Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例

胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年1月
第42卷 第1期
Vol.42 No.1

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷 第1期
2021年1月15日

目 次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 …… 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆(1)
基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 …… 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨(9)
中原城市群典型城市秋冬季大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及溯源 …… 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝囡, 齐静文(19)
沈阳市冬季大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源解析 …… 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀(30)
保定地区 $PM_{2.5}$ 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 …… 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐(38)
基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析:以南京市观测为例 …… 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翱, 陈文泰, 卢兴东(45)
2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 …… 高璟赟, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐邈, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁(55)
柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 …… 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽(65)
天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物VOCs的来源解析 …… 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂(75)
2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 …… 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林(88)
2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 …… 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳(97)
大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 …… 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城(106)
叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 …… 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国(114)
东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 …… 张冰, 张芊芊, 应光国(127)
松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 …… 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨(136)
东北小兴凯湖沉积物POPs污染特征及生态风险评价 …… 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮(147)
河南省地表水源中PPCPs分布及生态风险评价 …… 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫(159)
无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评价 …… 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波(166)
清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评价 …… 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛(175)
会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 …… 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝芙宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼(184)
三峡库区城镇化影响下河流DOM光谱特征季节变化 …… 陈昭宇, 李思悦(195)
不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 …… 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花(204)
基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 …… 张红娜, 崔娜, 申红妙(211)
分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 …… 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜(221)
丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 …… 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进(234)
太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 …… 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆(242)
石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 …… 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王莹燕, 王子芳(251)
前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 …… 陈垚, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪(263)
浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 …… 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然(274)
填料对潮汐流人工湿地中CANON作用强化的影响 …… 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励(283)
FeMnNi-LDHs对水中As(Ⅲ)的吸附性能与机制 …… 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂(293)
硝酸钙添加和锆改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 …… 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌(305)
某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 …… 颉亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远(315)
不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 …… 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送(323)
天然富硒土地划定的富硒阈值 …… 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃(333)
融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 …… 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴伟杰, 刘楚藩(343)
南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 …… 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平(353)
闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 …… 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌(359)
干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交籼稻籽粒Cd累积及产量的影响 …… 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵(368)
三元复合调理剂对土壤镉砷赋存形态和糙米镉砷累积的调控效应 …… 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宁, 周航, 廖柏寒(378)
风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 …… 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星(386)
不同施肥措施对水稻土壤微生物镉抗性的影响 …… 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷(394)
氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 …… 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希(403)
黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 …… 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(411)
生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制 …… 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺(422)
植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 …… 张瑞海, 宋振, 付卫东, 郭玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良(433)
黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 …… 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太(443)
等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响 …… 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华(450)
秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 …… 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔(459)
生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 …… 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明(467)
氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 …… 俞映倞, 王梦凡, 杨桢, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红(477)
微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 …… 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇(485)
无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 …… 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞(492)
基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 …… 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超(501)
《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第1期 2021年1月
Vol.42, No.1 Jan., 2021

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟

阳少奇, 冯莉*, 田慧慧, 刘艳霞
(河海大学水文水资源学院, 地理信息科学系, 南京 211100)

摘要: 随着人们对生活舒适度、身体健康要求的进一步提高,微小尺度的热环境状况日益受到关注. 地表温度场模拟是研究城市微小尺度热环境的关键,采用地面有限实测资料很难满足不同下垫面地表温度模拟的精度需求. 针对这一问题,本研究利用无人机搭载热红外成像仪获取南京市江宁区某大学校园内典型区域夏秋两季的地表温度数据,通过 ENVI-met 和 PALM-4U 两个数值模拟模型模拟研究区地表温度,并结合实测数据对不同地表类型及阴影遮挡下的模拟精度进行误差分析. 结果表明,数值模拟结果与真实结果较为接近,能够用于高空间精度的城市微热环境研究中; 模型对人造地表的模拟效果均优于自然地表,对空旷处地表的模拟效果优于非空旷处地表; 两个模型均能较好模拟存在建筑物遮挡下的地表温度,但在植被遮挡下 PALM-4U 则无法达到 ENVI-met 的效果,综合模拟结果显示 ENVI-met 在城市微热环境模拟上的适用性优于 PLAM-4U. 本研究可为城市微尺度热环境高分辨率遥感研究提供参考.

关键词:城市微热环境; 无人机热红外; ENVI-met 模型; PALM-4U 模型; 城市地表温度场; 数值模拟验证
中图分类号: X16 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)01-0492-09 **DOI**: 10. 13227/j. hjkx. 202005254

Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data

YANG Shao-qi, FENG Li*, TIAN Hui-hui, LIU Yan-xia
(Department of Geography Information Science, College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: With further improvements to meet social requirements for healthy and comfortable living, the research of micro-scale thermal environments has been received increasing attention. The key to micro-scale thermal environment study is the underlying surface temperature field simulation, which requires high precision results. Taking a typical area of the Jiangning District, Nanjing City, as a study area, this study used a UAV equipped with a thermal infrared imager to obtain surface temperature data in summer and autumn because of the limitation of the traditional ground measurements. Then, the numerical simulation software of ENVI-met and PALM-4U were utilized to conduct the surface temperature filed simulation. The simulation results were further analyzed combined with measured data. The modeling results indicated that the numerical simulation has high spatial accuracy, which can be applied to the study of the urban micro-thermal environment. Furthermore, the simulation effect of the model on the artificial surface is better than that of the natural surface, and the simulation effect of the open surface is better than that of the non-open surface. The study also found that the simulation effect of ENVI-met under the influence of occlusion was better than that of PALM-4U. The vegetation occlusion PALM-4U was less effective than that of ENVI-met, although both models correctly predicted the ground temperature under the occlusion of buildings. The overall conclusion indicates that the applicability of ENVI-met is superior to that of PLAM-4U for urban micro-thermal environment simulation. The study can provide a reference for the high-resolution remote sensing research of urban micro-scale thermal environments.

Key words: urban micro-thermal environment; UAV thermal infrared data; ENVI-met; PALM-4U; urban surface temperature field; numerical simulation verification

城市环境是城市社会经济可持续发展的基础支撑条件,良好的城市环境也是城市人居环境生态化的重要标志. 城市热环境作为城市环境的重要组成部分,近年来一直备受关注[1~3]. 城市热岛效应及热浪问题导致城市热舒适度降低,进而影响城市居民的生活质量[4,5],小区域的热环境会对人体健康产生重大影响[6]. 因此,从城市整体到局部,从大尺度到微尺度是城市环境问题的重点研究方向[7,8].

微热环境作为微环境研究中最核心的部分,是城市微环境研究的突破口[3]. 城市微热环境包括空气温度、空气湿度、太阳辐射和气流速度(风速)等诸项因素组成的与人们身体健康和工作效率直接有关的物理环境条件,受小尺度的下垫面性质及基础设施的配置格局等人为因素的影响[7],城市扩张造成的下垫面性质的改变对城市微热环境的影响尤为显著. 对于大范围的城市热环境,热红外遥感反演技术已经多次被国内外学者用于城市地表温度分布及动态变化特征研究之中[9~13]. 而对于微尺度下的城市热环境,在有限的地面实测基础上,高分辨率的遥感信息可以弥补地面实测空间分布的不足,但由于卫星运行周期,在有限的过境时间下难以提供地表温度的日变化信息. 在实测数据获取上,无人机技术

收稿日期: 2020-05-25;**修订日期**: 2020-07-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(41771446)
作者简介: 阳少奇(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市遥感,E-mail: yangshaoqi@hhu.edu.cn
* 通信作者,E-mail:erma1014@126.com

的出现可以在很大程度上解决遥感影像和地面实测在时空分辨率上不足的问题. 随着小型热红外相机的出现,用无人机搭载热红外成像仪器的无人机热红外技术也广泛地应用于热环境监测之中[14~17]. 无人机热红外影像能够为现有微热环境研究提供良好的支持,但如果对复杂下垫面条件的城市微热环境要做到模拟、分析与预测,无人机数据影像则不足以提供完整的数据支持. 数值模拟技术与计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)的发展使得城市微热环境的分析与模拟成为可能,高分辨率遥感与 CFD 数值模拟技术结合,将为研究微尺度下的城市热环境提供全面的数据支撑.

随着计算机性能的提高,数值模拟技术成为了微热环境参数评价的重要手段[18],微环境中热流的数值模拟是影响微环境热流参数获得的有效手段. 作为温度场和速度场耦合的一个有效工具,CFD 技术可以从流体力学的角度研究微热环境的运行方式,为定量研究不同下垫面类型对微热环境的影响探索新的方法,也可以为更进一步全面定量研究热环境影响因子对城市热环境的影响程度奠定基础. ENVI-met 以及 PALM-4U 均是基于 CFD 流体动力原理的微气候模型,可用于微观尺度上的环境模拟研究,并且都能处理比较复杂的地面条件. ENVI-met 由 Bruse 等[19]开发,已经 被广泛使用于国内外生物气象学和微环境热舒适性的研究之中. Ng 等[20]、Ali-Toudert 等[21]和詹慧娟等[22]用 ENVI-met 模拟分析了植被对微热环境的影响. Ali-Toudert 等[23]、Chen 等[24]、孙欣等[25]和卢薪升等[26]用 ENVI-met 模拟研究了特殊的城市结构形态以及城市街道峡谷纵横比和朝向对室外热舒适性影响. PALM-4U 目前正在由德国莱布尼茨汉诺威大学气象学与气候学研究所开发[27]. Maronga 等[28]阐述了 PALM-4U 模型的建立基础以及目前所取得的成果,Resler 等[29]对 PALM 系统的城市表面模型进行了阐述. 以上研究表明,数值模拟技术在微尺度下城市热环境研究中尤为重要. 但在上述研究中鲜见提及将 CFD 数值模拟技术应用到城市下垫面地表温度变化之中,普遍忽略了微尺度下城市下垫面对于热环境的影响.

因此, 本文选取南京市江宁区某大学校园内典型区为研究区域,利用无人机搭载热红外相机获取夏秋两季全天 08:00 ~ 19:00 多个时刻的地表温度数据,并分别使用 ENVI-met 和 PALM-4U 建立研究区的气象模型进行热环境模拟,得到相应时刻的地表温度场,基于无人机热红外数据对模拟结果进行评价和误差分析,通过探讨将 CFD 数值模拟技术应用到城市下垫面温度变化研究中的可能性,以期为数值模拟技术的应用提供理论支撑,同时为城市微热环境的高分辨率遥感与数值模拟技术结合应用研究提供参考.

1　材料与方法

1.1　PALM-4U 与 ENVI-met

1.1.1　PALM-4U 模型

PALM-4U 是运行在 Linux 系统上的一套程序,目前还没有开发出用户图形界面,但 PALM-4U 组织目前正在尝试融合 Python 作为调用的语言并且在不久推出图形界面. 理论上软件模拟的时间分辨率可达 1 s,空间分辨率可以在 1 ~ 100 m 之间[27]. PALM-4U 的模型使用是通过用户自行编程调用,该模型的基础设置需要使用 Fortran 语言,可以使用外部输入的地形参数,输入文件格式为 NETCDF. 同时, PALM-4U 数据的输出也采用 NETCDF 格式. 模型的系统架构采用的是模块化的方式,本次实验模拟地表温度所需要的模块有陆地表面模块(land surface model)与辐射模块(radiation model). 陆地表面模块支持多种表面类型输入,包含路面、水体和植被等,同时在不同的表面类型下可以设置各自的属性. 需要注意的是,目前 PALM-4U 无法模拟水体在模拟过程中的表面温度变化,并且输出的水体表面温度值恒为初始输入值. 对于地表能量平衡中的辐射通量, PALM-4U 中的辐射模型则提供了 3 种辐射模式,分别是恒定辐射模式、晴朗天空辐射模式和 RRTMG 模式. 本实验选择晴朗天空模式,其地表辐射通量计算公式为[27]:

$$R_{\mathrm{sw,net}} + R_{\mathrm{lw,net}}(T_0) = S_0\tau\cos\beta(1-\alpha_{\mathrm{s}}) + \varepsilon_{\mathrm{atm}}\sigma T_1^4 - \varepsilon\sigma T_0^4 \quad (1)$$

式中,$R_{\mathrm{sw,net}}$是地表净短波辐射, $R_{\mathrm{lw,net}}$是地表净长波辐射, T_0 是地表温度, S_0 是太阳常数(1 368 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$), τ 是大气透射率, β 为天顶角, α_{s} 是地表反照率, $\varepsilon_{\mathrm{atm}}$ 为大气发射率(0.8), σ 是 Stefan-Boltzmann 常数, T_1 为表面上第一个网格的温度, ε 为地表比辐射率.

1.1.2　ENVI-met 模型

ENVI-met 相对于 PALM-4U 而言是一款更易于使用的工具,它具有良好的图形界面和用户编辑工具,使用它并不一定需要了解复杂的物理学模型. ENVI-met 模拟的空间分辨率可以低至 0.5 m,时间分辨率可达 1 ~ 5 s[19]. 该软件提供用于非商业化用途的试用版本,本文使用的是 ENVI-met V4.0 Preview Ⅲ. ENVI-met 模型使用 bmp 底图格式创建三维模型,输出结果格式为 EDX/EDT 二进制格式,显示和分析结果使用软件包提供的 Leonardo 工具.

在本研究中为了和 PALM-4U 的输出结果统一分析,需要转换 EDX/EDT 输出结果为 NETCDF 格式. ENVI-met 地表辐射通量中短波辐射计算考虑直接短波辐射和散射短波辐射,长波辐射则由不受建筑遮蔽的长波辐射和受建筑遮蔽的长波辐射组成. 计算公式如下[30]:

$$R_{\mathrm{sw,net}} = [R_{\mathrm{sw,dir}(z=0)}\cos\beta + R_{\mathrm{sw,dif}(z=0)}](1-\alpha_{\mathrm{s}}) \quad (2)$$

$$R_{\mathrm{lw,net}}(T_0) = \sigma_{\mathrm{svf}}R^{\mathrm{us}}_{\mathrm{lw,net}}(T_0) + (1-\sigma_{\mathrm{svf}})R^{\mathrm{s}}_{\mathrm{lw,net}} \quad (3)$$

式中,$R_{\mathrm{sw,dir}}$是直接短波辐射, z 为高度, $R_{\mathrm{sw,dif}}$为散射短波辐射, σ_{svf}为天空可见因子,$R^{\mathrm{us}}_{\mathrm{lw,net}}$是不受建筑遮蔽的长波辐射, $R^{\mathrm{s}}_{\mathrm{lw,net}}$是受建筑遮蔽的长波辐射.

1.2 研究区与数据

1.2.1 研究区

本次研究实测地位于南京市. 南京位于长江中下游地区,地理坐标为北纬 31°14′~32°37′,东经 118°22′~119°14′,属亚热带季风气候是全国“四大火炉”城市之一,热环境情况复杂. 实测地点位于南京市江宁区某大学校园典型区域,测区大小为 200 m×100 m,测区的左下角经纬度为 31°54′50″N, 118°47′7″E. 图 1 为利用无人机获取测区的真彩色正射影像,并根据正射影像进行地表分类,得到研究区的地表类型分类,如图 2 所示. 本研究区内涵盖不同的地表类型,建筑物位于中心,一个湖泊位于右侧,沥青路面分布于右侧和下方,大理石路面分布在左上角,荷兰砖路面位于上方和左侧,高大的乔木覆盖在左下角,草地分布在建筑物及湖的周边,其余植被种植在道路的两旁. 为了有针对性地分析两款模型对于不同情况的模拟性能,在研究区(图 1)上选择不同的验证点(表 1).

图 1 研究区正射影像与验证点分布示意

Fig. 1 Orthographic image and distribution of verification points in the study area

1.2.2 无人机热红外数据

利用无人机搭载热红外相机获取整个研究区的热红外影像数据,无人机型号为大疆精灵 1,热红外相机是 FLIR Vue Pro 640R 无人机用测温型热成像仪,具体参数如表2所示. 该测温仪是为小型无人机设计的可测温热像仪产品,主要组成部分有红外探测器,光学成像物镜以及光机扫描器. 它可以实现全幅测温,通过前端处理系统在热成像视频上叠加输出最高温度、最低温度和平均温度. 所测数据最终转换为人眼可识别的热红外影像,以不同颜色来显示不同温度. 该热成像仪的测温精度在已有研究中已经得到验证,仪器测得的地温与真实的地温拟合系数达到 0.994[31],可以作为之后的验证基础数据.

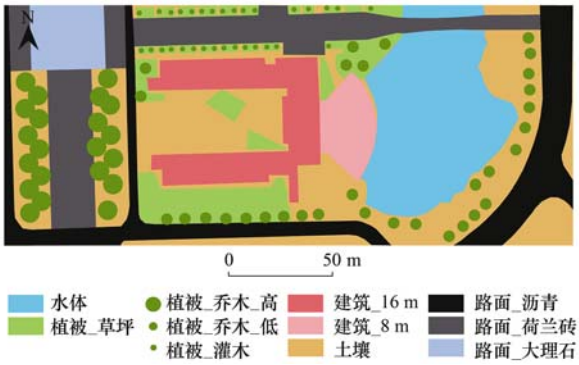

图 2 研究区地表类型分类

Fig. 2 Classification map of surface types in the study area

表 1 验证点信息

Table 1 Verification point information

点号	地面类型	描述	遮挡时刻
A1	荷兰砖路面	空旷	无
A2	荷兰砖路面	植被遮挡	08:00~12:00
A3	荷兰砖路面	建筑物遮挡	14:00~19:00
A4	大理石路面	空旷	无
A5	沥青路面	建筑物遮挡	15:00~19:00
A6	沥青路面	植被遮挡	08:00~11:00, 15:00~19:00
A7	沥青路面	空旷	无
A8	草坪路面	—	—

本实验的实测时间为 2018 年 7 月 19 日和 2018 年 9 月 28 日,每天 08:00~19:00 每隔 1 h 测量一幅影像,共获得 24 幅影像. 在使用之前,需要使用地面站设计航线和飞行参数,由于研究区范围较小,实验中仅设计一条航线,飞行高度设置为 180 m,将重叠度设置为 80%. 然后对热红外相机进行参数设定,通过蓝牙连接相机对成像仪进行设置,设置图像优化特性、启用记录全部选项. 起飞之前,根据当时的天气状况输入实时的大气温度、湿度、天气条件及辐射率等参数,以提高温度观测的精度. 数据获取后在 FLIR Tools 软件中可以获取每一个像素的温度值并将其输出到 文本文件中. 由于热红外影像的大小是 640 像素×512 像素,研究的大小设置为 200×100 的网格大小,所以获取验证点的温度值时以该像素点为中心选择 3×5 像素的平均值作为验证点的温度值,即能保证与模型输出的一个像素代表的实际大小基本一致,为后续的工作提供验证数据支持.

表 2　无人机热红外参数

Table 2　UAV thermal infrared parameters

性能参数	具体参数值	性能参数	具体参数值
无人机型号	大疆精灵 1	波长范围/μm	7.5 ~ 13.5
相机型号	FLIR Vue Pro 640R	测温范围/℃	- 20 ~ 170
温度分辨率/℃	0.1	测温精度/℃	±2
像素大小/μm	17	系统比辐射率	0.95

表 3　模型域初始设置参数

Table 3　Initial setting parameters of the model domain

输入参数	输入值	输入参数	输入值
模型北偏/(°)	0	x 方向网格单元大小/m	1
x 方向网格数	200	y 方向网格单元大小/m	1
y 方向网格数	100	z 方向网格单元大小/m	2
z 方向网格数	30	经纬度	31.91°N, 118.79°E

1.2.3　气象数据

为驱动 ENVI-met 和 PALM-4U 模型的运行,需要输入相应的气象数据. 运行 ENVI-met 模型需要输入 10 m 高度风速、风向、地面粗糙度、逐时气温、逐时相对湿度以及 2500 m 的比湿度[32]. 运行 PALM-4U 的气象输入有初始表面气象值和高度梯度控制,定义表面温度、比湿度、风速以及各参数对应的曲线梯度[27]. 本实验利用 HOBO 小型气象站获取模型输入的部分数据,气象站上放置有温度、湿度、风速风向以及太阳辐射传感器,因此气象站可接收的数据有气温、相对湿度、风速、风向以及光合有效辐射. 在本实验中,首先在室内通过 HOBOware 软件设置气象站的接收数据时间为 07:00 ~ 19:00,接收时间间隔为 1 min,随即将气象站放置于研究区的空旷处(图 1),调整脚架以让接收数据的高度为 1.5 m.

1.3　模型驱动

1.3.1　模型初始设置

表 3 为模型的初始设置参数. 考虑到研究区大小为 200 m × 100 m,在 PALM-4U 和 ENVI-met 中均设置三维模型在 xy 平面内为 200 × 100 网格,即分辨率 $dx = dy = 1$ m,z 轴垂直方向高度设置需大于最高的建筑物高度 16 m 并且不能过浅,于是设置 z 轴方向网格数 30,分辨率 $dz = 2$ m. PALM-4U 的模型输入依靠用户自定义的两个文件,分别是参数列表文件(后缀为 p3d)和静态驱动文件(后缀为 static). 在参数列表文件中定义模型的范围以及分辨率,文件语言格式为 Fortran; 在静态驱动文件中根据地表类型分类图(图 2)分别在各位置定义输入的地表类型,文件输入格式为 NETCDF. ENVI-met 的模型建模软件 SPACE,将地表类型图(图 2)转换为 bmp 格式作为 SPACE 模型的底图输入,分别设置建筑的高度,植被的种类以及地表类型后得到研究区的三维模型。模型模拟时长为 13 h,开始于 07:00 并结束于 19:00,具体日期与实测对应.

1.3.2　气象参数与地表参数

表 4 为两个模型的气象和地表参数输入配置. 在模型的建立阶段输入气象参数以驱动模型后续运行. ENVI-met 的输入数据中 10 m 处高度风速由 HOBO 接收数据并结合风廓线速度计算[31],逐时气温及逐时相对湿度由 HOBO 气象站提供, 2 m 处相对湿度由 HOBO 接收到的 1.5 m 处相对湿度代替,

表 4　ENVI-met 和 PALM-4U 模型气象参数和地表参数配置

Table 4　Meteorological parameters and surface parameter configuration of the ENVI-met and PALM-4U models

参数配置	输入参数	ENVI-met		PALM-4U	
		07-19	09-28	07-19	09-28
气象参数	高于地面 10 m 的风速/m·s^{-1}	0.08	0.54	—	—
	风向(北:0°,南:180°)	90°	90°	—	—
	初始化气温/K	—	—	303.15	298.15
	高于地面2 500 m的比湿度/g·kg^{-1}	7.0	7.0	—	—
	逐时气温/K	309.2(最大时刻 14:00) 303.2(最小时刻 07:00)	302.8(最大时刻 14:00) 294.5(最小时刻 07:00)	—	—
	2 m 处逐时相对湿度/%	85(最大时刻 07:00) 44(最小时刻 16:00)	75(最大时刻 07:00) 40(最小时刻 16:00)	—	—
	粗糙度长度/m	0.01	0.01	0.01	0.01
	表面比湿度/g·g^{-1}	—	—	0.002	0.003
	地转风 U 分量/m·s^{-1}	—	—	0.05	0.34
	地转风 V 分量/m·s^{-1}	—	—	0.05	0.34
地表参数	地表反照率	沥青路面:0.17; 荷兰砖路面:0.30; 大理石路面:0.40			
	地表比辐射率	沥青路面:0.95; 荷兰砖路面:0.95; 大理石路面:0.95			
土壤参数	初始温度,上层(0 ~ 20 cm)/K	293			
	初始温度,中间层(20 ~ 50 cm)/K	293			
	初始温度,深层(>50 cm)/K	293			
	相对湿度(上层)/%	30			
	相对湿度(中层)/%	60			
	相对湿度(深层)/%	60			

地面粗糙度与2 500 m的比湿度设置为默认值. PALM-4U 的输入数据中表面气象值均由 HOBO 气象站数据提供,各参数的对应曲线梯度采用 PALM-4U 默认值,其中地面比湿度由相对湿度数据结合玛格努斯经验公式求得[33]. 地表参数输入参照《城市道路设计规范》(CJJ 37-90)[34],分别在软件的地表类型数据库新建用户自定义地表类型并设定相应参数. PALM-4U 改变参数的方法是直接更改陆地表面模块源代码并通过在地表静态输入文件(后缀为 static)中设定,ENVI-met 则可以直接在数据库管理软件(Database Manager)中创建新的自定义地表类型. 需要注意的是,为了与热红外相机获取地表温度时设定的参数一致,地表比辐射率都设定为 0.95. 土壤参数 ENVI-met 采用软件默认值, PALM-4U 则设定为与 ENVI-met 一致的参数.

2 结果与讨论

2.1 地表温度场模拟结果

根据运用 ENVI-met 与 PALM-4U 两种数值模拟软件对研究区的模拟结果进行对比分析,图 3 为 ENVI-met 和 PALM-4U 模拟出的 6 个时刻中研究区温度图像(ENVI-met 中不输出建筑墙体顶面温度, PALM-4U 目前无法输出水体表面温度,故图 3 中显示为黑色),从中可知:模型的模拟结果较为清晰,在 1 m 的空间分辨率下建筑,植被,路面和草坪分界明显,在植被边缘存在少量温度过渡现象,在人造路面处温度过渡现象基本不存在; 模拟结果可以清晰地显示出随时间推移的温度变化情况,从早上08:00 开始温度上升,直到 14:00 达到峰值后持续下降,与实测值的趋势性保持一致; 模拟结果能够刻画出不同地物的温度差异,水体、植被和裸土等自然表面较混凝土、沥青等人工表面温度低; 模拟结果能够描述出阴影的遮挡效果,从模型中建筑物的阴影体现出太阳的东升西落,在 12:00 处太阳高度角基本垂直,无阴影效果. 因此,认为模型模拟的结果可信度较高,模型模拟能够为空间尺度为 1 m 的微尺度城市环境研究提供合理的数据支持.

2.2 不同微环境模拟误差分析

2.2.1 不同性质下垫面模拟误差分析

路面性质的不同,模型的模拟性能也不相同. 为了分析两款软件在人造地表和自然地表上的模型性能表现,选择 3 种人造路面(空旷处的平均值)和草坪路面在夏季的模拟结果,如图 4 所示. 从中可知,两个模型的人造地面的模拟结果均优于自然路面草坪, PALM-4U 和 ENVI-met 的人造路面平均模拟误差计算结果分别是 1.7℃和 6.3℃,草坪路面的平均模拟误差分别为 8.9℃和 6.1℃,对比两款软件的误差可以得知 PALM-4U 在自然地表的模拟效果不如 ENVI-met,但是在人造地表的模拟效果更优. 从图 4(a)中可以看到,在自然地表模拟结果中,较大的误差出现在模拟的前期,到了正午时期误差有所降低,并且两个模型的模拟值都是低于实测值的,分析其原因主要是在草坪地表中 1 m×1 m 的样方内存在稀疏的裸土情况,实测结果计算了混杂裸土的平均值,而模型模拟结果在计算的时候由于分辨率的原因将其全部认为是草坪,这在一定程度上会加大误差. 而人造路面性质更为单一,该因素的影响较自然地表更小,所以模拟的效果更好.

2.2.2 阴影遮挡对模型的模拟效果影响分析

在存在遮挡物的情况下,模型模拟中需要计算遮挡物对过程参数的影响,这也会导致模型模拟的效果差异. 为了分析此影响,选择空旷处(夏季的人造路面)和非空旷处(植被和建筑遮挡)的模拟结果,通过线性拟合分析并计算了均方根误差(root mean square error, RMSE),如图 5 所示.

从模型在空旷处和非空旷处的模拟结果对比来看, ENVI-met 和 PALM-4U 在空旷处的模拟精度均高于自身在非空旷处的模拟精度. 从模型之间的误差大小来看,在空旷处的模拟结果 PALM-4U(R^2: 0.93, RMSE: 2.74℃)优于 ENVI-met (0.91, 7.05℃),而在非空旷处 PALM-4U(0.46, 10.37℃)的模拟效果则明显不如 ENVI-met(0.42, 8.87℃). 在实际情况中,地表温度升高的原因是地表净辐射收支达到正值,地表净辐射的计算需要考虑到地表接收的直接短波辐射、地表接收的散射短波辐射、地表反射的短波辐射、地表发出的长波辐射以及大气对长波辐射的逆辐射[35]. 因此,在有植被和建筑遮挡的情况下,需要考虑到植被和建筑对于短波辐射的遮挡效果,同时也要考虑建筑物的向外长波辐射作用. 对于 ENVI-met,根据公式 (2)和公式 (3)所示, ENVI-met 模型通过定义衰减系数来模拟植被冠层对直接短波辐射的影响,但软件未考虑太阳散射辐射被植被的衰减和植被对太阳直射的散射现象,所以软件模拟的在植被遮挡下的太阳辐射是高于实际值的,刘之欣等[18]用 ENVI-met 对乔木模型的模拟验证实验中也得出了与此一致的结论. 在夏季树下的太阳辐射模拟值平均比实测值高 45.73 $W \cdot m^{-2}$,因此软件在树下的地表温度模拟值要高于实测值,与图 5(b1)所示一致; 对于长波辐射的计算, ENVI-met 考虑附近植物和表面发出的入射长波辐射部分不是基于视野内单个表面和叶片的温度,而是基于平均温度来计算的,这将会导致长波辐

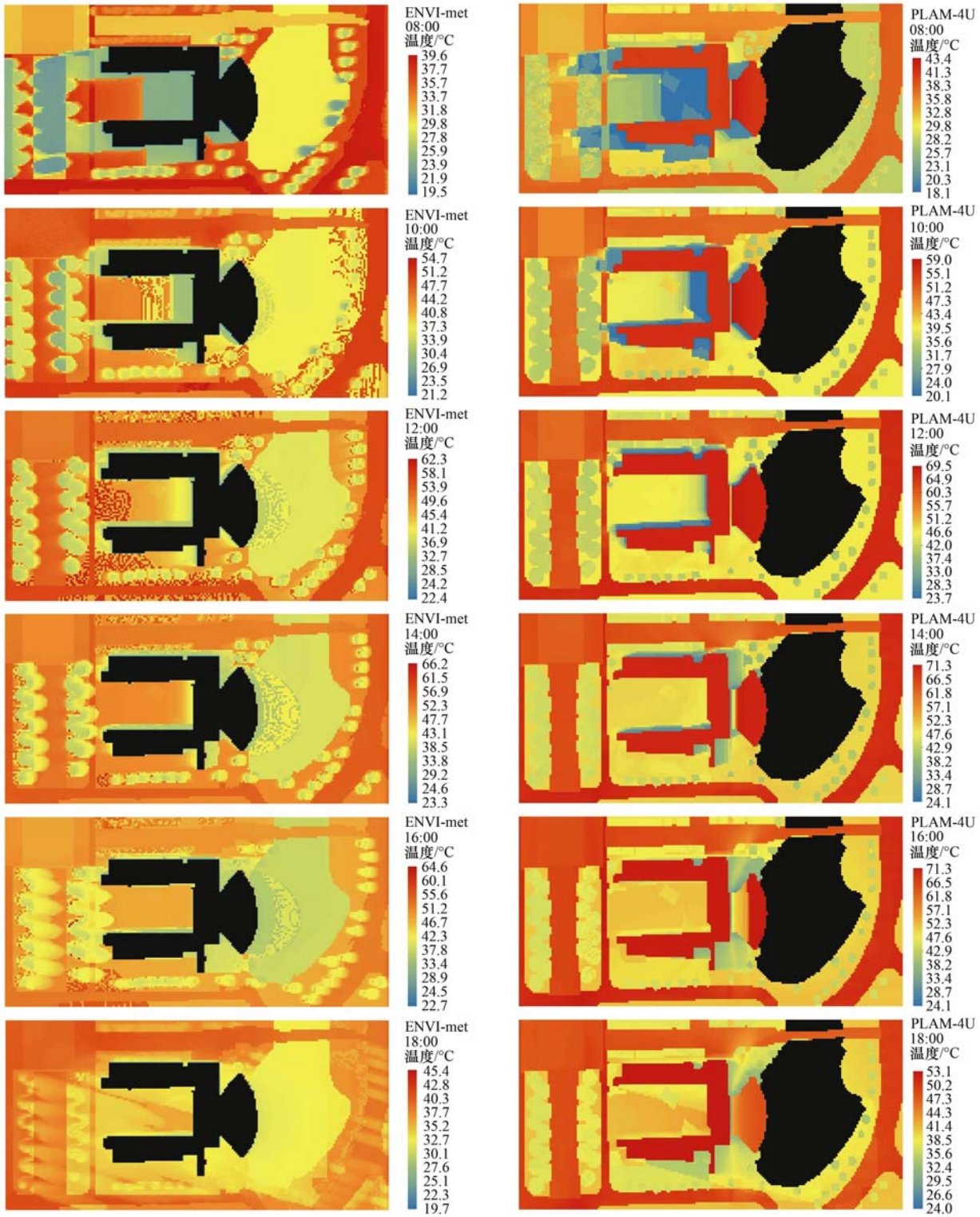

图 3　ENVI-met 和 PALM-4U 模拟 6 个时刻研究区地表温度

Fig. 3　ENVI-met and PALM-4U simulations of the surface temperature of the study area at six moments

射在较热的表面附近被低估的结果，如图 5(b1)所示，在建筑阴影下的地表温度模拟值均是低于实测值的，刘大龙等[36]在对比 ENVI-met、RayMan 和 SOLWEIG 城市辐射场模拟性能的实验中也指出了 ENVI-met 这一不足. 值得注意的是，在 ENVI-met 4.31 之后的版本中可以选择开启高精度辐射计算模块（indexed view sphere，IVS），IVS 能够详细分析和计算建筑表面之间长短波辐射通量的多重相互作用，这将会在一定程度上提高存在遮挡下的地表温度模拟精度. 而对于 PALM-4U，根据公式（1）所示，PLAM-4U 晴朗天空辐射模式并没有像 ENVI-met 一样定义衰减系数来计算植被的影响，因此在很大程度上高估了植被遮挡下地表接收的短波辐射，这也导致了地表温度模拟值较大地偏高于实测

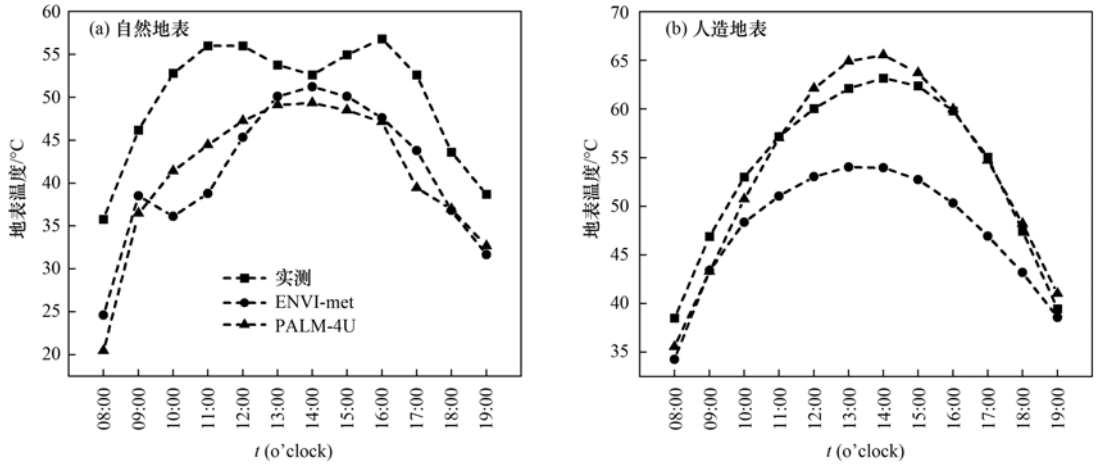

图 4 人造地表与自然地表模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of the simulation results of man-made surfaces and natural surfaces

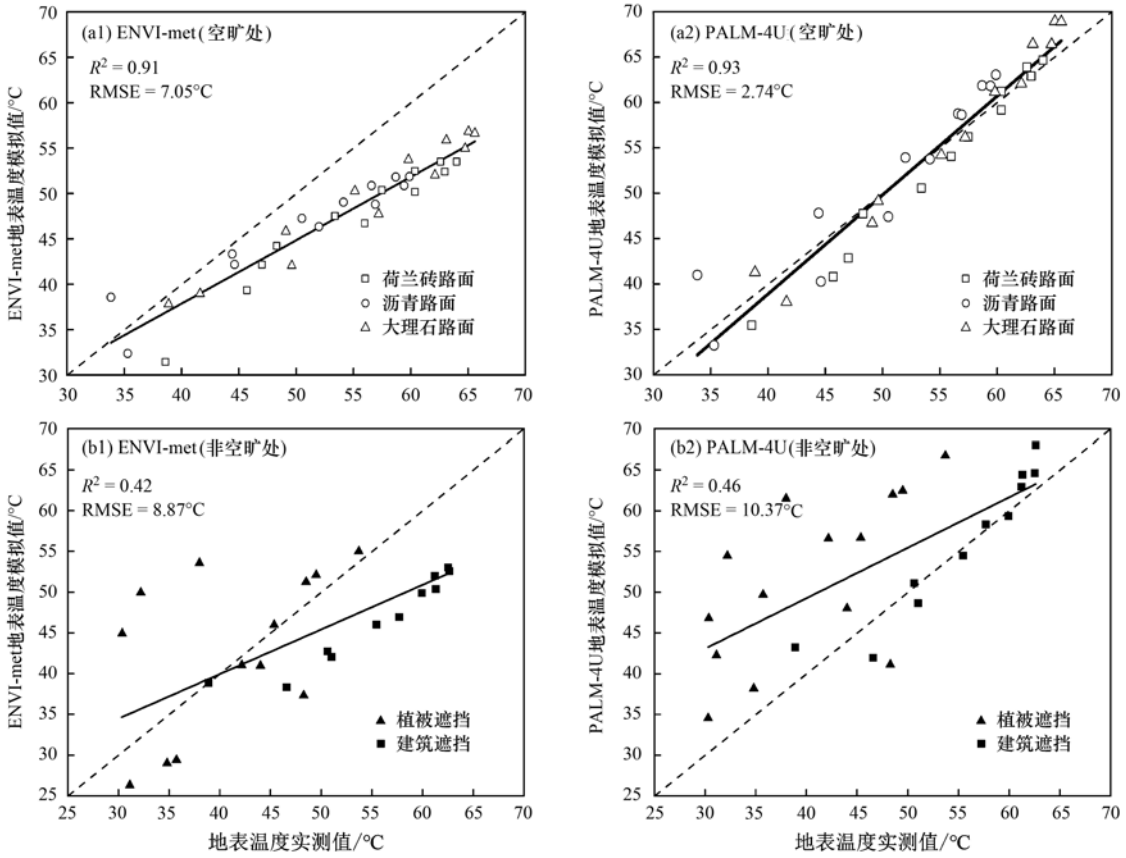

图 5 ENVI-met 和 PALM-4U 在空旷处与非空旷处的模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of the simulation results of ENVI-met and PALM-4U in open and non-open areas

值,如图 5(b2)所示; 而对于建筑遮挡下的地表温度模拟值与实测值是较为一致的,单独计算建筑物遮挡下的 PALM-4U 偏差 RMSE 为 3.43℃. 值得注意的是, PALM-4U 允许用户使用动态输入气象数据和更为复杂的全局模型的快速辐射传输模型(rapid radiation transfer model for global models, RRTMG),这将提高模型中辐射参数的模拟准确度,但这需要更多的用户参数输入[27].

2.3 ENVI-met 和 PALM-4U 模拟误差综合分析

进一步采用统计学指标来综合评价此次 ENVI-met 和 PALM-4U 的模拟表现. 选用一致性指数 d (index of agreement)反映模拟值与实测值之间接近的程度, $d=1$ 代表模拟值与实测值完全一致. 选用系统均方根误差($RMSE_S$)和非系统均方根误差($RMSE_U$)描述模拟结果的误差是系统误差还是非系统误差主导. 理论上, RMSE 值越接近于 0、$RMSE_S$ 越接近于 0 且 $RMSE_U$ 越接近于 RMSE 的模型模拟效果较好[37].

表 5 为两个模型各个指标计算的结果. 将不同情况的所有地表类型统计指标计算结果汇总,

ENVI-met(d：0.92)总体模拟结果优于 PALM-4U(d:0.88). ENVI-met($RMSE_S$：4.22℃，$RMSE_U$：3.06℃)和 PALM-4U($RMSE_S$：5.16℃，$RMSE_U$：4.87℃)的平均 $RMSE_S$ 都大于平均 $RMSE_U$,这说明两个模型的模拟结果误差主要由非系统误差造成,如外部输入参数的偏差.分析自然地表与人造地表的统计值可以得到与 2.2.1 节讨论相同的结果，ENVI-met(d 均值分别为 0.93 和 0.86)和 PALM-4U(d 均值分别为 0.89 和 0.82)对自然地表的模拟效果不如人造地表,并且两个模型自然地表的非系统误差较大(ENVI-met：6.18℃，PALM-4U：5.27℃),原因之一是输入的土壤参数都是选用系统的默认参数,这与真实值存在一定的偏差.分析空旷处与非空旷处得到的结果与 2.2.2 节结果一致，ENVI-met(d 值平均为 0.94)和 PALM-4U(d 值平均为 0.95)均在空旷处表现出良好的模拟精度,可以认为两款软件在空旷情况下模拟的地温趋势较为准确,并且 $RMSE_S$ 均小于 $RMSE_U$,这代表误差来源主要是非系统误差(如地表反照率的输入).对于植被和建筑遮挡的计算结果也和 2.2.2 节的结论保持一致，ENVI-met(d 平均值分别为 0.90 和 0.94)和 PALM-4U(d 平均值分别为 0.71 和 0.96)植被遮挡下的地温模拟效果不如建筑物遮挡下的地温模拟效果,且 PALM-4U(RMSE：12.5℃)对植被遮挡的影响无法做出较为准确地预测.

表 5　ENVI-met 和 PALM-4U 的模拟误差综合计算结果[1)]

Table 5　Comprehensive calculation results of the simulation errors of the ENVI-met and PALM-4U models

地表类型	描述	样本数	ENVI-met				PALM-4U			
			d	RMSE/℃	$RMSE_S$/℃	$RMSE_U$/℃	d	RMSE/℃	$RMSE_S$/℃	$RMSE_U$/℃
沥青	空旷	24	0.93	5.36	4.53	2.87	0.95	5.33	3.24	4.23
	植被遮挡	24	0.85	7.37	0.87	5.11	0.67	13.61	11.61	7.10
	建筑遮挡	24	0.92	6.74	6.18	2.67	0.94	7.25	4.94	5.31
荷兰砖	空旷	24	0.92	5.75	5.32	2.20	0.95	4.89	2.28	4.33
	植被遮挡	24	0.95	4.08	0.93	3.97	0.75	11.44	10.04	5.48
	建筑遮挡	24	0.95	6.14	5.94	1.56	0.99	2.52	0.37	2.49
大理石	空旷	24	0.96	4.19	3.84	1.72	0.95	5.33	3.56	3.96
草地	—	24	0.86	7.56	6.18	4.36	0.82	8.02	5.27	6.04
均值	—	—	0.92	5.90	4.22	3.06	0.88	7.30	5.16	4.87

1)d 为无量纲指标

3　结论

(1)CFD 模拟地表温度的结果能够描述不同的路面温度差异、时间序列的变化趋势以及阴影效果,认为 CFD 数值模拟技术在城市微环境研究之中能够提供较为准确的数据支持.

(2)CFD 数值模拟技术在人造表面的模拟效果优于自然表面,在空旷处的模拟效果优于非空旷处.

(3)通过对 192 组实测值与模拟值计算一致性指数 d,ENVI-met 和 PALM-4U 分别为 0.92 和 0.88,因此认为 ENVI-met 的模拟效果优于 PALM-4U.

参考文献：

[1] Oke T R. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects [A]. In: Cermak J E, Davenport A G, Plate E J, *et al* (Eds.). Wind Climate in Cities [M]. Dordrecht: Springer, 1995. 81-108.

[2] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, **86**(3): 370-384.

[3] 陈云浩，李京，李晓兵. 城市空间热环境遥感分析：格局、过程、模拟与影响[M]. 北京：科学出版社，2004. 1-14.

[4] Schwarz N, Manceur A M. Analyzing the influence of urban forms on surface urban heat islands in Europe[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2015, **141**(3): A4014003.

[5] 曹畅，李旭辉，张弥，等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. 环境科学，2017，**38**(10)：3987-3997.
Cao C, Li X H, Zhang M, *et al*. Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 3987-3997.

[6] 陈燕，张宁，朱焱. 城市高温热浪调控机制模拟研究[J]. 自然灾害学报，2020，**29**(1)：193-202.
Chen Y, Zhang N, Zhu Y. Simulation of summer high temperature regulation mechanism in urban areas[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, **29**(1): 193-202.

[7] 柳孝图，陈恩水，余德敏，等. 城市热环境及其微热环境的改善[J]. 环境科学，1997，**18**(1)：54-58.
Liu X T, Chen E S, Yu D M, *et al*. Thermal environment of urban area and the improvement of its micro-thermal environment [J]. Environmental Science, 1997, **18**(1): 54-58.

[8] 吴良镛. 21 世纪建筑学的展望——“北京宪章”基础材料[J]. 建筑学报，1998，**16**(4)：1-18.
Wu L Y. Expectations of 21st century architecture--source material of the Beijing charter[J]. Architectural Journal, 1988, **16**(4): 1-18.

[9] 覃志豪. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报，2001，**56**(4)：456-466.
Qin Z H. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, **56**(4): 456-466.

[10] 胡德勇，乔琨，王兴玲，等. 利用单窗算法反演 Landsat 8 TIRS 数据地表温度[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2017，**42**(7)：869-876.
Hu D Y, Qiao K, Wang X L, *et al*. Comparison of three single-window algorithms for retrieving land-surface temperature with Landsat 8 TIRS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, **42**(7): 869-876.

[11] 李军, 龚围, 辛晓洲, 等. 重庆地表温度的遥感反演及其空间分异特征[J]. 遥感技术与应用, 2018, **33**(5): 820-829.
Li J, Gong W, Xin X Z, *et al*. Land surface temperature retrieval and its spatial heterogeneity in summer in Chongqing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, **33**(5): 820-829.

[12] 孟翔晨, 历华, 杜永明, 等. Landsat 8 地表温度反演及验证——以黑河流域为例[J]. 遥感学报, 2018, **22**(5): 857-871.
Meng X C, Li H, Du Y M, *et al*. Retrieval and validation of the land surface temperature derived from Landsat 8 data: a case study of the Heihe river basin[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, **22**(5): 857-871.

[13] 付盈, 国巧真, 吴晓旭. 基于 Landsat 8 遥感数据的天津市地表温度反演[J]. 中国环境监测, 2018, **34**(5): 165-172.
Fu Y, Guo Q Z, Wu X X. Land surface temperature inversion in Tianjin city based on Landsat 8 remote sensing data [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, **34**(5): 165-172.

[14] Zarco-Tejada P J, González-Dugo V, Berni J A J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, **117**: 332-337.

[15] Calderón R, Navas-Cortés J A, Lucena C, *et al*. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of *verticillium* wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, **139**: 231-245.

[16] 洪运富, 杨海军, 李营, 等. 水源地污染源无人机遥感监测[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(5): 163-166.
Hong Y F, Yang H J, Li Y, *et al*. Monitoring of water source using unmanned aerial vehicle remote sensing technology[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(5): 163-166.

[17] 张智韬, 边江, 韩文霆, 等. 剔除土壤背景的棉花水分胁迫无人机热红外遥感诊断[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(10): 250-260.
Zhang Z T, Bian J, Han W T, *et al*. Diagnosis of cotton water stress using unmanned aerial vehicle thermal infrared remote sensing after removing soil background[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, **49**(10): 250-260.

[18] 刘之欣, 郑森林, 方小山, 等. ENVI-met 乔木模型对亚热带湿热地区细叶榕的模拟验证[J]. 北京林业大学学报, 2018, **40**(3): 1-12.
Liu Z X, Zheng S L, Fang X S, *et al*. Simulating validation of ENVI-met vegetation model to ficus microcarpa in hot-humid region of subtropical zone [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, **40**(3): 1-12.

[19] Bruse M, Fleer H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model[J]. Environmental Modelling & Software, 1998, **13**(3-4): 373-384.

[20] Ng E, Chen L, Wang Y N, *et al*. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: an experience from Hong Kong [J]. Building and Environment, 2012, **47**: 256-271.

[21] Ali-Toudert F, Mayer H. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons[J]. Solar Energy, 2007, **81**(6): 742-754.

[22] 詹慧娟, 解潍嘉, 孙浩, 等. 应用 ENVI-met 模型模拟三维植被场景温度分布[J]. 北京林业大学学报, 2014, **36**(4): 64-74.
Zhan H J, Xie W J, Sun H, *et al*. Using ENVI-met to simulate 3D temperature distribution in vegetated scenes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, **36**(4): 64-74.

[23] Ali-Toudert F, Mayer H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate[J]. Building and Environment, 2006, **41**(2): 94-108.

[24] Chen Y H, Wu J T, Yu K, *et al*. Evaluating the impact of the building density and height on the block surface temperature[J]. Building and Environment, 2020, **168**: 106493.

[25] 孙欣, 杨俊宴, 温珊珊. 基于 ENVI-met 模拟的城市中心区空间形态与热环境研究——以南京新街口为例[A]. 见: 规划 60 年: 成就与挑战——2016 中国城市规划年会论文集(07 城市生态规划)[C]. 沈阳: 中国城市规划学会, 沈阳市人民政府, 2016. 124-140.

[26] 卢薪升, 杨鑫. 基于 ENVI-met 软件小气候模拟与热舒适度体验的城市更新研究——以北京石景山北辛安地区为例[J]. 城市发展研究, 2018, **25**(4): C23-C28.
Lu X S, Yang X. Research on urban renewal methods based on ENVI-met software microclimate simulation and thermal comfort experience: a case study of Bei Xin'an area in Shijingshan in Beijing [J]. Urban Development Studies, 2018, **25**(4): C23-C28.

[27] Maronga B, Banzhaf S, Burmeister C, *et al*. Overview of the PALM model system 6.0[J]. Geoscientific Model Development, 2020, **13**(3): 1335-1372.

[28] Maronga B, Gross G, Raasch S, *et al*. Development of a new urban climate model based on the model PALM-project overview, planned work, and first achievements [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2019, **28**(2): 105-119.

[29] Resler J, Krč P, Belda M, *et al*. PALM-USM v1.0: A new urban surface model integrated into the PALM large-eddy simulation model[J]. Geoscientific Model Development, 2017, **10**(10): 3635-3659.

[30] Huttner S. Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met [D]. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität, 2012. 5-20.

[31] 田慧慧, 冯莉, 赵瑞瑞, 等. 无人机热红外城市地表温度精细特征研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(3): 553-563.
Tian H H, Feng L, Zhao M M, *et al*. Analysis of meticulous features of urban surface temperature based on UAV thermal thermography[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, **34**(3): 553-563.

[32] Jamei E, Seyedmahmoudian M, Horan B, *et al*. Verification of a bioclimatic modeling system in a growing suburb in Melbourne [J]. Science of the Total Environment, 2019, **689**: 883-898.

[33] 周西华, 梁茵, 王小毛, 等. 饱和水蒸汽分压力经验公式的比较[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, **26**(3): 331-333.
Zhou X H, Liang Y, Wang X M, *et al*. Comparison of saturation vapor pressure formulas [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, **26**(3): 331-333.

[34] CJJ 37-1990, 城市道路设计规范[S].

[35] 桂胜. 地表净辐射的卫星遥感研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. 13-30.
Gui S. Satellite remote sensing of surface net radiation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. 13-30.

[36] 刘大龙, 贾晓伟, 杨竞立, 等. 城市辐射场模拟性能对比分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, **59**(3): 243-248.
Liu D L, Jia X W, Yang J L, *et al*. Analyses of urban radiative field simulations[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, **59**(3): 243-248.

[37] 杨小山. 室外微气候对建筑空调能耗影响的模拟方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. 55-58.
Yang X S. A simulation method for the effects of urban microclimate on building cooling energy use[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. 55-58.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 42 No. 1

Jan. 15, 2021

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System ..... GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, *et al.* (1)

Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model ..... YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, *et al.* (9)

Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$ Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter ..... MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, *et al.* (19)

Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in $PM_{2.5}$ in Winter in Shenyang ..... WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, *et al.* (30)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ Collected in Baoding ..... LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, *et al.* (38)

Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing ..... HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, *et al.* (45)

Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 ..... GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, *et al.* (55)

Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou ..... LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, *et al.* (65)

Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer ..... LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, *et al.* (75)

Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017 ..... XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, *et al.* (88)

Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019 ..... ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, *et al.* (97)

Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise ..... LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, *et al.* (106)

Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves ..... YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, *et al.* (114)

Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed ..... ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo (127)

Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River ..... YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, *et al.* (136)

Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China ..... LI Hui, LI Jie, SONG Peng, *et al.* (147)

Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province ..... ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, *et al.* (159)

Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou ..... WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, *et al.* (166)

Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River ..... LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, *et al.* (175)

Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China ..... LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, *et al.* (184)

Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area ..... CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (195)

Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland ..... YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, *et al.* (204)

Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir ..... ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao (211)

Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir ..... YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, *et al.* (221)

Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir ..... ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, *et al.* (234)

Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake ..... GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, *et al.* (242)

Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed ..... DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, *et al.* (251)

Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems ..... CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, *et al.* (263)

Effect of *Enteromorpha prolifera* Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff ..... CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, *et al.* (274)

Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland ..... LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, *et al.* (283)

Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs ..... LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, *et al.* (293)

Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments ..... ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (305)

Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants ..... XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, *et al.* (315)

Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion ..... LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, *et al.* (323)

Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land ..... WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, *et al.* (333)

Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors ..... GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, *et al.* (343)

Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China ..... DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, *et al.* (353)

Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province ..... LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, *et al.* (359)

Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation ..... YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, *et al.* (368)

Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice ..... JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, *et al.* (378)

Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains ..... ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, *et al.* (386)

Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms ..... ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, *et al.* (394)

Soil Enzyme Activity in *Picea schrenkiana* and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang ..... ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, *et al.* (403)

Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China ..... ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, *et al.* (411)

Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism ..... FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, *et al.* (422)

Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of *Solanum rostratum* ..... ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, *et al.* (433)

Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer ..... SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, *et al.* (443)

Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen ..... HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, *et al.* (450)

How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils ..... SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, *et al.* (459)

Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation ..... YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, *et al.* (467)

Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application ..... YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, *et al.* (477)

Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish *Danio rerio* ..... ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, *et al.* (485)

Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data ..... YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, *et al.* (492)

Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale ..... SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, *et al.* (501)