文章编号:1674-7070(2010)02-0155-07

非均匀下垫面大气边界层研究进展

洪雯[1,2]　王毅勇[1]

摘要

总结了水平非均匀下垫面的大气边界层研究,指出干旱区的绿洲具有明显的"冷湿岛效应",并可形成边缘逆湿和区域环流,而植被和水域的分布则显著改变了大气边界层结构. 阐述了复杂地形下垫面对局地风场和小尺度环流产生的影响、城市热岛效应的产生及特点和城市中绿地和水体的微气候效应. 比较分析了不同陆面参数化方案以及边界层气候模式,提出未来在热力与动力非均匀的结合、湿地下垫面的数值模拟、城市复杂下垫面参数化以及气候模式的耦合等方面尚需进行深入的研究.

关键词

大气边界层;非均匀下垫面;数值模拟

中图分类号 TH71;TG803

文献标志码 A

收稿日期 2009-11-30

基金项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-425);国家自然科学基金项目(40971026)

作者简介

洪雯,女,博士生,主要研究方向为湿地气候效应数值模拟. platypus11. 11@163. com

王毅勇(通讯作者),男,1990 年本科毕业于南京气象学院气象系气候学专业,博士,研究员,主要从事湿地气候及农业气象研究. wangyiyong@neigae.ac.cn

1 中国科学院 东北地理与农业生态研究所,长春,130012

2 中国科学院研究生院,北京,100049

0 引言

Introduction

距地表 1 ~ 2 km 的大气边界层,不仅是生物赖以生存的主要空间,也是地球大气动量、热量和各种物质上下输送的重要通道. 全球变化的影响、地表性质的改变以及人类活动对气候的反馈,都是通过大气边界层过程实现的. 大气边界层物理过程与下垫面物理性质联系紧密,地表下垫面作为大气唯一的物理边界,在不同时空尺度上影响着大气运动状态和气候变化.

定常水平、均匀平坦地形上的近地层问题在相似理论的指引下已得到较好解决. 然而这种理想的均匀下垫面边界层,是对自然界真实大气最粗略的近似,实际地表的边界层结构和物理过程显然要比均匀下垫面上的复杂得多. 由下垫面非均匀引起的边界层结构变化决定了空间上感热、潜热和水汽通量的改变,进而改变边界层大气的物理过程[1]. 因此,20 世纪 80 年代以来,非均匀地表条件下的大气边界层受到越来越多的关注,大气边界层的研究重点也转向非均匀、非定常的边界层. 综观近年来国内外非均匀下垫面大气边界层研究,其研究领域主要集中在水平地表性质非均匀、复杂起伏地形和城市下垫面边界层,研究方法则侧重于陆面过程参数化和数值模拟及预测等方面.

1 水平非均匀下垫面边界层

The level heterogeneous underlying surface boundary layer

1.1 地表植被的气候效应

地表植被条件作为下垫面最重要的物理特征,密切影响着大气边界层物理过程. 植被能够增加地面摩擦、减小风速、阻止地表沙粒的运动和沙丘的起伏,因而能够有效的防止沙漠化扩展[2],而粗糙度更大的森林下垫面对大气边界层的影响可达 800 m 左右的高度[3]. 下垫面越粗糙,对湍流能量贡献最大的涡的水平尺度越小,湍流的各向同性也越难满足,这是植被对涡的破碎作用的结果[4],因此植被覆盖率是决定森林下垫面边界层结构和局地气候效应的最主要因素之一[5].

地表植被覆盖的变化通过改变地-气系统能量平衡影响区域气候[6]. 地面植被变化可显著改变地表通量和 Bowen 比,进而导致大气

湿静力能分布的变化,使大气层结及垂直运动发生相应改变,这将进一步影响大气的水汽输送,并与相应的垂直运动变化结合最终导致降水的变化[7]. 近50 a的气象分析资料表明随植被覆盖率的减小,黄河源区的气温升高,年降水量减少[8]. 而三北防护林的建立,则显著地改变了地表粗糙度,降低了近地层风速,增加了空气湿度和降水,使我国北方地区气候得以明显改善[9]. 此外,植被退化后还会激发局地热力环流,从而影响区域大气运动[10].

1.1.1 *干旱区绿洲冷湿岛效应及逆湿现象*

在干旱半干旱地区,由于绿洲与荒漠下垫面土壤、植被分布特征的不同,导致动力、热力及能量收支平衡的差异,形成了一种独特的区域小气候特征——"绿洲效应".

荒漠中的绿洲具有明显的冷湿岛效应,表现为绿洲区比荒漠区大气环境温度低、湿度高、湍流动能输送弱,同时在邻近绿洲的荒漠近地层会出现"逆湿"[11]. 早在1987年苏从先等[12]提出绿洲"冷岛效应"后[12],围绕绿洲-荒漠方面的大型野外观测实验陆续展开,如HEIFE、GAME/Tibet、DHEX等,并取得了一定的研究成果. "绿洲效应"可使绿洲上空形成冷湿气柱,而绿洲之间的荒漠则产生相应的"暖干效应",两种效应相互作用产生的绿洲-荒漠局地环流形成了绿洲上空稳定的逆温层结构,从而使"冷湿效应"进一步增强[13]. 研究表明13:00是绿洲冷岛效应最明显的时刻,且周围荒漠的近地层"逆湿"主要集中在150 m以下高度[14].

这种冷湿岛效应与绿洲的水平尺度、地表湿度和植被布局等方面有密切联系,并决定着绿洲的维持与发展,过小的水平尺度将导致过大的感热平流和过强的蒸发以及相应的水资源消耗,从而导致绿洲难以维持并最终消失. 文献[15]基于耗散结构理论提出了绿洲的最小临界尺度,刘树华等[16]认为15~25 km的绿洲"冷湿岛效应"最明显,其存活性也最强,胡隐樵等[17]也得出基本一致的结论. 下垫面土壤湿度的变化可显著改变地-气间能量平衡及水循环速率,绿洲边界层高度随土壤湿度的增加逐渐降低,使能量与水分保存在贴地层内,促进绿洲的进一步维持与发展[18-19]. 研究表明在绿州中心位置布置林区,林区周围种植农田,最外围布置窄防护林带这种植被格局方式较有益于绿洲自身的维持和发展,其中最适宜的植被覆盖度以60%为宜[16].

1.1.2 *干旱区绿洲-荒漠环流*

由于绿洲-荒漠下垫面的不同水热特性使荒漠白天升温和夜间降温都快于绿洲,这种非均匀热力作用导致绿洲风环流的产生. 大量观测和模拟实验都已证实绿洲-荒漠环流的存在:已观测到绿洲低层存在风的流出,高层存在风的流入,并且绿洲上空还有空气的下沉运动;中尺度风场的模拟可清楚看到荒漠上空的上升气流和绿洲上空的下沉气流,以及在荒漠和绿洲上空都明显存在湍流动能中心[14]. 环流的发生和发展直接依赖于非均匀下垫面热力场的差异,理想的绿洲冷岛形成时,平流场较小,易形成以绿洲为中心的垂直环流[20]. 而在有较强风力的条件下,绿洲向四周辐散的风场不易形成,且冷中心会被环境风场吹离绿洲[21].

1.2 水域和湿地气候效应

在水域或湿地近地层,也会形成与绿洲冷湿岛类似的气候效应. 有研究表明,夜间水域上空近地层气温和比湿都比陆地高,水平风辐合;而白天水域上空气温和比湿都比陆地低,水平风辐散. 水域上空湍流动能较之陆地上空小,影响了水域上空水汽的湍流扩散,从而形成湿岛[22]. 湿地是由水陆交互作用形成的界于陆地和水体之间过渡性质的生态系统,它独特的生态系统功能已得到越来越多的重视[23]. 近年来在三江平原地区围绕湿地的冷湿效应已有一些研究:已证实湿地特别是面积较大的湿地具有比较明显的"冷湿气候效应"[24-25],且其影响程度与积水深度、湿地植被类型及植被组合类型密切相关[26]. 观测资料表明,常年积水较深的漂筏苔草-毛果苔草群落地表平均温度低于相邻农田平均地温近5 ℃[27].

2 复杂地形下垫面边界层

The underlying surface boundary layer with the complex terrain

较大地形起伏的复杂下垫面,不但直接影响太阳辐射的日变化特征,进而影响到区域水热平衡,还对区域风场有直接的强迫作用,形成因地形作用引起的热量、物质输送,这些都对区域气候产生重要影响. 从大气动力学角度已证实小尺度深凹地形(深凹露天矿)大气边界层内存在一种封闭的小尺度环流系统——复环流,它也是造成矿区内高污染的重要机制[28]. 气流过山引起的地形波模拟研究表明,当大气边界层是对流边界层时,气流过山引起的地形强迫仍能在上部稳定层结中造成足够的垂直扰动,产生向上传播的重力内波[29]. 而地形阻挡会造成山

后湍流强于山前,使近地面温度梯度和感热支出小,最终导致山后温度明显比山前高;并且随山丘高度的增加,这种现象更加明显[30].将地形作用和地表植被相关联对盆地绿洲环流进行模拟,结果表明绿洲的水汽输送通过盆地地形的下沉气流得到加大,其气候效应也因此得以增强[11].

3 城市边界层研究
Study of urban boundary layer

城市复杂的道路与建筑结构形成了特殊的非均匀下垫面,城市化发展则更加剧了此类非均匀性.

3.1 城市热岛效应

城市"热岛效应"表现为相对于周围郊区和乡村,城市近地层大气更加干燥,气温也较高,同时形成一定尺度上的热岛环流.由于城市地面以混凝土为主,植被少,不透水面积大,贮藏水分的能力差,蒸发(蒸腾)量也较小,感热通量明显大于潜热通量,导致地表温度比乡村高.此外,城市的湍流动能比乡村大,而且在日出后增长迅速.这与下垫面的热、动力学性质密切相关,城市下垫面的粗糙度大,感热通量的增大使得湍流运动比乡村剧烈,导致城市的混合层高度全天均大于乡村[31].有研究预测纽约城的扩张将导致午后近地层气温至少增加 0.6 ℃,比湿减少 0.6 g/kg,边界层高度增加 150 m[32].

人为热也是造成城市热岛的主要原因,比如汽车尾气排放、工业生产的能源消耗以及城市建筑物的各种能量消耗(如城市居民冬季采暖和夏季空调制冷)等[33].研究表明人为热可使费城冬季夜间气温升高 2~3 ℃,同时对大气边界层的结构和稳定性也有所影响[34];而人为热对北京市中心升温的贡献,白天为 0.5 ℃左右,夜间约为 1~3 ℃[35],且人为热源的影响在夜间和冬季相对较大.

3.2 城市内绿地和水域的微气候效应

地表反照率、植被的高度、种类和覆盖率以及天气状况等均是决定城市近地表热环境结构的重要因素.城市的高温中心位于建筑物密集、热存储量大的中心区,而面积较大的公园、绿地和水域则表现为城市中的"冷湿岛"[36].白天城市下垫面温度从高到低依次是工业区、商业区、机场、居住区和公园绿地;夜间温度顺序则变为商业区、居住区、公园绿地、工业区和机场[37].研究表明增加植被可在一定程度上改善城市热环境.当 40% 的城市地表改变为落叶林时,地表温度和风速都显著下降[38];市区内植被和水体的微气候效应可明显改善城市气候环境[39],在 10%~15% 的绿地覆盖率条件下,同等面积的灌木比乔木更有益于降低室外气温;而屋顶绿化不失为一种改善城市热环境的好方法[40].因而合理的城市布局规划能够减轻热岛效应的不良影响.

4 陆面过程参数化研究
Research on parameterization of the land surface process

非均匀问题从一开始就是与陆面过程参数化研究共存的问题.陆面过程是指发生在地表与大气间水分、热量、动量及 CO_2 等物质的交换过程,包括地面上的热力过程、水文过程和生物过程,地气间的能量和物质交换以及地面以下土壤中的热传导和水热输送过程.交换过程与大气边界层过程耦合,进而实现自由大气和低层大气间的能量和物质交换,直接影响着大气边界层和区域气候的形成[11].近地面层时刻进行的两个基本交换过程(水的循环和热能的传送)直接影响着局地气候和环境生态系统,只有对它们的各个物理特征进行细致研究,才能清楚认识区域气候效应的形成机理.因此,陆面过程的参数化研究对非均匀下垫面边界层的模拟和预测具有重要意义.继 1978 年 Deardorff[41] 提出地-气相互作用参数化之后,生物-大气圈 BATS 模式和简单生物圈 SiB 模式逐步发展起来[42-43],这些陆面过程的核心问题,为土壤-植被-大气连续体物质和能量交换数值模式的建立奠定了基础.

鉴于干旱区气候的特殊性,国内许多学者在改进和发展适用于我国西北干旱区的气候模型和陆面参数化方面做了很多工作.左洪超等[44]认为陆面过程参数化的关键之一是如何正确描述大气水、地表水、土壤水、地下水和植物水之间的转化规律,因而将陆面模式分为两层,以准确描述荒漠近地表水分转化受蒸发源和逆湿源两个水汽源强迫的过程.胡隐樵等[17]利用大气线性热力学理论探讨了非均匀下垫面地气相互作用和陆面过程参数化问题.在城市下垫面参数化研究中,改进的土壤-植被-大气传输模式被应用到城市热岛的研究中,而分层考虑城市人为热的排放以及日变化影响,可得到更贴近实际的模拟结果[45].

对于不同陆面参数化方案的适用性研究方面,已有学者从边界层高度、降水、近地层气温、地表热通量入手,对不同边界层参数化(PBL scheme)和陆

面模式(LSM)的组合方案进行对比研究[46]. 目前常用的4种陆面特征参数化方法有 Aggregation 聚集、Mixture 混合、Mosaic 马赛克和 PDF 统计动力学方法,前3种方法的假设条件都在一定程度上减弱或忽略了不均匀分布的影响,相对而言统计动力学方法则能较为有效地描述地表特征空间分布. 不同的参数化组合方案得出的模拟结果可信度存在明显差异,并有一定的时空适用范围,例如热通量的估测是否准确主要取决于陆面模式的选择,而风速的模拟与高度有很大关系. 因此应当针对不同的下垫面情形,以及所应用的具体方面,选取适当的陆面参数化和边界层模式,以求达到最佳的数值模拟效果.

5 非均匀边界层数值模拟研究
Numerical simulation of non-uniform boundary layer

自20世纪60年代以来,随着现代计算机技术的飞速发展,通过建立数值模式采用数值模拟的方法研究非均匀下垫面边界层特征及气候效应成为一种行之有效的方法,使用数值模拟的方法不仅可以通过对参数的控制达到不同的研究目的,且数值模拟结果可以弥补观测资料的不足,进而改进和指导观测及理论研究方法. 突破性的工作以1963年 Estoque[47] 提出的较为完整的大气边界层模式为标志. 在随后的几十年中,边界层模式的不断发展成为研究边界层的主要手段.

自 Giorgi 等[48]将中尺度模式 LAM 与 GCM 模式单向耦合用于区域气候的模拟研究以来,中尺度气候模式得到了长足的发展和应用. 除美国国家大气研究中心(NCAR)外,国内外的科研机构分别开发出了几十种气候模式. 和最初的模式相比较,现阶段的模式在以下3个方面得到了显著的改善和提高:1) 水平分辨显著提高,由几百公里提高到几十公里,乃至几公里,模拟对象的尺度从天气尺度提高到中小尺度,甚至云尺度,试图揭示出中小尺度系统的结构细节和演变机制;2) 单向或双向多重网格嵌套能力的提高,最多可有10重嵌套网格,且其子网格可随时激活和关闭,并可移动,这样有助于模拟不同尺度系统之间的相互反馈作用,并可在有限的计算能力下,对较小尺度的系统作较长时间的高分辨率模拟;3) 随着模拟尺度的精细化,静力假定不再满足,因而除原有的静力框架外,又增加了非静力框架. 同时在模式中,对于对中尺度大气系统的发生和发展至关重要的有关水汽相变、辐射、行星边界层和陆面过程等物理过程的考虑,趋于复杂逼真,可供选择的参数化方案增多.

目前通常采用中尺度气候模式对非均匀下垫面大气边界层进行数值模拟,它们最适用于几公里到几十公里的中尺度系统,也可以采用分辨率为1 km或2 km的网格来模拟城市小气候环境,因而被广泛应用到区域气候效应、土地利用变化的气候影响及预测等研究领域. 目前应用比较广泛的主要中尺度气候模式有:1) MM5 模式:在流体静力平衡的 MM4 模式基础上增加了非静力平衡方案,并提供多种物理方案选择,使其对降水和辐射等物理过程的描述和处理更为周密合理;2) RAMS 模式:是一个三维、非流体静力、可压缩的多用途中尺度模式,其模拟范围可从全球尺度跨越到大涡模拟(LES);3) ARPS 模式:建立在可压的 Navier-Stokes 方程上的非静力大气预报模式,它在对流精细尺度系统的预报中体现出较高的性能;4) WRF 模式:是近几年才发展起来的一种模式,具有完全可压的非静力方案、有限差分、垂直方向取质量坐标,物理参数化大多来源于其他模式已发展的方案[49-52],与 MM5 模式相比,该模式的优点是模式动力框架设计更为合理,整合了先进的三维变分资料同化系统,水平分辨率可达几公里,物理过程具有集合参数化方案等. 上述几种数值模式中,以中尺度非静力平衡的 MM5 模式应用最为广泛. MM5 模式是美国宾夕法尼亚州立大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合研制的一个非静力中尺度模式,目前 MM5 模式的水平分辨率可达到5 km,垂直分辨率可达40层,网格嵌套层数最多可达10层,已经在国内外得到广泛的应用.

对于非均匀下垫面,仅应用单一的气候模式得出的结果往往与真实情况有较大差距,因此发展与其他模型耦合的区域气候模式越发显得必要. 通常采用大气模式和陆面模式的耦合,例如,运用大气模式与水文模型的结合,可研究陆面水循环对大气边界层过程的影响[53];将大气模式与空气污染物迁移模型耦合,对城市空气质量的预测模拟已有较好的效果[54];而将不同尺度的气候模式嵌套,则能模拟出更为细致的气候场[37,55];同时,水文模式与大气模式的双向耦合也是近期的研究热点之一.

6 问题与展望
Problems and prospects

虽然近年来在非均匀下垫面大气边界层研究领

域已经取得了很大的进展,但仍存在以下一些问题需在今后的研究中加以关注.

1) 热力非均匀与动力非均匀的结合,即下垫面性质非均匀与复杂起伏地形的结合. 过去的观测试验大多侧重于非均匀地表的动力影响研究,而数值模拟则偏向于热力影响研究[17,30]. 同时由于地形起伏使边界层流场结构变得极为复杂,并且对如何确定大气模式在这种网格点上的有效粗糙度也存在困难,所以非均匀地表性质与地形起伏常被分开考虑. 但实际地表往往是这两种非均匀作用的复杂组合,为了更真实准确的描述非均匀下垫面边界层特征,应该考虑次网格地形热力效应的影响以及复杂地形中局地风场对地表性质形成的小气候的增强或减弱作用[21]. 因此今后在热力、动力非均匀的结合以及对复杂地表性质和地形组合的数值模拟预测方面还有待进一步的深入.

2) 湿地下垫面的数值模拟研究. 目前的观测已经证实湿地具有较明显的"冷湿气候效应"[25-26],且其影响程度与积水深度、湿地植被类型及植被组合类型密切相关[27]. 现有的研究主要集中在地表土壤及 1.5 m 以下的贴地气层中,还没有达到对边界层的影响高度[28],且多为定性的观测试验,并不能明确表述湿地对大气边界层及近地层结构和特性的影响机理,湿地与周围其它下垫面的水热及物质交换过程. 因此,应用气候模式耦合生态模型对湿地下垫面进行数值模拟,定量描述湿地"冷湿气候效应"的空间特征,以及湿地对周围地区小气候环境的影响,也将成为今后湿地气候效应研究的方向.

3) 城市复杂下垫面参数化. 在广泛应用中尺度气候模式研究城市边界层时,城市内部的局地小气候并不能准确地模拟出来,这是由于目前的中尺度模式对城市模式网格中复杂下垫面类型的参数化细化程度不够造成的. 目前应用三维复杂地形中尺度数值模式与 MM5 模式嵌套,对城市边界层进行了较详细的模拟[37,55],但在分辨率方面仍有待于进一步的提高与改进.

4) 气候模式与陆面过程模型的耦合. 作为链接生物圈、水圈和岩石圈的大气系统来说,各个界面的物质能量交换是维持地球生态系统运转的关键. 虽然已经有一些研究将大气模式与生态模型、水文模型、空气质量模型等相结合,提高了模拟精度也扩大了应用范围[53-54]. 但目前这方面的工作还处于探索阶段,未来需要在模型的耦合方面有进一步的发展.

参考文献
References

[1] Lyons T J, Halldin S. Surface heterogeneity and the spatial variation of fluxes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121: 153-165

[2] Mao Y H, Liu S H, Li J. Study of aerodynamic parameters on different underling surfaces[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 21(1): 87-97

[3] 刘树华,邓毅,胡非,等. 森林生态系统与大气边界层相互作用的数值模拟[J]. 应用生态学报,2004,15(11):2005-2012
LIU Shuhua, DENG Yi, HU Fei, et al. Numerical simulation of interaction between forest ecosystem and atmosphere boundary layer [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2005-2012

[4] 刘树华,李洁,刘和平,等. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流谱和局地各向同性特征[J]. 大气科学,2005,29(2):213-224
LIU Shuhua, LI Jie, LIU Heping, et al. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(2): 213-224

[5] Liu S H, Pan Y, DENG Yi, et al. Numerical simulation experiment of land surface physical processes and local climate effect in forest underlying surface[J]. Acta Meteorologica Sinca, 2006, 20(1): 72-85

[6] 张文江,高志强. 青藏高原中东部植被覆盖对水热条件的响应研究[J]. 地理科学进展,2005,24(5):13-22
ZHANG Wenjiang, GAO Zhiqiang. Study on the response of vegetation cover to precipitation and temperature in Central/East Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography, 2005, 24(5): 13-22

[7] 郑益群,钱永甫,苗曼倩,等. 植被变化对中国区域气候的影响Ⅱ:机理分析[J]. 气象学报,2002,60(1):17-30
ZHENG Yiqun, QIAN Yongfu, MIAO Manqian, et al. The effects of vegetation change on regional climate Ⅱ: Analysis of mechanisms[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(1): 17-30

[8] 柳媛普,吕世华,李锁锁. 近几十年黄河源区气候与植被变化及相关分析[J]. 高原气象,2007,26(5):1045-1051
LIU Yuanpu, LÜ Shihua, LI Suosuo. Changes and relevance analysis of climate and vegetation in the source region of Yellow River in recent several decades[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(5): 1045-1051

[9] Wang H J, Zhou H. A simulation study on the eco-environmental effects of 3N shelterbelt in North China[J]. Global and Planetary Change, 2003, 37: 231-246

[10] 李锁锁,吕世华,柳媛普. 河西绿洲对祁连山区环境影响的数值模拟[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(3):67-71
LI Suosuo, LÜ Shihua, LIU Yuanpu. Numerical simulation of effect of Hexi Oasis on the environment of Qilian Mountain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(3): 67-71

[11] 刘树华,刘和平,胡予,等. 沙漠绿洲陆面物理过程和地气相互作用数值模拟[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(11):1037-1043
LIU Shuhua, LIU Heping, HU Yu, et al. Land surface process over oasis-desert and numerical simulation of land-atmosphere interaction[J]. Science in China Series D: Earth Science, 2006, 36(11): 1037-1043

[12] 苏从先,胡隐樵. 绿洲和湖泊的冷岛效应[J]. 科学通报,1987,33(12):756-758
SU Congxian, HU Yinqiao. Clod island effects of oasis and lake [J]. Chinese Science Bulletin, 1987, 33(12): 756-758

[13] LÜ S H, AN X Q, CHEN Y C, et al. Simulation of oasis breeze circulation in the arid region of the Northwestern China[J]. Science in China Series D Earth Science, 2004, 47: 101-108

[14] 刘树华,胡予,胡非,等. 沙漠-绿洲陆-气相互作用和绿洲效应

的数值模拟[J]. 地球物理学报,2005,48(5):1019-1027
LIU Shuhua, HU Yu, HU Fei, et al. Numerical simulation of land-atmosphere interaction and oasis effect over oasis-desert[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(5): 1019-1027
[15] Xue J K, Hu Y Q. Numerical simulation of oasis-desert interaction [J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(9): 675-680
[16] 刘树华,胡予,胡非,等. 绿洲效应的模拟及内外因子的敏感性实验[J]. 大气科学,2005,29(6):997-1009
LIU Shuhua, HU Yu, HU Fei, et al. Numerical simulation of oasis effect and its sensitivity test on inside and outside factors[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(6): 997-1009
[17] 胡隐樵,孙菽芬,郑元润,等. 稀疏植被下垫面与大气相互作用研究进展[J]. 高原气象,2004,23(3):281-296
HU Yinqiao, SUN Shufen, ZHENG Yuanrun, et al. Review of study on interaction between underlying surface of sparse vegetation and atmosphere[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(3): 281-296
[18] Wu L Y, Chao J P, Fu C B, et al. On a simple dynamics model of interaction between oasis and climate[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(5): 775-780
[19] Mahmood R, Hubbard K G. Simulating sensitivity of soil moisture and evapotranspiration under heterogeneous soils and land uses [J]. Journal of Hydrology, 2003, 280: 72-90
[20] 吕世华. 盆地绿洲边界层特征的数值模拟[J]. 高原气象,2004,23(2):171-176
LÜ Shihua. Numerical simulation of boundary layer characters in oasis basin[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(2): 171-176
[21] Hadas S, Arieh B. The mixed results concerning the "oasis effect" in a rural settlement in the Negev Desert, Israel[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58: 235-248
[22] 姜金华,胡非,刘熙明,等. 水、陆不均匀条件下大气边界层结构的模拟研究[J]. 南京气象学院学报,2007,30(2):162-169
JIANG Jinhua, HU Fei, LIU Ximing, et al. Numerical simulation of atmospheric boundary layer structure over a water-land heterogeneous surface[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(2): 162-169
[23] 姜明,吕宪国,刘吉平,等. 湿地生态系统观测进展与展望[J]. 地理科学进展,2005,24(5):41-49
JIANG Ming, LÜ Xianguo, LIU Jiping, et al. Progress and prospect of wetland ecosystem observation[J]. Progress of Geographical Science, 2005, 24(5): 41-49
[24] WANG Yiyong, ZHAO Lilu. Effect of regional climate change after wetland reclamation in the Sanjiang Plain[C]//Conference of International Wetland and Peatland Utilization, Changchun, China, 1994
[25] 徐惠风,金研铭,刘兴土,等. 长白山区沟谷乌拉苔草 Carex meyeriana 沼泽湿地气候效应[J]. 生态环境,2006,15(1):120-123
XU Huifeng, JIN Yanming, LIU Xingtu, et al. The wetland climatic effect of Carex. meyeriana mire in the Changbai Mountain valley [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(1): 120-123
[26] 张芸,吕宪国,倪健. 三江平原典型湿地冷湿效应的初步研究[J]. 生态环境,2004,13(1):37-39
ZHANG Yun, LÜ Xianguo, NI Jian. Cold-humid ecological effects of the Sanjiang Plain[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 37-39
[27] 高俊琴,吕宪国,刘红玉. 湿地冷湿效应初探[J]. 农村生态环境,2003,19(1):18-21
GAO Junqin, LÜ Xianguo, LIU Hongyu. Cold-humid effect of wetlands[J]. Rural Eco-Environment, 2003, 19(1): 18-21
[28] 石勇,蒋维楣. 小尺度深凹地形大气边界层流场演变过程的非静力数值模拟研究[J]. 地球物理学进展,2000,15(2):90-99
SHI Yong, JIANG Weimei. Nonhydrostratic numerical simulation of ABL evolution process over microscale deep concave terrain [J]. Progress in Geophysics, 2000, 15(2): 90-99
[29] 刘辉志,洪钟祥,桑建国. 对流边界层中过山气流的数值模拟[J]. 气候与环境研究,2001,6(3):305-311
LIU Huizhi, HONG Zhongxiang, SANG Jianguo. Numerical simulation of the flow over terrain on the convective boundary layer[J]. Climatic and Environmental Research, 2001, 6(3): 305-311
[30] 胡小明,刘树华. 山丘地形的陆面过程及边界层特征的模拟[J]. 应用气象学报,2005,16(1):13-23
HU Xiaoming, LIU Shuhua. Numerical simulation of land surface process and atmosphere boundary layer structure over small hill underlying surface[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(1): 13-23
[31] 刘树华,李洁,文平辉. 城市及乡村大气边界层结构的数值模拟[J]. 北京大学学报:自然科学版,2002,38(1):90-97
LIU Shuhua, LI Jie, WEN Pinghui. Numerical simulation of atmospheric boundary-layer structure over urban and rural areas[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2002, 38(1): 90-97
[32] Civerolo K, Hogrefe C, Lynn B, et al. Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 1803-1818
[33] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C, et al. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 120-128
[34] Hong L F, David J S. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 73-84
[35] 佟华,刘辉志,桑建国,等. 城市人为热对北京热环境的影响[J]. 气候与环境研究,2004,9(3):409-421
TONG Hua, LIU Huizhi, SANG Jianguo, et al. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment[J]. Climatic and Environmental Research, 2004, 9(3): 409-421
[36] 刘树华,周彬. 应用一改进的模式对北京夏季风、温和湿度场的模拟[J]. 北京大学学报:自然科学版,2007,43(1):42-47
LIU Shuhua, ZHOU Bin. Simulation of wind, temperature and humidity fields over Beijing area in summer using an improved model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007, 43(1): 42-47
[37] Kardinal J S, Wong N H, Hagen, et al. The influence of land use on the urban heat island in Singapore[J]. Habitat International, 2007, 31(2): 232-242
[38] Civerolo K L, Sistla G, Rao S T, et al. The effects of land use in meteorological modeling: implications for assessment of future air quality scenarios[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(10): 1615-1621
[39] Robitu M, Musy M, Inard C, et al. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate[J]. Solar Energy, 2006, 80: 435-447
[40] Giridharan R, Lau S S Y, Ganesan S, et al. Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence[J]. Building and Environment, 2008, 43(10): 1583-1595
[41] Deardorff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation[J]. Journal of Geophysical Research, 1978, 83: 1889-1903
[42] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model[R]. National Center for Atmospheric Research Technical Note NCAR/TN-275 + STR, 1986: 69
[43] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part Ⅰ: Model

formulation[J]. Journal of Climate,1996,9:676-705
[44] 左洪超,吕世华,胡隐樵,等. 非均匀下垫面边界层的观测和数值模拟研究(1):冷岛效应和逆湿现象的完整物理图像[J]. 高原气象,2004,23(2):155-162
ZUO Hongchao, LÜ Shihua, HU Yinqiao, et al. Observation and numerical simulation of heterogeneous underlying surface boundary layer Ⅰ:The complete physical picture of cold island effect and inverse humidity[J]. Plateau Meteorology,2004,23(2):155-162
[45] Mihailovic D T,Rao S T,Alapaty K,et al. A study on the effects of subgrid-scale representation of land use on the boundary layer evolution using a 1-D model[J]. Environmental Modelling & Software,2005,20:705-714
[46] Han Z W,Ueda H,An J L. Evaluation and intercomparison of meteorological predictions by five MM5-PBL parameterizations in combination with three land-surface models[J]. Atmospheric Environment,2008,42(2):233-249
[47] Estoque M A. A numerical model of the atmospheric boundary layer[J]. J Gephy Res,1963,68(4):1103-1113
[48] Giorgi F,Bates G T. The climatological skill of regional model over complex terrain[J]. Mon Wea Rev,1989,117(11):2325-2347
[49] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR Mesoscale Model:Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front[J]. Monthly Weather Review,1993,121(5):1493-1513
[50] Pielke R A,Cotton W R,Walko R L,et al. A comprehensive meteorological modeling system RAMS[J]. Meteorology and Atmospheric Physics,1992,49(1):69-91
[51] Xue M,Droegemeier K K,Wong V,et al. The advanced regional prediction system(ARPS)—A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I:Model dynamics and verification[J]. Meteorology and Atmospheric Physics,2000,75(3):161-193
[52] Michalakes J,Dudhia J,Gill D,et al. The weather research and forecast model:Software architecture and performance[C]// Zwieflhoferw W. Use of High Performance Computing in Meteorology. Singapore:World Scientific Publ Co Pte Ltd,2005:156-168
[53] Maxwell R M,Chow F K,Kollet S J,et al. The groundwater-land-surface-atmosphere connection:Soil moisture effects on the atmospheric boundary layer in fully-coupled simulations[J]. Advances in Water Resources,2007,30(12):2447-2466
[54] Cheng S Y,Chen D S,Li J B,et al. The assessment of emission-source contributions to air quality by using a coupled MM5-ARPS-CMAQ modeling system:A case study in the Beijing metropolitan region,China[J]. Environmental Modeling & Software,2007,22(11):1610-1616
[55] Hu X M,Liu S H,Wang Y C,et al. Numerical simulation of wind and temperature fields over Beijing area in summer[J]. Acta Meteorological Sinica,2005,19(1):120-127

Review of researches on atmospheric boundary layer over heterogeneous underlying surface

HONG Wen[1,2] WANG Yiyong[1]

1 Northeast Institute of Geography and Agroecology,Chinese Academy of Sciences,Changchun 130012

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049

Abstract Based on various documentary materials,the paper summarizes the progress in research on the level atmospheric boundary layer(ABL) over non-uniform underlying surface. It points out that oasis shows obvious "cold-humid island effect" in arid area,leading to humidity inversion in the boundary region as well as regional oasis-Gobi circulation. The distribution of vegetation and water significantly changes the structure of ABL and greatly influences local climate. Besides,the underlying surface with complex terrain would affect local winds and small-scale circulations. Meanwhile,the occurrence and characteristics of "heat island effect",and the modification of microclimate by greenbelt and water in urban areas are also discussed in detail. Moreover,different planetary boundary layer(PBL) parameterization and land-surface models(LSM) are also described and compared in this paper. In the end,it presents the points deserving further investigation,including combination of thermal heterogeneity and dynamical heterogeneity,numerical simulation of wetland underlying surface,land surface parameterization of complex urban underlying surface,integration of climate models and other numerical schemes.

Key words atmospheric boundary layer(ABL);heterogeneous underlying surface;numerical simulation