顶后,北山 A 后方两侧形成很小的平面涡旋;气流流线向东山 C、西山 B 两边偏斜,地形内部 D 处出现了大面积风速小于 2 m/s 的静微风区域;地形对西北风- 275° 也具有一定的挡风效果,在地形内部 D 处的风速有所减小,在北山 A 的南山麓也形成明显的风影区和很小的涡旋,但是风力削弱程度和区域均不如正北风。因此可以看出,背风面内凹,北山高陡,两翼地形适度延长的格局有利于形成静微风的小环境。

(2) 不同的风向下,相同地形格局的风场表现不同。如图 10 和图 11,陡坡地形能够有效的遮挡北向和西北向的寒风,但对南风- 180° 和东南风- 135° 的气流阻碍较小,有利于夏季通风,提高夏季的风感舒适度。因此,朝向对风场影响很大。

(3) 如图 10、11 和 14、15 对比可知,风场受地形坡度的影响;陡坡地形的挡风效果显然优于缓坡地形,缓坡的通风效果优于陡坡地形。从缓坡模拟的图 14—17 来看,同样的地形格局,坡度低于 0.3 的缓坡地形基本不具备挡风功能。

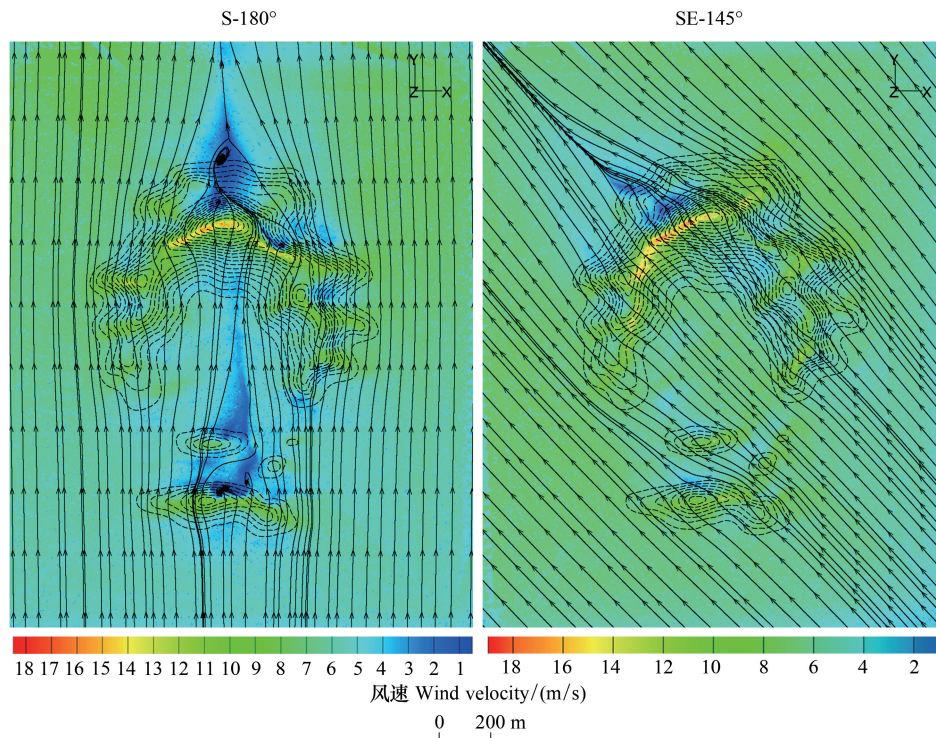


图 11 陡坡南风、东南风风场分布及流线图

Fig.11 Wind field distribution on deep slope (S-180°, SE-145°)

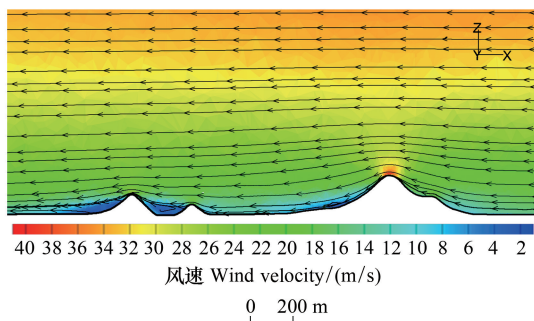


图 12 陡坡立面风场分布及流线图(北向-360°)

Fig.12 Vertical wind distribution on deep slope (N-360°)

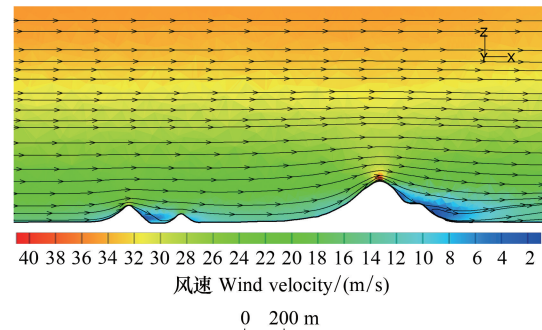


图 13 陡坡立面风场分布及流线图(南向-180°)

Fig.13 Vertical wind distribution on deep slope (S-180°)

(4)不同的地形格局中,各组成部分的地形形态对风场影响较大。北山 A 的北坡急、南坡缓,对于减小南坡回流漩涡和减低地形内部 D 处风速有一定的作用。如图 12,北山 A 北坡为 0.7,陡坡对北风的形成了有效的阻挡,行人高度形成了静微风。而南坡坡度为 0.5,平面上形成了小的涡旋,在垂直方向上并未形成回旋气流。地形南部 E、F 山为陡坡地形,南风 and 东南风时,山后的风影区仍然对地形内部 D 处产生了一定影响,如图 13;若坡度较缓,地形内部 D 处的风速和外来风速相近,基本不受影响,如图 17。因此地形南部 E、F 山圆润、低平的形态能够减少对南风和东南风的阻挡,有利于气流导入。

4 基于地形风场规律的风感规划对策

4.1 地形的风感敏感区的规划对策

风感规划首先要识别风感敏感区。不同的地形所形成风速激增区、回流涡旋区、无固定风向强烈湍流区、

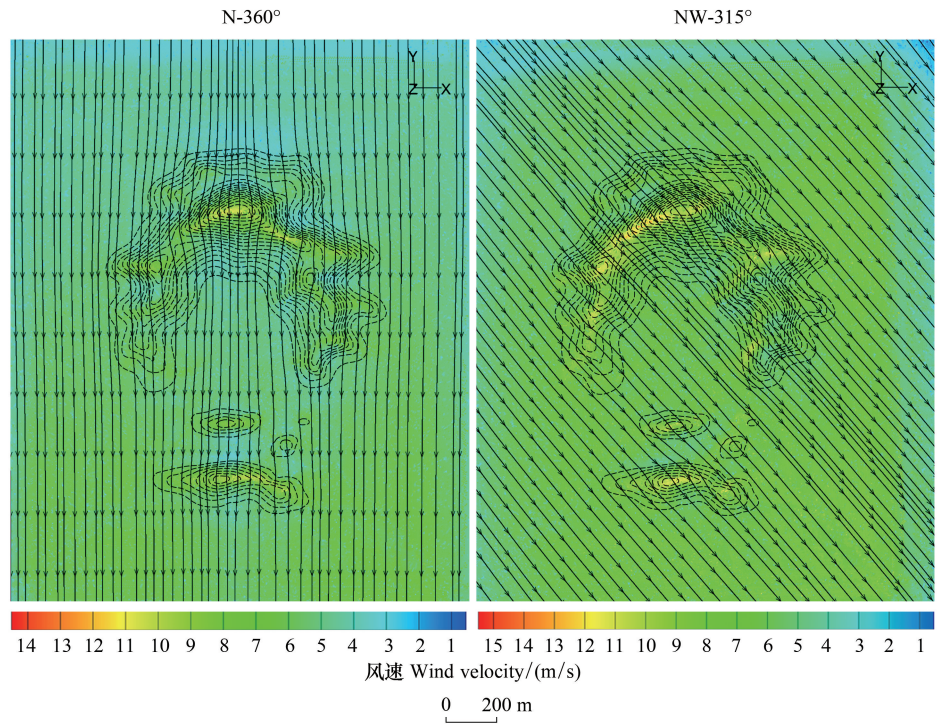


图 14 缓坡北风、西北风风场分布及流线图

Fig.14 Wind field distribution on gentle slope (N-360° , NW-315°)

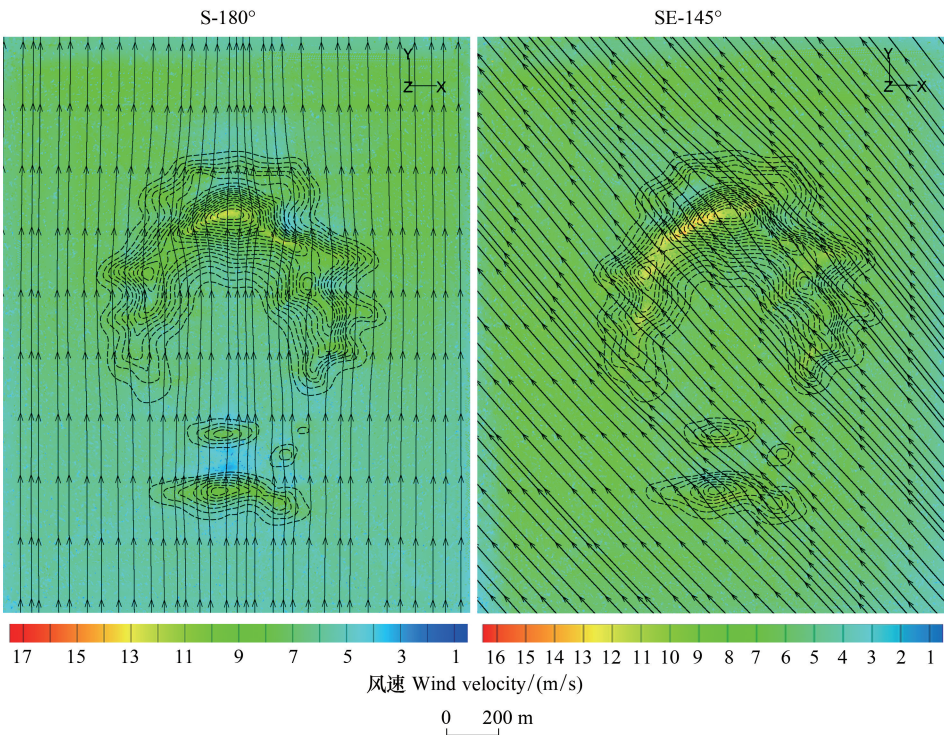


图 15 缓坡南风、东南风风场分布及流线图

Fig.15 Wind field distribution on gentle slope (S-180° , SE-145°)

气流不流通的静风区或气流死循环涡旋区都是风感较差的敏感区域。总体而言,风感规划应该避开风感敏感区,或者对风感敏感区进行风场改造,以提高风感的适应性。坡度 0.5 以上的山顶和山脊处,风速增大为同等高度风速的 2—5 倍;坡度大于 0.7 的地形背风坡山脚段形成回流涡旋容易使孤立的树木或者建筑受气流剪力而折断,近地面行人高度处容易产生的回流激风,舒适度较差;顺风向山谷、山体鞍部的所形成“狭管效应”,风速均增大为原来的数倍,影响风感舒适度。在风感规划中应避开风速激增区,且在回流涡旋区避免规划细、高的树木和构筑物。

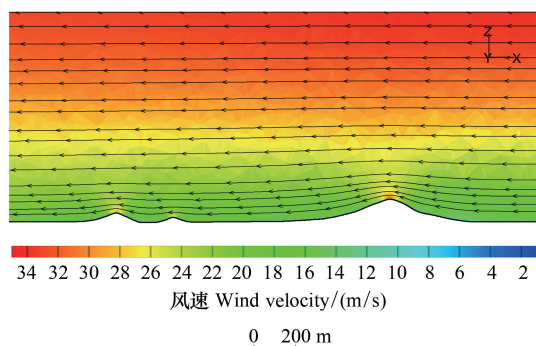


图 16 缓坡立面风场分布及流线图(北风-360°)

Fig.16 Vertical wind distribution on gentle slope (N-360°)

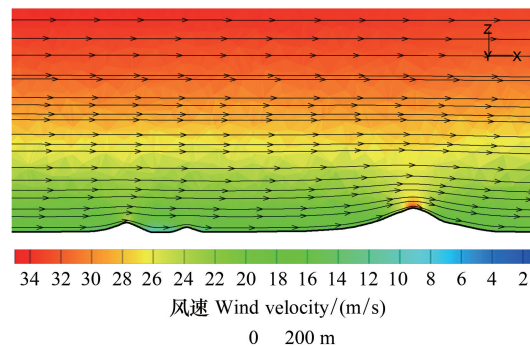


图 17 缓坡立面风场分布及流线图(南风-180°)

Fig.17 Vertical wind distribution on gentle slope (S-180°)

其次,地形背风面风影区风速极小,尤其是垂直于风向的山谷带或者宽高比较小的盆地内容易出现气流不流通的静风区或者气流死循环涡旋区,空气置换能力差,这些静风区或者风速过低区域也属于风感敏感区。在风感规划时应该保持避免设置能够产生过长风影的构筑物,降低地面粗糙度。除此之外,因地形复杂变化而形成的无固定风向的湍流也影响风感舒适度,选址时也需要予以排除。

4.2 不同气候区的风感规划对策

除上述地形的风感敏感区域应避开外,大部分地形的风速比不大,风感敏感程度不高,应根据一定的气候类型选址或者进行地形的营造。

南方夏热冬暖的湿热地区,提高风速能够改善湿热环境。坡度小于 0.5,缓和圆润、布局分散且顺风向呈流线状的地形能够减少气流阻力加强通风。北方严寒地区或寒冷地区,适当降低风速能够改善风感。地形垂直于风向方向延展,并和两翼地形形成三面围合的“凹”缺地形,地形内部风速较低。地形背风面垂直风向截面变化率越大,风影区越大。迎风面应急,坡度尽可能大于 0.7;背风面应缓,坡度应小于 0.5,尽可能缓和,且能够在背风面降低风速且减小回流涡旋。同时,为避免强风,应选址在迎风坡的山腰以下,尤其是陡坡的风速在山腰段略微减小;背风坡形成的回流涡旋的空气置换略少,且风速增加不大,容易形成温暖小环境。除此之外,垂直风向的前后地形的宽高比较小的盆地、山谷或者其他组合地形格局的内部能形成较小的风速。夏热冬冷地区,冬季应利用地形挡风,相地选址、地形形态塑造和地形布局参照北方寒冷地区;夏季应保证通风,则地形处理应参照南方夏季炎热地区。

本文仅对风感中的风速、风向进行详细论述,而未对风感中的气流所携带的气味、颗粒物、湿度和声源等因素进行讨论,在实际应用时应综合考虑。如现代城市雾霾严重,和古代城市相比制约城市风感的主要因素并非风速和温度,而是空气质量。城市若要获得良好的风感,应提高整体风速以促进雾霾扩散和稀释。盆地、谷地或者三面环山的地形产生的静微风场,反而在一定程度上影响了通风,加剧空气恶化。

5 结论

地形的风场规律和风感敏感区分布特征对于快速识别地形风场,并指导城市生态规划和提升城市生态系

统服务功能具有积极的意义,在无法进行计算机 CFD 模拟时,对风场的特点判断和预估对于风感规划来说尤其重要。

在城市规划选址和内部微地形塑造时,要综合考虑地形的坡度、形态和格局的影响,从而优化城市风场和小气候。地形坡度是影响通风的主要因素之一,与绝对高度无关,坡度在 0.5 以下缓坡挡风作用较弱,尤其是坡度在 0.3 以下对风场影响较小;当坡度大于 0.5 时,随坡度增大背风坡风影区逐渐增大,挡风效果更加明显;坡度大于 0.7 时,回流涡旋逐渐变得越来越明显。不同的山丘地形的风场,从迎风坡到背风坡风速的变化规律和坡地基本相同,山顶和山脊都会出现风速激增区域,但风速加速比不如坡地。山丘地形的风场变化与垂直于风向的地形截面变化和流线形态有关。迎风面截面变化率越大,对气流阻滞越大;背风面截面变化越大,风速、风压风速变化越快,风影区和回流涡旋越大,挡风效果越明显。地形顺风向流线越流畅,对风的阻滞越小,反之越大;流线方向对气流的导向也会影响风场变化。地形格局除受到地形和坡度影响外,还受到布局影响,垂直于风向的前后地形的宽高比和地形围合程度是影响地形风场的主要因素。前后地形垂直于风向的宽高比越小,地形的围合度越大,地形内部风场越稳定,受到外部气流影响越小;反之越大。

为提升城市生态系统的服务功能,优化城市风感,应避开地形中风感敏感区,即风速激增区、回流涡旋区、无固定风向的强烈湍流区、气流不流通的静风区和气流死循环涡旋区等风感敏感区,并利用植被或者人工构筑物来消除敏感区或削弱这一影响。根据城市气候类型选择或塑造不同的地形格局,通过改善风感来适应不同的温、湿度环境;若要加强通风则应选择低坡度、平行风向的流线型地形和开放型地形格局,若要减小风速,应选择或塑造垂直风向的陡坡地形和封闭性的地形格局。

参考文献 (References):

- [1] Zhao J Z, Liu X, Dons R C, Shao G F. Landsenses ecology and ecological planning toward sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 293-297.
- [2] Dong R C, Liu X, Liu M L, Feng Q Y, Su X D, Wu G. Landsenses ecological planning for the Xianghe Segment of China's Grand Canal. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 298-304.
- [3] 石龙宇, 赵会兵, 郑拴宁, 于天舒, 董仁才. 城乡交错带景感生态规划的基本思路与实现. *生态学报*, 2017, 37(6): 2126-2133.
- [4] Shao J, Qiu Q, Qian Y, Tang L. Optimal visual perception in land-use planning and design based on landsenses ecology. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(3): 233-239.
- [5] 王凯, 梁红, 施鹏, 赵鸣. 基于“风感”的紧凑型城市开放空间风环境实测和 CFD 模拟对比研究. *生态学报*, 2019, 39(16): 6051-6057.
- [6] 刘姝宇, 余波, 宋代风, 王绍森, 吴滨. 基于气候分析的城市通风系统构建方法初探——以厦门市为例. *城市建筑*, 2019, 16(13): 61-66.
- [7] 张弘驰, 唐建, 郭飞, 路晓东. 基于通风廊道的高密度历史街区热岛缓解策略. *建筑学报*, 2020(S1): 17-21.
- [8] Ghiaus C, Allard F, Santamouris M. Urban environment influence on natural ventilation potential original research. *Building and Environment*, 2006, 34(6): 549-561.
- [9] 张明, 胡耘, 徐静馨, 杭建, 李娟, 田文鑫, 赵秀勇. 关于加强城市风环境规划研究的思考. *中国环境管理*, 2019, 11(04): 119-123.
- [10] 唐立娜, 李竞, 邱全毅, 石龙宇, 王宏伟, 郑拴宁. 景感生态学方法与实践综述. *生态学报*, 2020, v.40(22): 7-13.
- [11] 荣月静, 严岩, 赵春黎, 朱婕缘, 郑天晨, 王辰星, 卢慧婷, 章文. 基于生态系统服务供需的景感尺度特征分析和应用. *生态学报*, 2020, v.40(22): 26-35.
- [12] 祁文莎, 郭青海, 洪艳. 基于生态系统服务层级关联性的景感营造实现途径. *生态学报*, 2020, v.40(22): 95-103.
- [13] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
- [14] 陈平. 地形对山地丘陵风场影响的数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [15] 丁鑫. 山地地形下低矮屋面风荷载数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [16] 李鑫. 山地地形的近地风场特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [17] 冯雨飞. 与风环境相协同的山地住区空间布局研究——以遵义市美食村山地住区为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [18] Zhu X Q, Weng J T, Wu Y Q, Gao W J, Wang Z. Wind suitability in site analysis of coastal concave terrains using computational fluid dynamics simulation: a case study in East Asia. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2017, 18(9): 741-756.
- [19] 张希斌. 考虑复杂风环境影响的山地地形 CFD 数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.

- [20] 裘国平, 章俊岫, 杨振文, 孙易吟. 基于计算流体力学技术的大尺度复杂地形山区风环境模拟——以石溪乡为例. 小城镇建设, 2019, 37(3): 63-70.
- [21] 余庄, 张辉. 城市规划 CFD 模拟设计的数字化研究. 城市规划, 2007(06): 52-55.
- [22] 蒋立辉, 李海良. 基于 CFD 不平坦地形对风的影响. 科技视界, 2016(21): 264-265.
- [23] 赵永锋, 康顺, 梁思超. 复杂地形风场 CFD 模拟计算域的讨论. 太阳能学报, 2015, 36(02): 355-361.
- [24] 王旭, 孙炳楠, 陈勇, 楼文娟. 基于 CFD 的住宅小区风环境研究. 土木建筑工程信息技术, 2009, 1(1): 35-39.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50009—2012 建筑结构荷载规范. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [26] Zhang W J, Qi J, Li X. CFD simulation for urban environment planning//Proceedings of 2009 International Conference on Management and Service Science. Beijing, China; IEEE, 2009: 1-4.
- [27] 程雪玲, 胡非, 曾庆存. 复杂地形风场的精细数值模拟. 气候与环境研究, 2015, 20(01): 1-10.
- [28] Stathopoulos T. Computational wind engineering: past achievements and future challenges. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67-68: 509-532.
- [29] Lun Y F, Mochida A, Murakami S, Yoshino H, Shirasawa T. Numerical simulation of flow over topographic features by revised k- ϵ models. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 231-245.
- [30] 梁思超, 张晓东, 康顺. 复杂地形风场绕流数值模拟方法. 工程热物理学报, 2011, 32(06): 945-948.
- [31] 闫水玉, 裴雯. 中国古代都城营建中的生态智慧及其现代启示——隋唐长安、宋代临安、明清北京的实证研究. 国际城市规划, 2017, 32(04): 40-47.
- [32] 曾忠忠, 李保峰. 基于气候适应性的中国古代城市形态研究. 华中建筑, 2014, 32(07): 15-20.