

城市地表反照率变化对极端降水的影响模拟

裴羽佳^{1,2}, 刘家宏^{2,3}, 周晋军¹, 王佳^{2,3}, 梅超^{2,3}

(1. 北京工业大学建筑工程学院; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室;
3. 水利部数字孪生流域重点实验室)

摘要:为揭示单一极端降水事件中城市化导致反照率降低对极端降水的影响机制,基于 WRF 中尺度数值模式,耦合 Noah 陆面模式和城市冠层模式,以北京“23·7”极端降水事件为背景,通过改变城市地表反照率参数设计了城市化和非城市化情景反照率进行对比分析,并进行雨前 24 h 敏感性模拟。结果表明:反照率降低导致北京面平均累积降水量增加 11%,小时面平均降水量峰值提升 28%,小时面平均降水量超过 5 mm 的时长增加 50%,城区及城市下风向的西南山区降水量增幅最为明显;反照率变化在降水发生前已对热力和湿度场产生初步扰动,反照率降低使城区增温超过 0.2℃,边界层高度抬升 40 m 以上,表面气压降低 4~8 Pa,增强了对流运动,并使对流有效位能(CAPE)上升;尽管西南山区 CAPE 下降,但热岛环流和地形抬升共同作用导致降水增多,反照率变化引起热力强迫与地形动力的耦合效应影响降水分布。

关键词:城市化;反照率;WRF 模式;极端降水;北京

Simulation of impact of urban surface albedo changes on extreme precipitation//Pei Yujia^{1,2}, Liu Jiahong^{2,3}, Zhou Jinjun¹, Wang Jia^{2,3}, Mei Chao^{2,3} (1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology; 2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 3. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources)

Abstract: To quantitatively reveal the impact mechanism of urbanization-induced albedo reduction on extreme precipitation in a single extreme precipitation event, the WRF mesoscale numerical model was coupled with the Noah land surface model and the urban canopy model. With the Beijing’s “23·7” precipitation event as a case study, a comparative analysis was carried out by design of urbanized and non-urbanized albedo through modifying the urban surface albedo parameter, and a sensitivity simulation for 24-h preceding precipitation onset was also conducted. The results indicate that albedo reduction increased the areal average accumulative precipitation by 11% in Beijing, raised the peak hourly areal average precipitation by 28%, and prolonged by 50% of the duration during which the hourly areal average precipitation exceeded 5 mm. The precipitation increase in urban areas and the southwestern mountainous region downwind of the city was the most significant. Albedo changes had already induced initial perturbations in the thermal and humidity fields before precipitation onset. The albedo reduction caused an urban temperature rise of more than 0.2℃, a boundary layer height increase of over 40 m, and a surface pressure decrease of 4 to 8 Pa, thereby enhancing convective motion and convective available potential energy (CAPE). Although CAPE decreased in the southwestern mountainous area, precipitation increased due to the combined effects of urban heat island circulation and topographic uplift. Overall, albedo change-induced thermal forcing and its coupling with topographic dynamics exerted a pronounced influence on the spatial distribution of precipitation.

Key words: urbanization; albedo; WRF model; extreme precipitation; Beijing

在全球快速城市化背景下,城市下垫面性质的改变对局地及区域气候的影响日益显著。作为地表能量平衡的关键参数,反照率降低被认为是加剧全球变暖的重要机制之一^[1],地球反照率是指地球反射回太空的太阳辐射与入射太阳辐射的比例,反照率越高,反射的太阳辐射越多,地球吸收的热量越少。研究表明,全球 3 037 个城市的反照率呈现显著下降趋势^[2],Chen 等^[3]研究了生态系统反照率变化对全球变暖的影响,发现其在某些区域和情景下的气候效应可能与碳汇减排效果相当,甚至更强。

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3090600)
作者简介:裴羽佳(1995—),女,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:18810295889@163.com
通信作者:刘家宏(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:liujh@iwhr.com

已有研究表明城市化可能通过降低地球的反照率而产生全球变暖效应^[4]。而随着城市化进程的加快和全球变暖的持续,城市极端降水事件将更加频繁和强烈^[5-6]。

近年来,极端降水事件的频发与城市化进程的关联性备受关注^[7-8],但针对单一极端事件中城市化导致反照率变化的定量贡献及其作用路径的研究仍存在不足。北京作为我国城市化进程最快的超大城市之一,其独特的地形与季风气候特征使其对气候变化响应敏感。2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日,受台风“杜苏芮”残余环流与地形抬升的协同作用,北京遭遇历史罕见极端强降水,即北京“23·7”极端降水事件,多地累积降水量突破历史极值,引发严重城市内涝^[9-10]。此次事件凸显了城市化背景下极端降水灾害的复杂性:一方面,城市扩张可能通过热岛环流与地形动力过程耦合提升降水效率;另一方面,城市地表反照率降低可能通过改变地表-大气能量交换进一步增大降水强度。然而,现有研究多聚焦于城市化对长期气候趋势的影响,而对特定极端事件中反照率变化的作用机制仍缺乏系统解析。

本文以北京“23·7”极端降水事件为切入点,基于 WRF(weather research and forecasting)中尺度数值模式,通过耦合城市冠层模式(urban canopy model, UCM)进行高分辨率数值模拟,研究城市化与极端降水的关系^[11]。通过设计城市化与非城市化情景反照率进行对比分析,重点探讨城市反照率变化对极端降水时空分布特征的影响以及对水汽输送与对流不稳定性的热力-动力机制影响,以揭示城市化进程中地表反照率调控对此次极端降水的影响路径,为城市的气候适应性规划提供理论依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

如图 1 所示,北京(39°28'N~41°05'N, 115°25'E~117°30'E)地形复杂多样,地势西北高、东南低,呈西北向东南倾斜的半盆地地形。西部和北部为山区,主要由太行山余脉的西山和燕山山脉的军都山组成,海拔多为 1000 m 以上。东南部为由永定河、潮白河等水系冲积而成的平原,是北京主要农业区。北京属于暖温带半湿润半干旱季风气候,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年降水量空间分布不均匀,东北部和西南部山前迎风坡地区降水量普遍较大。2023 年 7 月 29 日至 8 月 2 日,在台风“杜苏芮”影响下,北京遭遇了“23·7”极端降水事件,引发了严重的城市内涝,对城市运行和居民生活造成了巨大影响^[12]。此次降水过程中,北京多

个气象站降水量突破历史极值^[13]。这一事件严重威胁了人民的生命财产安全,造成了巨大的损失和影响。此次降雨过程的形成与多种大气环流因素密切相关^[14],台风“杜苏芮”减弱后的残余环流在西太平洋副热带高压的引导下北上,携带大量水汽进入华北地区,为降水提供了充足的水汽条件;降水期间副热带高压与大陆高压连接,形成稳定的经向环流结构,这种结构有利于水汽持续输送和降水维持;华北地区地形,尤其是太行山脉,对水汽抬升起到了关键作用。

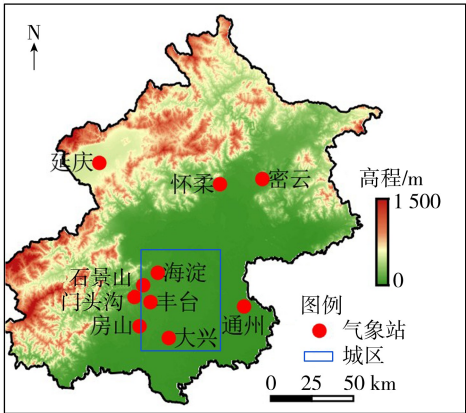


图 1 北京地形图和气象站分布

Fig. 1 Topographic map of Beijing and distribution of meteorological stations

1.2 数据来源

WRF 模式的输入数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的 FNL 再分析数据(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>),将其作为初始和边界气象条件。该数据空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 6 h。土地利用数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>)中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC),选择 2020 年的数据,分辨率为 1 km。将土地利用类别转换成 WRF 模式可以识别的 24 类美国地质调查局(USGS)土地利用类别^[15],土地利用类型如图 2 所示。

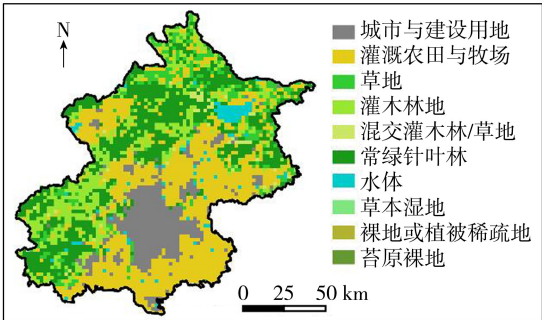


图 2 北京土地利用类型分布

Fig. 2 Distribution of land use types in Beijing

采用的高程数据来源于 SRTM (shuttle radar topography mission) (<https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm>),由美国国家航空航天局(NASA)和美国国家影像与测绘局(NIMA)联合测量,数据为 GeoTIFF 格式,空间分辨率为 30 m,基准面为 WGS1984。2 m 气温和相对湿度验证数据来自中国气象数据中心(<https://data.cma.cn/>)中国自动气象站逐 3 h 数据,降水数据来自中国气象数据中心陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)实时产品数据,用于验证 WRF 模式模拟的气象要素与北京地区气象要素在模拟期间的匹配度。2 m 气温和相对湿度的模拟误差通常对区域降水模拟结果产生重要影响。为此,选择北京 10 个气象站(图 1)的观测数据,对模拟结果中 2 m 气温和相对湿度进行统计对比。采用均方根误差(RMSE)和平均偏差(MBE)评估 2 m 气温和相对湿度的模拟结果,并使用再分析数据验证降水时空分布。

由于缺乏实测反照率数据,本文采用的城市反照率数据来自 2000—2018 年全国地表反照率数据集(<https://nesdc.org.cn/sdo/detail?id=6139dbe27e28173dfbf0594d>)。该数据集基于 MODIS 陆表数据产品(MCD43C3)生成,空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d,数据通过 Timesat 软件的 SG 滤波算法进行去噪处理,选择 2018 年同期数据,计算 CNLUCC 中北京城市与建设用地的平均反照率,用以代表城市反照率。

2 研究方法

2.1 耦合模式构建

将 WRF 模式(4.2 版本)与 Noah 陆面模式和 UCM 相耦合,探索城市反照率变化对降水的影响。UCM 通过参数方法表征城市反照率,并将其反馈到地表辐射收支与能量平衡计算中,从而调节地表能量平衡并影响局地气候特征^[16]。WRF/Noah/UCM 耦合框架因其丰富的物理参数化选项,在模拟中尺度天气过程方面表现出可靠的性能,有效提高了对城市热岛效应和极端气候事件的模拟能力^[17]。本文采用 3 层嵌套,从外到内网格点分别为 500×350、190×250、196×196,分辨率分别为 18、6、2 km。模拟中心坐标为 39.4°N、116.4°E,由外至内分别为外层、中间层和内层,其中内层为主要分析区域。

模拟参数方案^[18-23]分别为:微物理参数选取 WSM 3(WSM 3-class simple ice)方案;外层使用积云对流参数 KF(Kain-Fritsch)方案,中间层和内层未启用积云对流参数化方案;短波辐射参数采用 Dudhia 方案,长波辐射过程采用 RRTM 方案;地面

过程使用 Noah 陆面模式;边界层参数化采用 YSU(Yonsei University)方案。UCM 中城市冠层参数除了反照率以外均采用默认设置。模拟采用兰伯特投影,顶部气压设置为 5 kPa,将地面至模式顶部的整层大气划分为 34 层,步长设置为 72 s。

2.2 模拟方案设计

城市化可能会通过降低地球反照率而产生全球增温效应^[4],为了评估城市反照率变化对北京极端夏季降水的影响,采用城市化和非城市化两种不同反照率情景,以北京“23·7”极端降水事件为例,分析城市化导致的反照率下降对极端降水的贡献。利用 2000—2018 年全国地表反照率数据集计算得到北京同期城市化情景反照率为 0.141, Ouyang 等^[4]认为城市土地反照率比相邻农田低 0.01~0.02,因此,将非城市化情景反照率设置为 0.155 进行对比分析。冯焱等^[24]计算了北京二环至四环的平均反照率为 0.136~0.146,表明本文设定的城市化情景反照率数据与前人的结果具有一致性。两组情景分析采用的其他参数均相同。研究时段为 2023 年 7 月 29 日 8:00 至 2023 年 8 月 2 日 8:00,共 96 h。前 12 h 用于 WRF 模式启动预热,其余 84 h(2023 年 7 月 29 日 20:00 至 8 月 2 日 8:00)用于比较分析。

2.3 模拟结果验证

气温和相对湿度是影响降水的重要因素^[25]。因此,模拟验证主要从气温、相对湿度和降水等方面进行。为了验证模拟结果的准确性,将城市化情景的模拟结果与观测结果进行比较,主要分析 2 m 气温、相对湿度、降水量等气象要素。

图 3 和图 4 分别为北京 10 个气象站 2 m 气温和相对湿度的验证结果,其中观测值为逐 3 h 站点数据,WRF 模式在模拟期间较好地模拟了 2 m 气温, RMSE 范围为 0.93~1.23℃;MBE 均为负值,绝对值小于 0.5℃。同样, WRF 模式在模拟期间也很好地再现了相对湿度, RMSE 范围为 3.99%~9.87%;MBE 均为负值,绝对值小于 6%。虽然湿度存在一定的低估,但是整体偏差较小,可能是由于:①边界层参数化方案在湿度较高条件下存在一定的不确定性;②初始场和边界场水汽信息可能存在系统性偏差,并在模拟过程中累积放大;③观测数据为逐 3 h 站点实测值,而模拟输出为格点平均值,可能低估了一些高湿度时段。尽管存在一定偏差, WRF 模式对相对湿度的模拟仍在合理范围内,具有应用价值。

图 5 为 2023 年 7 月 29 日 20:00 至 8 月 2 日 8:00 的观测和模拟累积降水量。本次模拟得到了整个极端降水期间的分布结果,可以看出模拟结果

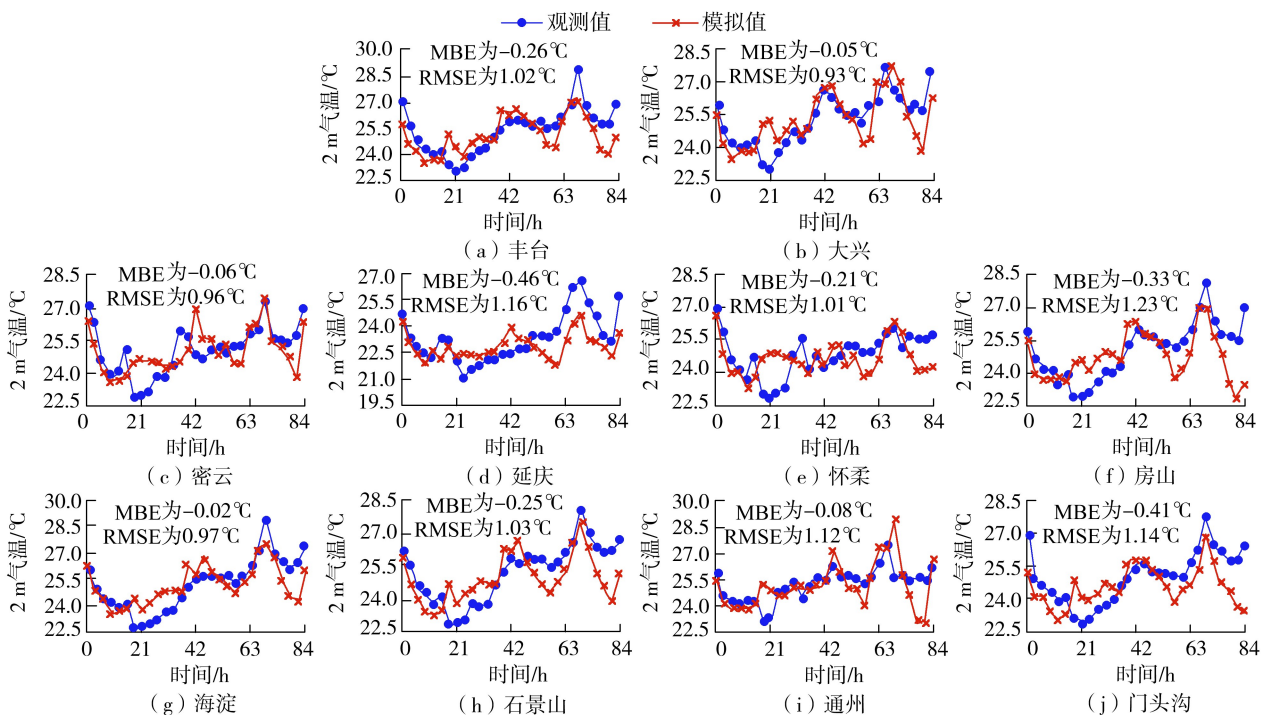


图3 各气象站2 m气温验证结果

Fig. 3 2-m temperature verification results at different meteorological stations

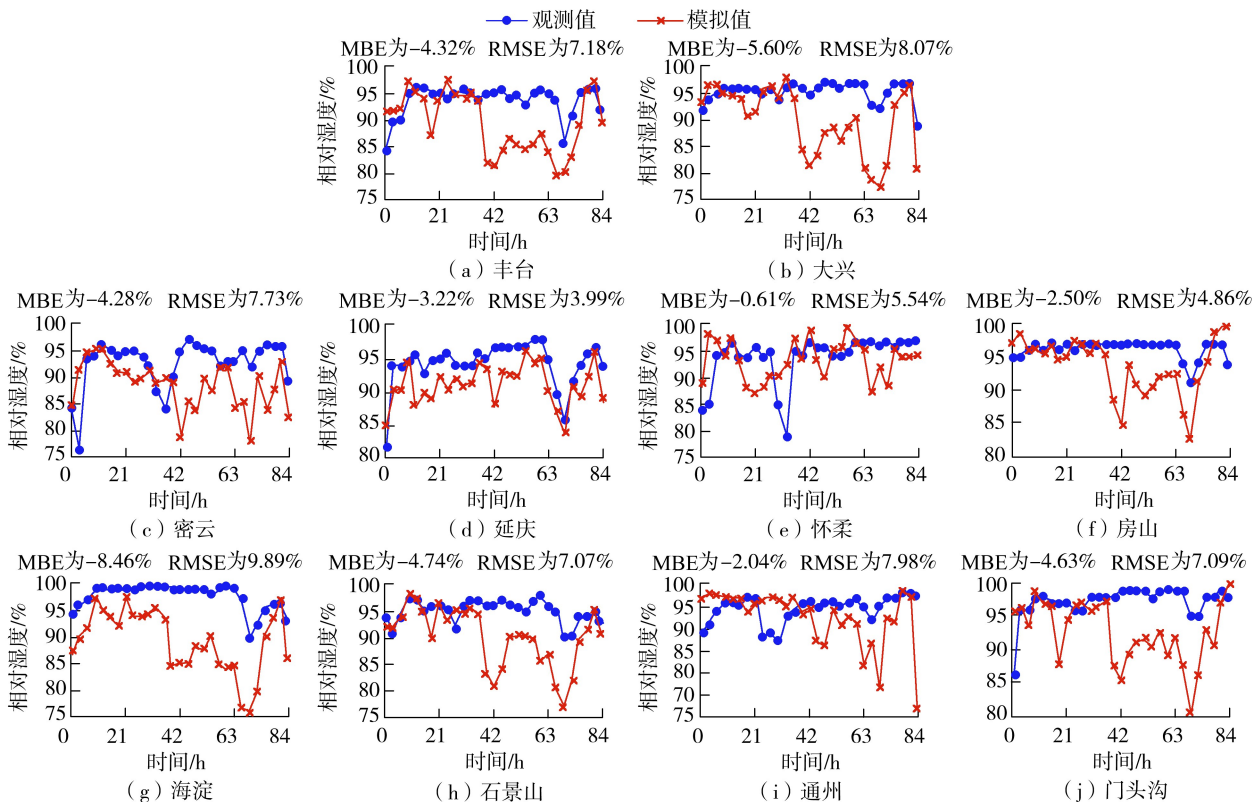


图4 各气象站相对湿度验证结果

Fig. 4 Relative humidity verification results at different meteorological stations

与观测结果的空间分布较一致。在强降雨情况下,模拟和观测的累积降水量极值均超过了 650 mm,最大值出现在西南山区,这与台风“杜苏芮”携带大量水汽在西南山地抬升,造成极端降水有关。由图 5 可知,模拟结果在一定程度上低估了降水量。降水

量精确模拟一直是大气模式研究中的一个挑战,关键物理过程参数化发展可以提高降水模拟的精度。本文主要关注极端降水对反照率变化的敏感性响应,采用城市化和非城市化情景反照率进行对比分析。由于所有模拟方案在相同物理参数化配置下仅

调整反照率,观测与模拟结果之间的降水量偏差可视为系统性误差,在开展城市化和非城市化情景对比分析时可基本抵消,对响应结果的影响有限。

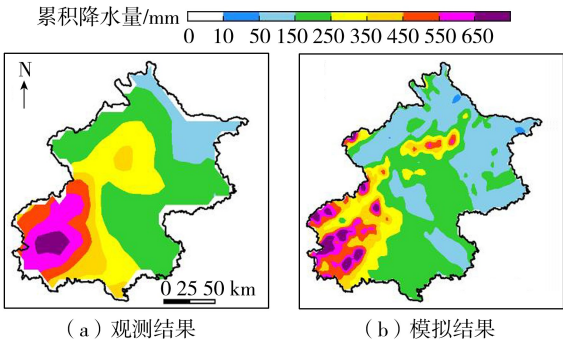


图 5 累积降水量分布
Fig. 5 Cumulative precipitation distribution

3 结果与分析

3.1 降水特征改变

图 6(a) 为城市化和非城市化情景降水量变化值分布。2023 年 7 月 29 日 20:00 至 8 月 2 日 8:00,反照率变化对降水格局和分布产生了显著影响。城市化导致降水量显著增加,城区及城市下风向的西南山区增幅较大,增幅大多为 10~50 mm,降水量增幅最大的区域(增幅 50~100 mm)位于城市下风向的西南山区,也是“23·7”极端降水事件极值所在区域。基于模拟期间的 FNL 再分析数据提取了 850 hPa 层平均风场(图 7),结果显示,在北京“23·7”极端降水事件期间的盛行风为自东南向西北,城区处于山区上风向路径上,西南山区处于城区

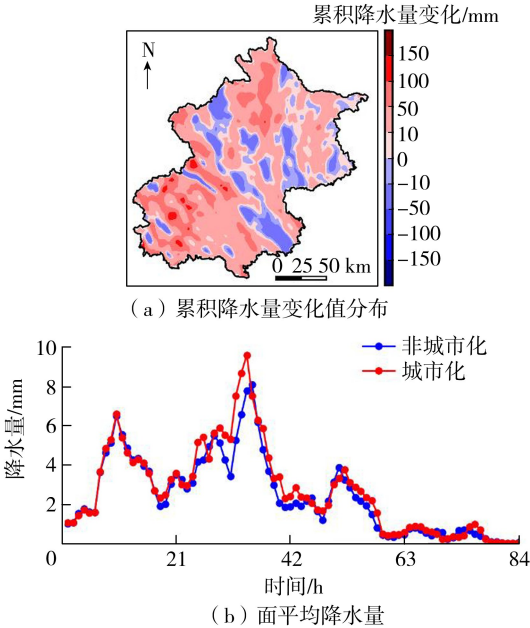


图 6 城市化和非城市化情景降水量对比
Fig. 6 Precipitation comparison between urbanization and non-urbanization scenarios

下风方向,风场特征有利于水汽由东向西并略偏北输送至西南山区,结合地形抬升作用,共同增强该区域的降水响应。

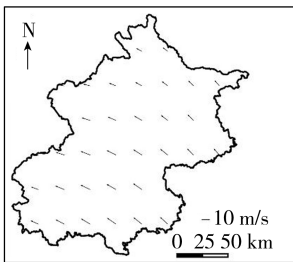


图 7 850 hPa 平均风场
Fig. 7 Mean wind field at 850 hPa

城市化导致的反照率降低显著改变了区域降水的时空分布特征。对比结果显示,城市化导致北京面平均累积降水量由 206.6 mm 增加到 229.0 mm,增加了约 11%。如图 6(b) 所示,小时面平均降水量峰值由 7.5 mm 提升到 9.6 mm,提升了 28%;短时较强降水事件(小时面平均降水量超过 5 mm)时长由 10h 增至 15 h,增加了 50%。尤其在排水能力较弱的低洼区域,如北京中心城区,直接加剧了城市内涝风险。这种降水增大效应可能显著影响流域洪峰的形成,导致下游河道洪峰流量增加,对山区以及靠近山区的城区等流域防洪调度提出更高要求^[26]。

3.2 局地气候分析

对城市化和非城市化情景反照率条件下气象要素进行对比分析,结果表明,反照率降低导致地表气温升高,进而引发城市热岛效应,城区 2 m 气温升高 0.2℃ 以上(图 8(a))。这种气温升高会增强大气对流,使水汽更容易上升和凝结,从而增加降水的可能性。可以发现西南山区 2 m 气温出现了降低,这可能与降水增多的冷却作用有关。尽管城区潜热通量增加并不明显,在多数区域呈现 0~5 W/m² 的弱减少趋势(图 8(b)),但极端降水总量却增加,这一现象说明,此次极端降水的水汽来源更多依赖于台风输送,而非单纯的局地蒸发。图 8(c) 显示城区边界层高度抬升达到 20~60 m,图 8(d) 显示北京地表气压整体下降,城区下降 4~8 Pa,地表气压的降低和边界层高度的抬升共同改变了大气的热力和动力结构。较低的气压通常伴随着更强的对流活动,这为极端降水形成提供了有利的动力条件。边界层高度抬升增加了大气混合层厚度,使得更多水汽和能量能够在边界层内积累,从而增加了降水的潜在强度。这种复杂的相互作用表明,城市反照率变化对局地气候的影响是多方面的,涉及能量平衡、水汽输送和大气环流的改变。

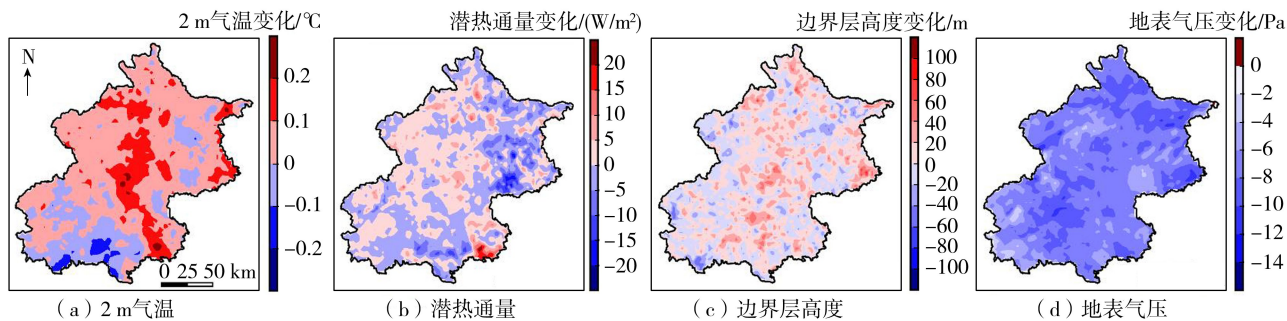


图 8 城市化和非城市化情景气象要素变化

Fig. 8 Changes in meteorological factors between urbanization and non-urbanization scenarios

3.3 对流不稳定性和水汽输送

对流运动将更多热量和水汽输送到高空,增加了对流不稳定性和降水的可能性。城市化导致的反照率降低提升了城区边界层高度,增强了大气对流运动,对流有效位能 (convective available potential energy, CAPE) 上升也显著增强了大气对流不稳定性和上升运动。如图 9(a) 所示,城区 CAPE 明显上升,这种增强的对流活动为降水提供了更多的水汽输送和凝结核,从而增加了降水强度和频率。较高的 CAPE 值通常与更强的降水事件相关,它为对流云的发展和降水的形成提供了更多的能量。然而,在西南山区,尽管观测到降水增多,CAPE 却有所下降。由此可见,CAPE 下降并非导致降水增强的原因,而是对流过程发展的结果。在西南山区,反照率下降导致的热岛环流加强了低层 (850 hPa) 水汽辐合 (图 9(b))。CAPE 下降的区域 (西南山区) 与水汽通量散度降低 (水汽辐合增强) 的区域重合,气流

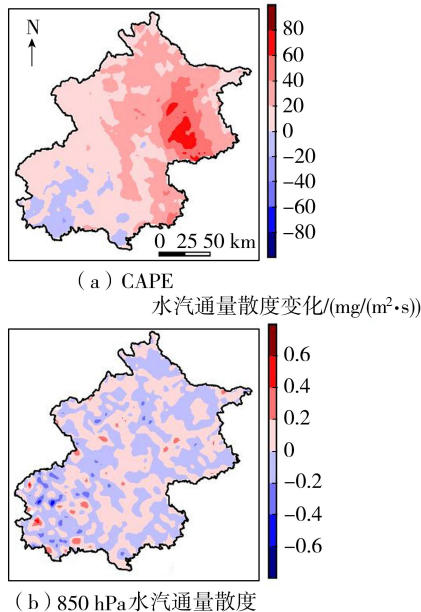


图 9 城市化和非城市化情景 CAPE 和水汽通量散度变化
Fig. 9 Changes in CAPE and divergence of water vapor flux between urbanization and non-urbanization scenarios

向西南山区移动时被地形强迫抬升,导致 CAPE 能量释放,形成强降水,这也解释了西南山区以及城区与山区交界处降水增多的现象。这一现象显示了此次极端降水中热力强迫与地形动力的耦合效应。

3.4 雨前模拟

为进一步探讨城市反照率变化对极端降水形成的先导影响,增加了雨前 24h (2023 年 7 月 28 日 20:00 至 2023 年 7 月 29 日 20:00) 敏感性模拟。保持城市结构和物理参数不变,分析不同反照率条件下局地气候特征的变化,结果如图 10 所示。

模拟结果显示,雨前阶段反照率降低已对局地大气结构产生初步扰动。气温方面,北京城区中西部出现约 $0.1 \sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 的升温,而山区则普遍降温,最大降幅超过 0.2°C (图 10(a)),形成了城区气温偏高、四周郊区及山区相对较冷的热力梯度结构,具备热岛形态。潜热通量整体呈减小趋势,城区变化幅度普遍为 $-5 \sim -15 \text{ W/m}^2$ (图 10(b)),表明尽管地表反照率降低增强了辐射吸收,但短时间内并未转化为显著的蒸发或水汽释放过程。边界层高度空间分布与气温变化基本一致 (图 10(c)),城区边界层高度出现明显抬升,局地增幅达 $40 \sim 60 \text{ m}$,这表明局地地表升温增强了低层不稳定性,在部分区域推动了边界层厚度的增长。气压场整体升高 (图 10(d)),城区气压增幅达 $10 \sim 15 \text{ Pa}$,表明反照率降低虽增强了地表辐射吸收,但由于对流尚未发展,气压变化仍主要由热膨胀主导。CAPE 在城区中部和西部上升,幅度达 $40 \sim 60 \text{ J/kg}$ (图 10(e)),而西南山区则表现为下降,可能受地形扰动与局地冷却影响。图 10(f) 显示,北京南部、东南部及西南山区与城区交界已出现散度下降区域,表明局地水汽辐合在降雨前已初步显现,与雨中阶段的水汽辐合特征具有一致性。

雨前阶段城市反照率降低虽未形成强对流系统或深厚边界层,但在城区尤其是城区西部已表现出较为清晰的热岛效应和 CAPE 局地上升与水汽辐合局地显现的特征,显示出热力与湿度场的整体调整。相

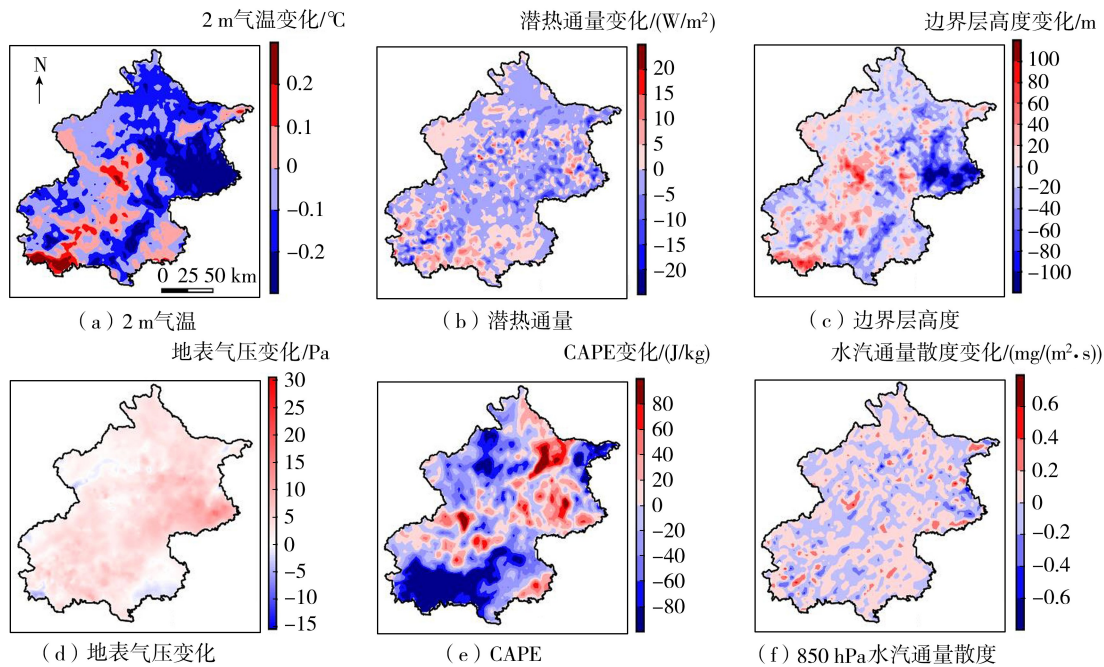


图 10 雨前阶段城市化和非城市化情景气象要素变化

Fig. 10 Changes in meteorological factors between urbanization and non-urbanization scenarios at pre-rainfall stage

较于降雨发生阶段普遍升温、边界层抬升和气压快速下降等显著扰动,雨前阶段更接近于局部能量和水汽的蓄积调整。可见,城市化导致反照率变化对极端降水的影响不仅体现在降雨发生时的直接驱动作用,也通过前期背景调整参与塑造降水发生的有利环境。

4 讨论

根据长期历史观测数据进一步分析城市化发展过程中极端降水的年际变化。对北京市气象站 1991—2021 年极端降水指数时间序列进行研究,所有指数均使用 RCLimindex 软件进行计算。为了确保极端降水指数计算的可靠性,采用 Rhtests_dlyPrp 软件对降水数据进行同质性检验^[27],并利用 RCLimindex 软件的质量控制模块对数据进行阈值检验、极值检验和时间一致性检验,以确保数据的准确性^[28]。世界气象组织(WMO)和世界气候研究计划(WCRP)等机构联合设立了气候变化检测和指数专家组,定义了极端气候指数的含义和计算方法^[29]。本文计算了 1991—2021 年北京年总降水量、 ≥ 20 mm 暴雨日数、极端强降水量和降水强度等指数的年均变化。如表 1 所示,除非城区站点的极端强降水量外,其余指数的年均变化均为正值,呈现上升趋势,反映出较为明显的极端降水增加效应。根据 CNLUCC 的土地利用类型区分城区和非城区站点,以站点为圆心的 2 km 缓冲区内,如果城区面积大于 33%则视为城区站点。城区站点与非城区站点相比,其年总降水量、 ≥ 20 mm 暴雨日数、极端强降水

量和降水强度年均增幅分别高 0.83 mm、0.01 d、0.82 mm、0.02 mm/d,间接说明城市化增强了北京的极端降水。

表 1 1991—2021 年极端降水指数年均变化

Table 1 Annual mean changes in extreme precipitation indices from 1991 to 2021

站点类型	年总降水量/mm	≥ 20 mm 暴雨日数/d	极端强降水量/mm	降水强度/(mm/d)
城区	2.13	0.04	0.76	0.03
非城区	1.30	0.03	-0.06	0.01
全部	1.88	0.04	0.51	0.03

本文以北京“23·7”极端降水事件为背景,通过 WRF 模式模拟分析城市化导致的反照率变化对降水的影响。结果表明,城市化导致反照率降低,显著增加了降水量和降水强度,尤其在城区及下风向地区,这与 Wang 等^[30]研究得出反照率变化可通过热力效应影响京津冀降水的结论相似。模拟结果进一步表明,反照率变化不仅在降水发生时通过增强热力和动力扰动影响降水过程,在雨前阶段已表现出热岛效应初现、边界层厚度增加和水汽辐合局地显现等现象,为后期强降水发展提供了热力与湿度背景^[31]。需要指出的是,本文基于典型事件分析,主要反映城市化导致反照率变化对北京“23·7”极端降水事件的影响,表明反照率降低对本次降水强度的增加具有一定贡献,并不意味着反照率变化可单独决定极端降水的发生。Goessling 等^[1]研究表明,全球城市反照率呈持续下降趋势,这种变化会增强地表净辐射,带来正向辐射强迫效应并加剧城市

热岛效应。城市热岛效应通过增强大气对流、促进低层水汽辐合、增加水汽供应等多种机制影响降水强度、频率和空间分布,而利用新材料和新技术改造建筑墙体、屋顶、道路等基础设施则可通过调整反照率有效缓解城市热岛效应。Santamouris^[32]研究发现绿屋顶和冷屋顶使城镇反照率上升 0.1,预计能使平均气温分别降低 0.3~3℃ 和 0.1~0.33℃。这些技术的核心在于通过增加城市反照率,减少城市表面吸收的太阳辐射,降低地表和环境气温。

5 结 论

a. 城市化导致反照率变化显著改变了极端降水的时空格局,反照率降低导致北京面平均累积降水量增加 11%,小时面平均降水量峰值提升 28%,降水重心向城市下风向偏移,城区及城市下风向的西南山区降水量增幅最为明显,表明反照率下降对降水强度与分布产生了影响。

b. 热力-动力机制揭示了反照率影响降水的关键过程,城市化导致反照率降低,地表气温升高,城区 2 m 气温变化超过 0.2℃,增强了城市热岛效应。城市化使边界层高度抬升 20~60 m,地表气压下降 4~8 Pa,进而增强了大气对流不稳定性 and 低层水汽辐合,为极端降水提供有利条件。

c. 城市化导致的反照率降低通过热力强迫与地形动力的耦合效应,进一步增加了西南山区以及城区和西南山区交界位置的降水强度。

d. 雨前阶段城市反照率降低导致气温局地升高、边界层局地抬升、水汽辐合局地显现等变化,为后期强对流系统的形成提供了热力与湿度条件,说明反照率变化对极端降水的影响不限于降雨时段,也包括雨前背景场的塑造。

参考文献:

[1] Goessling H F, Rackow T, Jung T. Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo[J]. Science, 2025, 387(6729): 68-73.

[2] Wu Shengbiao, Lin Xingwen, Bian Zunjian, et al. Satellite observations reveal a decreasing albedo trend of global cities over the past 35 years [J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 303: 114003.

[3] Chen Jiquan, Lei C, Chu Housen, et al. Overlooked cooling effects of albedo in terrestrial ecosystems [J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(9): 093001.

[4] Ouyang Zutao, Sciusco P, Jiao Tong, et al. Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3800.

[5] Ham Y G, Kim J H, Min S K, et al. Anthropogenic

fingerprints in daily precipitation revealed by deep learning[J]. Nature, 2023, 622(7982): 301-307.

[6] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 6-15. (Zhang Jinliang, Luo Qiushi, Wang Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))

[7] Han Longfei, Wang Luhan, Chen Huimin, et al. Impacts of long-term urbanization on summer rainfall climatology in Yangtze River Delta agglomeration of China [J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(13): e2021GL097546.

[8] 黄国如, 陈易偲. 高度城镇化背景下珠三角地区降雨结构时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 82-90. (Huang Guoru, Chen Yisi. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure in the Pearl River Delta area under background of high urbanization [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 82-90. (in Chinese))

[9] 李致家, 张心愿, 白云鹏, 等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 13-19. (Li Zhijia, Zhang Xinyuan, Bai Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 13-19. (in Chinese))

[10] 张旭旻, 陈颖冰, 李永坤, 等. 雨量数据缺失条件下基于实测流量的北京市“23·7”极端暴雨降水反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 38-44. (Zhang Xumin, Chen Yingbing, Li Yongkun, et al. Precipitation retrieval of the “23·7” extreme rainstorm in Beijing based on measured discharge under the deficiency of rainfall data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 38-44. (in Chinese))

[11] 刘家宏, 骆卓然, 张永祥, 等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 100-105. (Liu Jiahong, Luo Zhuoran, Zhang Yongxiang, et al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 100-105. (in Chinese))

[12] 荆浩, 亢妍妍, 吴宏议, 等. 北京“23·7”极端强降雨特征和成因分析[J]. 气象, 2024, 50(5): 616-629. (Jing Hao, Kang Yanyan, Wu Hongyi, et al. Characteristics and causes of the July 2023 extremely torrential rain in Beijing [J]. Meteorological Monthly, 2024, 50(5): 616-629. (in Chinese))

[13] 刘家宏, 梅超, 王佳, 等. 北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(9): 50-55. (Liu Jiahong, Mei Chao, Wang Jia, et al.

- Flood survey of “23 · 7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing [J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(9): 50-55. (in Chinese))
- [14] Gu Jun, Zhao Chun, Xu Mingyue, et al. Fast warming over the Mongolian Plateau a catalyst for extreme rainfall over North China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(8): e2024GL113737.
- [15] Chang Ming, Fan Shaofen, Fan Qi, et al. Impact of refined land surface properties on the simulation of a heavy convective rainfall process in the Pearl River Delta region, China [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 50(Sup1): 645-655.
- [16] 王玉洁, 向洋, 陆波. 多层城市冠层模型参数优化及对京津冀城市群的高温模拟 [J]. *气候与环境研究*, 2021, 26(6): 663-677. (Wang Yujie, Xiang Yang, Lu Bo. Parameter optimization of multi-layer urban canopy model and simulation of extreme high temperature in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021, 26(6): 663-677. (in Chinese))
- [17] 王咏薇, 伍见军, 杜钦, 等. 不同城市冠层参数化方案对重庆高密度建筑物环境的数值模拟研究 [J]. *气象学报*, 2013, 71(6): 1130-1145. (Wang Yongwei, Wu Jianjun, Du Qin, et al. Numerical study of the Chongqing high-density buildings environment by the WRF with the different urban canopy schemes [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71(6): 1130-1145. (in Chinese))
- [18] Hong Songyou, Dudhia J, Chen Shuhua. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 103-120.
- [19] Chen Fei, Kusaka H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(2): 273-288.
- [20] Wang Jun, Feng Jinming, Yan Zhongwei, et al. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D21): D21103.
- [21] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2004, 43(1): 170-181.
- [22] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [23] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [24] 冯焱, 冯海霞. 北京地区地表反照率 TM 数据反演与分析 [J]. *测绘科学*, 2012, 37(5): 164-166. (Feng Yan, Feng Haixia. TM data retrieval and analysis of Beijing area surface albedo [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2012, 37(5): 164-166. (in Chinese))
- [25] Zhang Han, Wu Chuanhao, Chen Wenjie, et al. Effect of urban expansion on summer rainfall in the Pearl River Delta, South China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 747-757.
- [26] 邹家祥, 段存存, 陈彬, 等. 气候变化下基于经济损失量化的北京市内涝韧性评估 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 85-94. (Zou Jiaxiang, Duan Cuncun, Chen Bin, et al. Assessment of waterlogging resilience in Beijing based on quantification of economic losses under climate change [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 85-94. (in Chinese))
- [27] Wang X L, Feng Yang. RHtests_dlyPrp user manual [R]. Toronto: Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada, 2013.
- [28] Zhang Xuebin, Yang Feng. RClimDex (1.0) user manual [R]. Downsview: Climate Research Branch, Environment Canada, 2004.
- [29] Klein Tank A M G, Zwiers F W, Zhang X. Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2009 (WMO-TD No. 1500).
- [30] Wang Jun, Feng Jinming, Yan Zhongwei. Potential sensitivity of warm season precipitation to urbanization extents: modeling study in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(18): 9408-9425.
- [31] Wei Feili, Li Shuangcheng, Liu Dahai, et al. Analysis of the driving factors of precipitation change during the development of the Jing-Jin-Ji urban agglomeration [J]. *Urban Climate*, 2023, 51: 101613.
- [32] Santamouris M. Cooling the cities: a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments [J]. *Solar Energy*, 2014, 103: 682-703.

(收稿日期: 2025-03-04 编辑: 施业)