



城市水文过程对城市气象 及热岛影响的模拟研究

王学远

xueyuan@nju.edu.cn

2020/11/20



主要内容

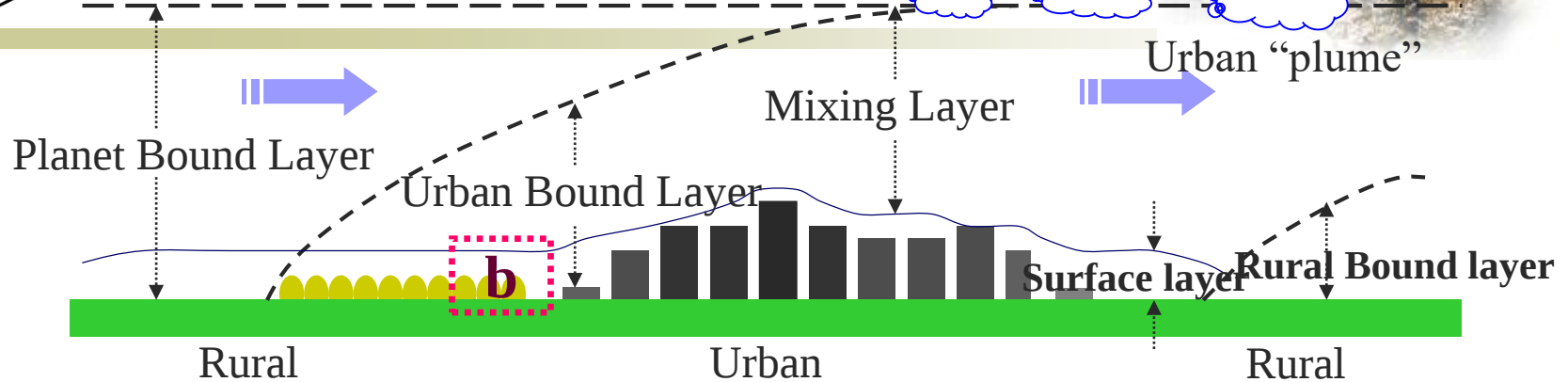


- 1. 研究背景及方法
- 2. 城市水文过程对夏季城市能量平衡及气象场的影响
- 3. 城市水文过程对热岛强度及人体舒适度的影响
- 4. 总结及展望

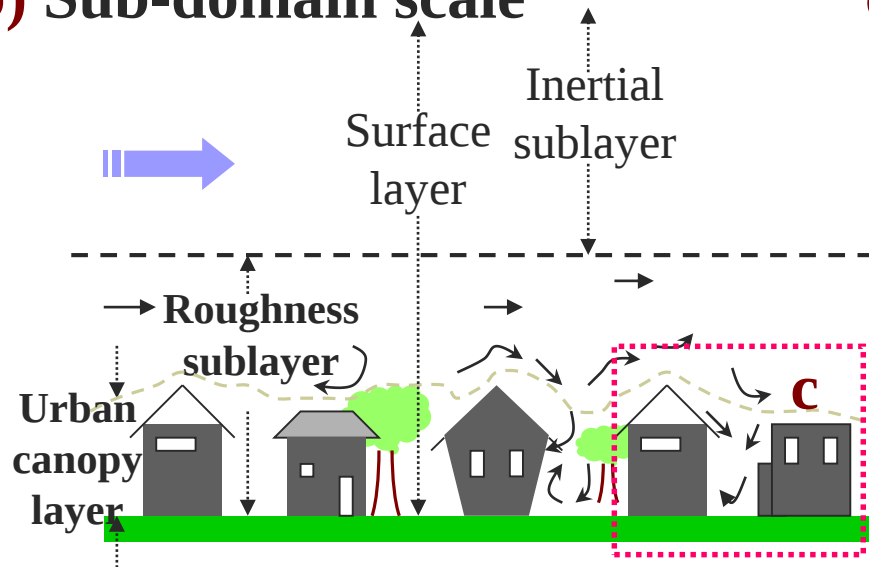


1.1 研究背景

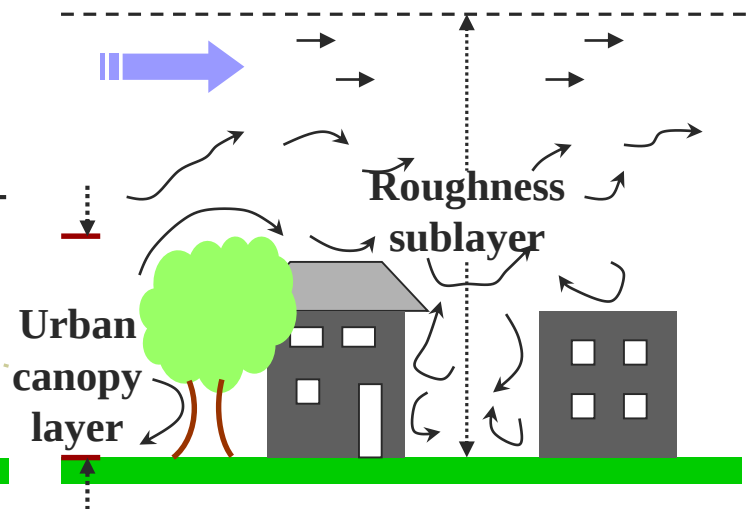
a) Urban regional scale



b) Sub-domain scale



c) Microscale



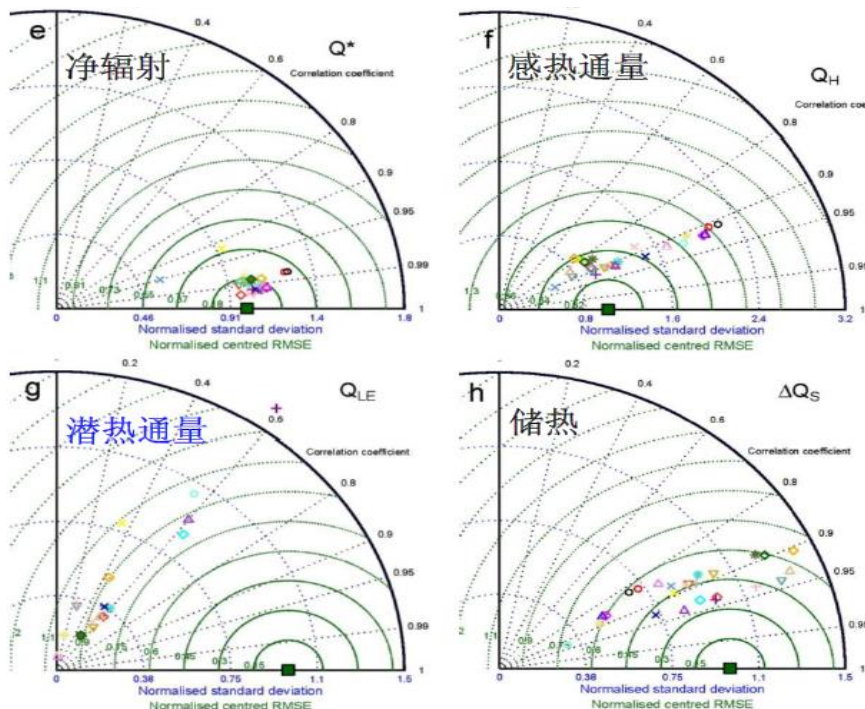
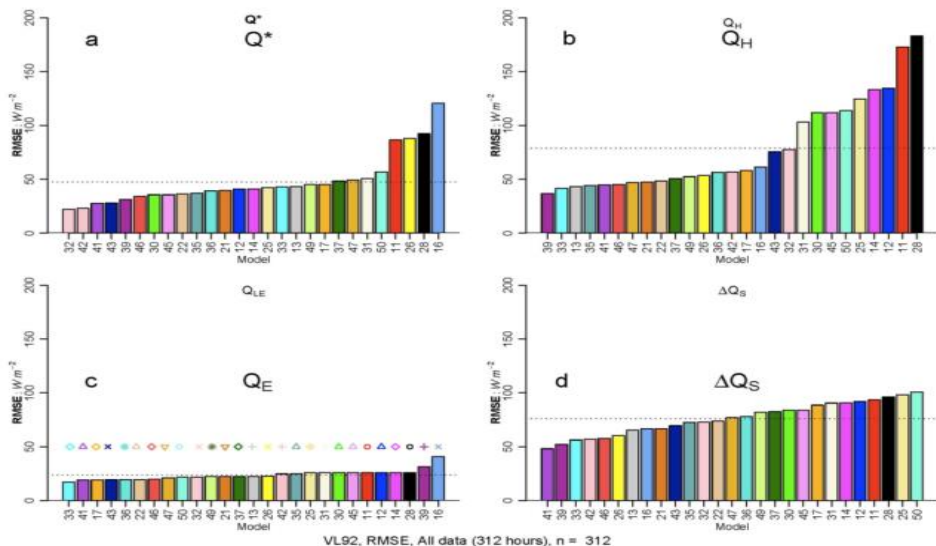
Schematic of the urban boundary layer (including its vertical layers and scales)

(C.S.B.Grimmond 2005)



1. 1研究背景

国际城市地表能量平衡模式比较计划
(全球33个城市冠层模式)



- 所有模式严重高估 Q_H 、低估 Q_E
- 对 Q_E 的模拟效果最差
- 城市水文过程、植被等作用非常重要

(Grimmond et al., 2010, JAMC)

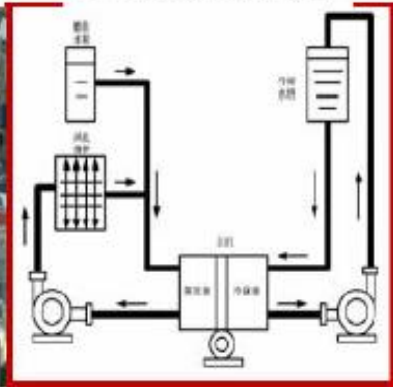


1.2 城市水文过程参数化方案

城市交通



空调系统

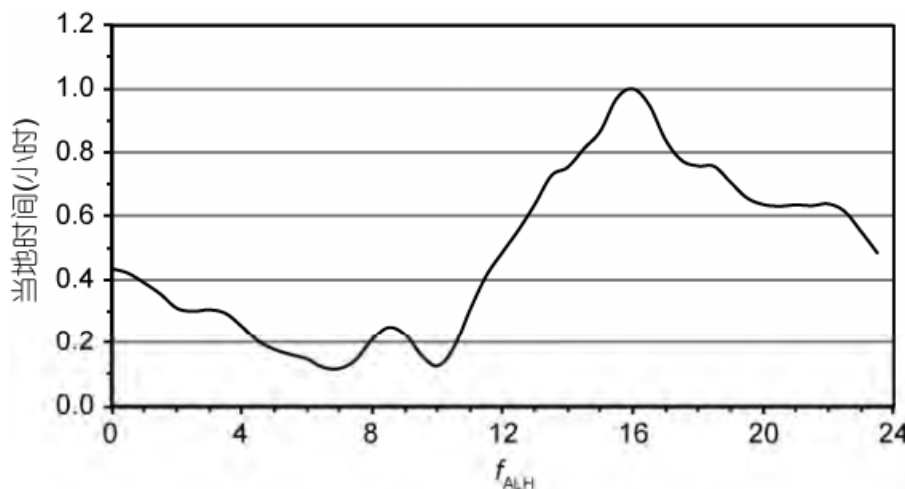




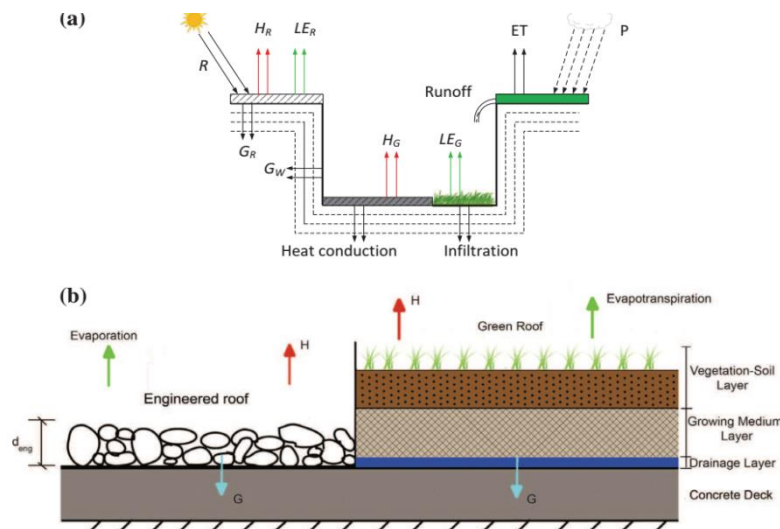
1.2 城市水文过程参数化方案



- 人为潜热 ($LIR: 20 \text{ W/m}^2$, $HIR: 25 \text{ W/m}^2$, $COI: 40 \text{ W/m}^2$)
- 绿色屋顶 (20%)：蒸散、入渗、储水、径流、蒸发
- 绿地浇水 (06:00~10:00, 16:00~18:00)：5-9月通过浇水使得0~0.4m土壤达到田间持水量 (0.33, 蒸腾不受到抑制的临界土壤湿度)
- 不透水面蒸发：水桶模型，包括：降水、蒸发、地表积水 (墙壁0.2mm, 屋顶和不透水地表1mm)、地表径流
- 绿洲效应系数：1.5



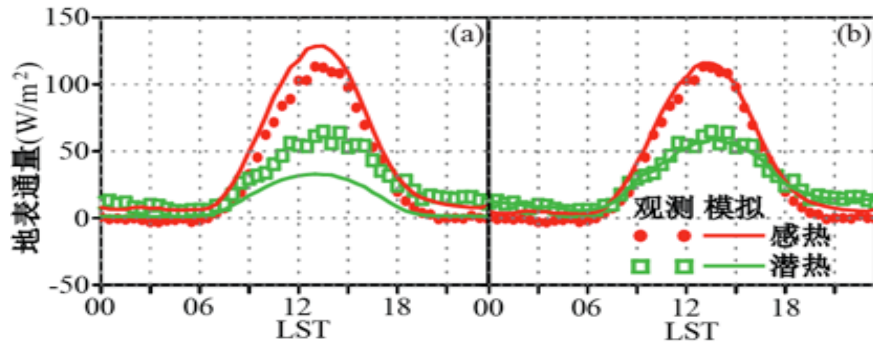
人为潜热排放日变化系数 (Miao and Chen, 2014)



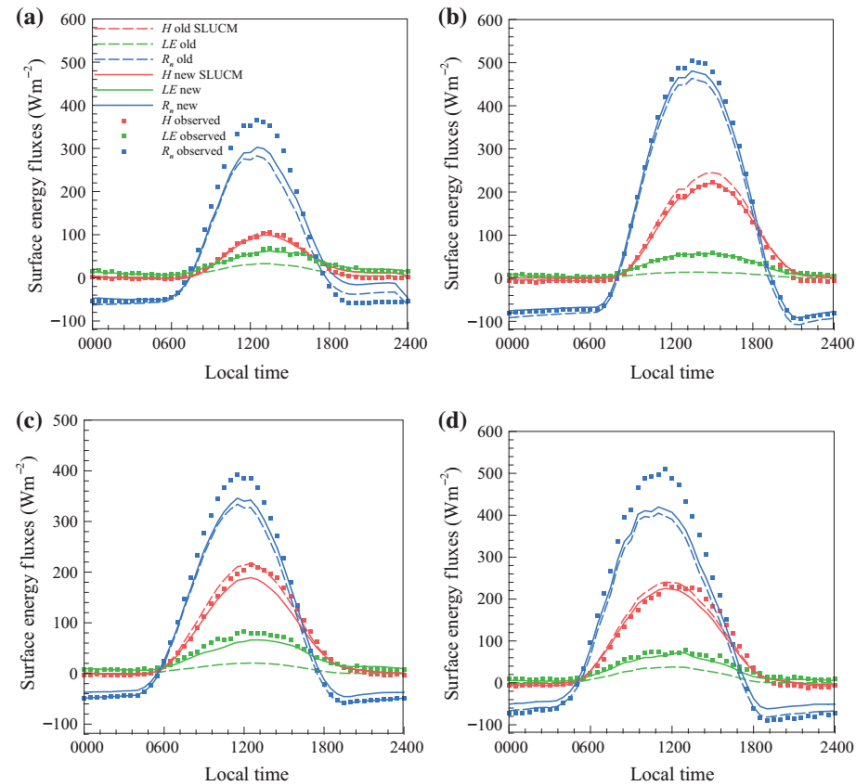
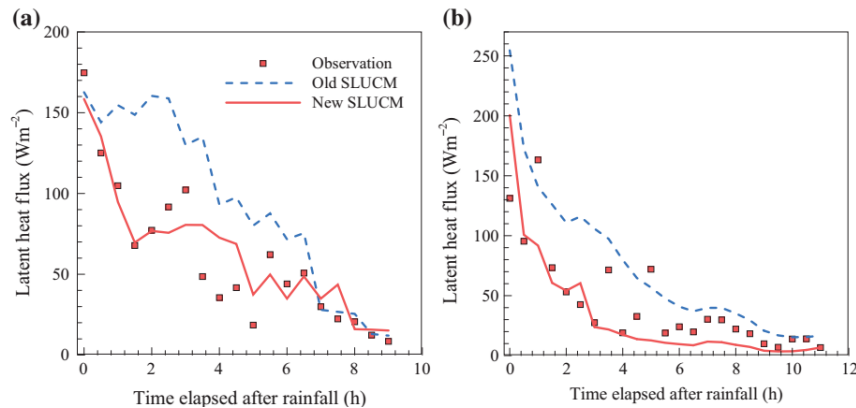
冠层方案及绿色屋顶设置 (Yang et al., 2015 BLM)



1.3 城市水文过程参数化方案离线检验



(2009.7.1~2010.7.1, 北京, Miao and Chen, 2014)

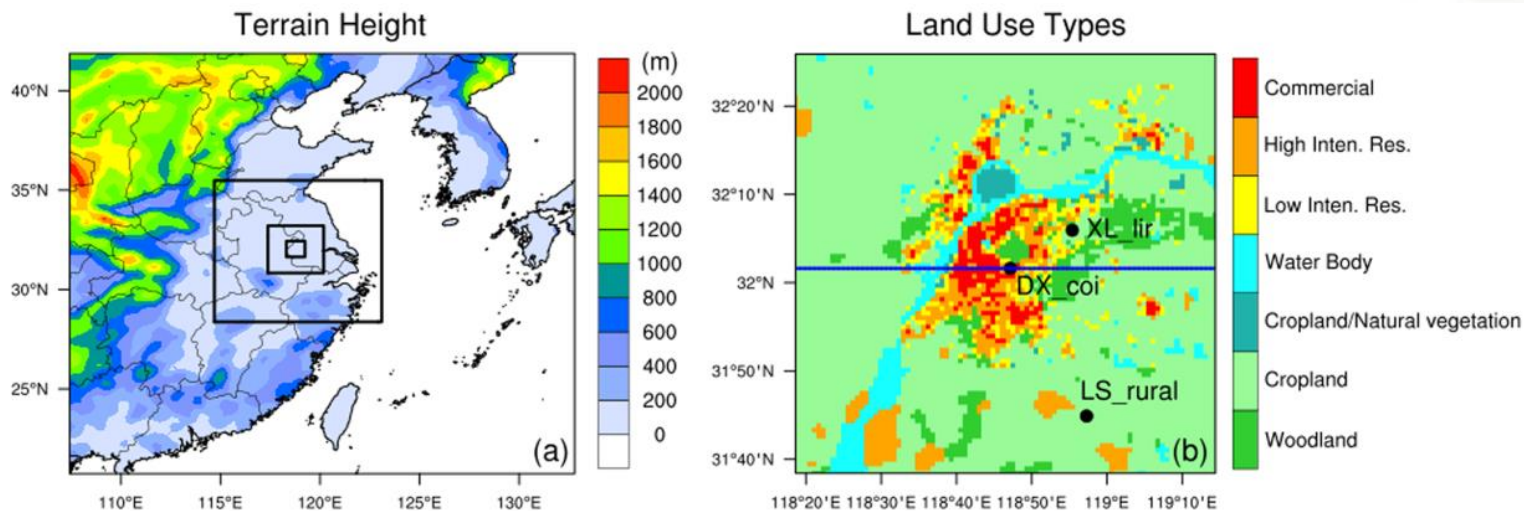


Beijing, Phoenix, Vancouver, Montreal年平均 Q_H , Q_E , R_n
(Yang et al., 2015 BLM)

北京：09年7-8月四次降水过程 Phoenix：12年7-8月四次降水过程



2.1 模式设置



WRFV3.8.1

四层嵌套（90×90），网格距：27、9、3、1km

垂直方向：顶高100 hPa，78层

城市下垫面：LIR, HIR, COI

模拟时段：2013年7月

名称	设置
NONE	采用WRF-SLUCM默认参数设置+城市人为热
ALH	Case1 + 城市人为水汽排放
GRO	Case1 + 城市绿色屋顶
EIMP	Case1 + 城市不透水面蒸发
IRR	Case1 + 城市绿地灌溉
OASIS	Case1 + 城市绿洲效应
ALL	Case2+Case3+Case4+Case5+Case6



2.2 模拟结果检验

不同方案气象要素和地表能量平衡分量模拟值与观测值比较



Cases	Statistics	WSa (m s ⁻¹)	Ta (°C)	Qa (g kg ⁻¹)	RHa (%)	Q _H (W m ⁻²)	Q _E (W m ⁻²)	R _n (W m ⁻²)
NONE	ME	0.54	0.03	-0.16	-0.27	25.35	-25.46	23.51
	RMSE	1.70	1.87	1.41	8.98	61.96	61.60	55.87
ALH	ME	0.54	0.03	-0.09	-0.09	25.26	-19.90	23.72
	RMSE	1.70	1.87	1.41	8.93	61.21	59.15	55.99
GRO	ME	0.51	0.00	-0.12	-0.02	22.11	-21.87	23.58
	RMSE	1.70	1.86	1.40	8.92	56.22	58.28	56.02
EIMP	ME	0.52	0.03	-0.14	-0.25	25.19	-24.90	23.19
	RMSE	1.70	1.87	1.41	8.93	61.13	60.61	56.65
IRR	ME	0.52	0.02	-0.15	-0.19	24.56	-25.15	23.40
	RMSE	1.70	1.86	1.41	8.96	60.61	61.11	56.83
OASIS	ME	0.42*	-0.14*	0.05*	1.03*	12.22*	-1.15*	26.12
	RMSE	1.66	1.82	1.37	8.76	39.71	38.62	57.98
ALL	ME	0.40*	-0.22*	0.19*	1.52*	7.29*	9.81*	27.08
	RMSE	1.64	1.81	1.38	8.84	32.95	36.11	57.82



2.2 模拟结果检验



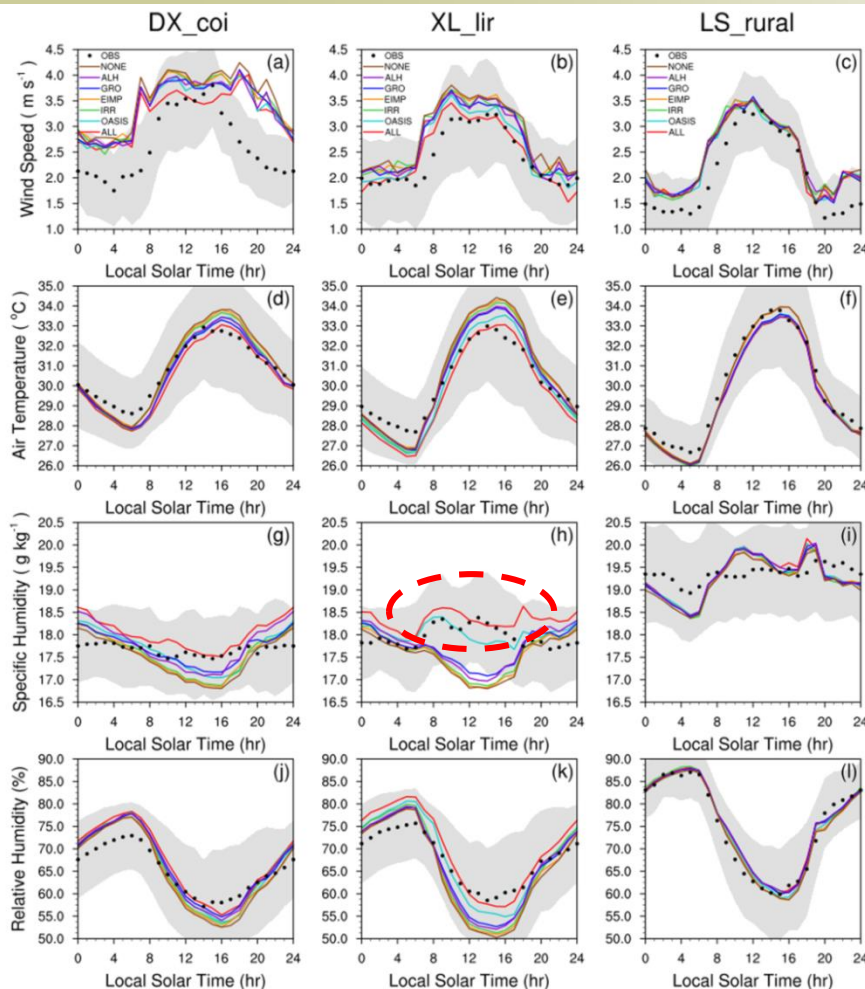
ALL方案3个站点气象要素和地表能量平衡分量模拟值与观测值比较

Site	Statistics	WSa (m s^{-1})	Ta ($^{\circ}\text{C}$)	Qv (g kg^{-1})	RHa (%)	Q _H (W m^{-2})	Q _E (W m^{-2})	R _n (W m^{-2})
DX_coi	R	0.51	0.81	0.68	0.75	0.80	0.57	0.90
	ME	0.71	-0.3	0.28	1.76	24.25	-3.86	21.94
	RMSE	1.98	1.89	1.31	9.29	45.81	26.74	59.30
XL_lir	R	0.65	0.84	0.61	0.76	0.78	0.91	0.90
	ME	0.14	-0.1	0.36	2.21	8.72	6.85	31.55
	RMSE	1.46	1.82	1.39	9.61	23.71	30.73	62.52
LS_rural	R	0.63	0.89	0.55	0.85	0.90	0.89	0.94
	ME	0.33	-0.17	-0.05	0.83	-10.49	25.64	27.54
	RMSE	1.41	1.71	1.43	7.47	25.35	46.94	51.02

➤ DX（COI站点）气象要素模拟效果较差，Q_v，Q_E改善较大



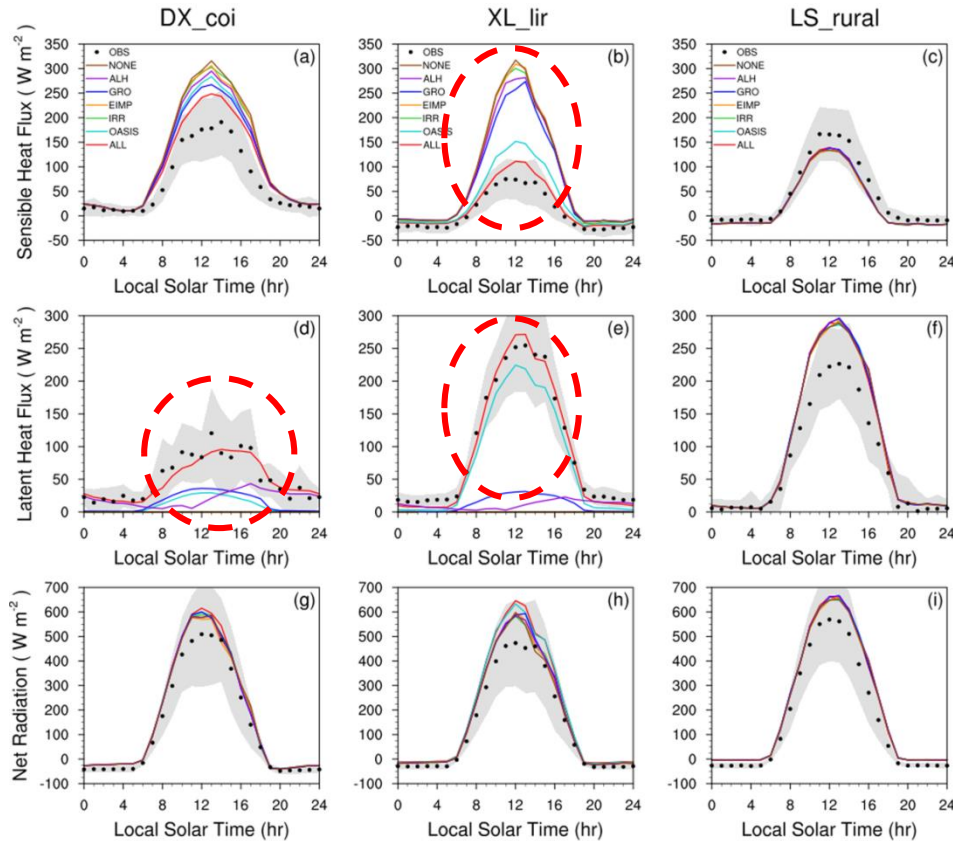
2.2 WS, Ta, Qv, RH观测和模拟的日变化



- LIR(XL站)改进最明显（绿洲效应）
- ALL方案模拟的气象要素改进明显，OASIS贡献最大，IRR和EIMP最小
- 风速减小0.5m/s（中午）
气温降低1~1.5° C（15:00）
比湿增加0.75~1.5 g/kg
相对湿度增加3%和7.5%



2.2 Q_H , Q_E , R_n 观测和模拟的日变化

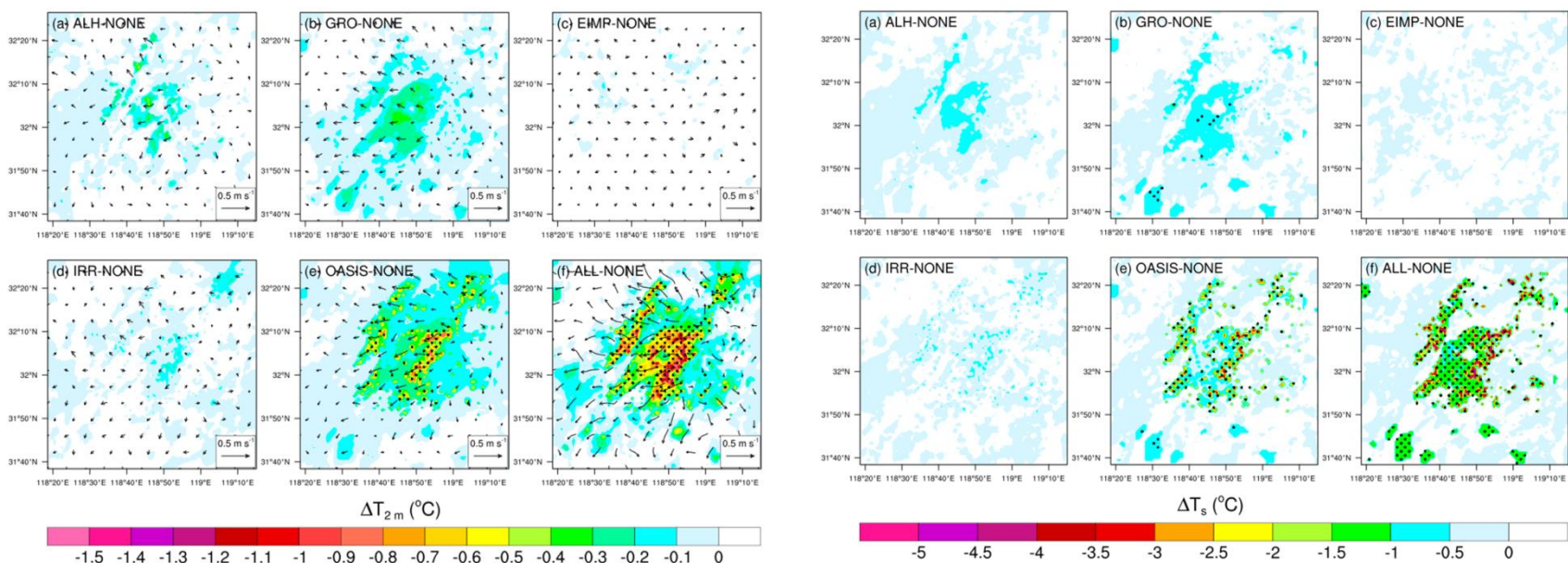


- NONE算例显著高估 Q_H 、低估 Q_E
- LIR(XL站)改进最明显
- Q_H 最大可减小70和220 W/m^2
- Q_E 最大可增加90和260 W/m^2
- ALH夜间影响比白天大（排放源影响）

2.2 城市水文过程对气温和地表温度影响



各方案相对于NONE方案的差异，圆点表示通过t检验的95%置信水平

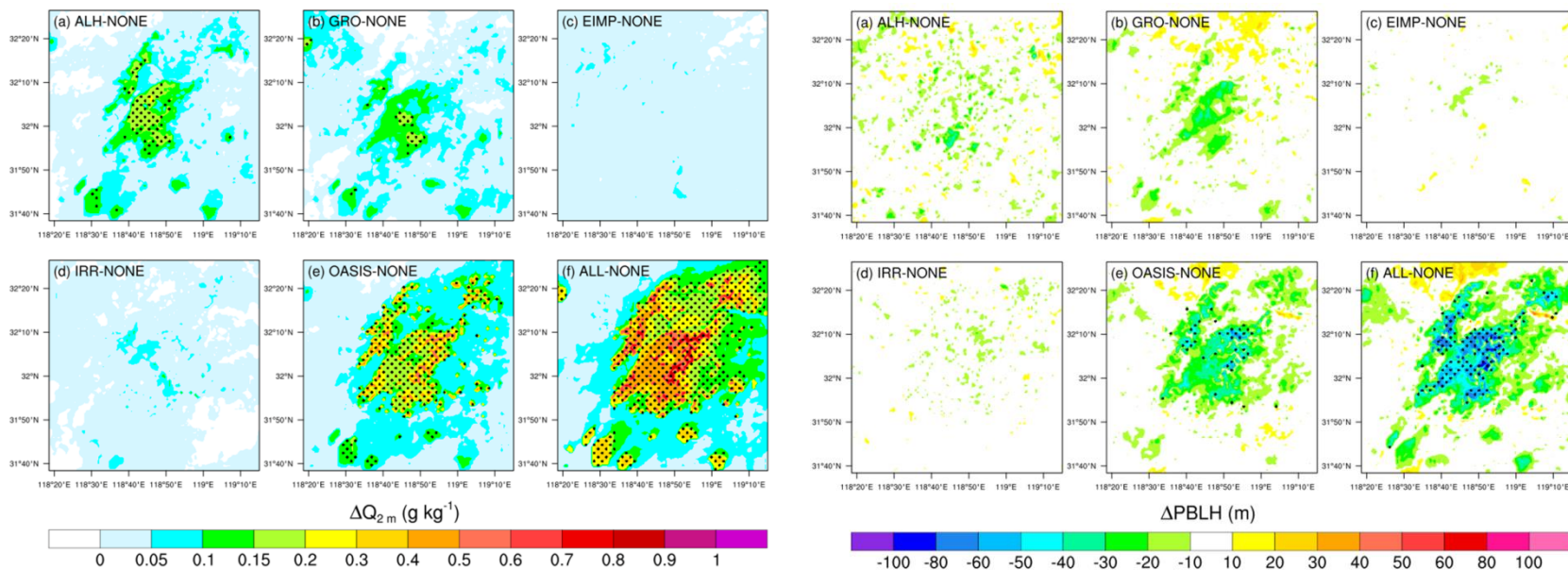


- ALH主要影响商业区、IRR和OASIS主要影响低密度城市区、GRO在不同类型城市下垫面作用相当
- 气温、地表温度降低，导致风场辐散趋势

2.2 城市水文过程对比湿和边界层高度影响

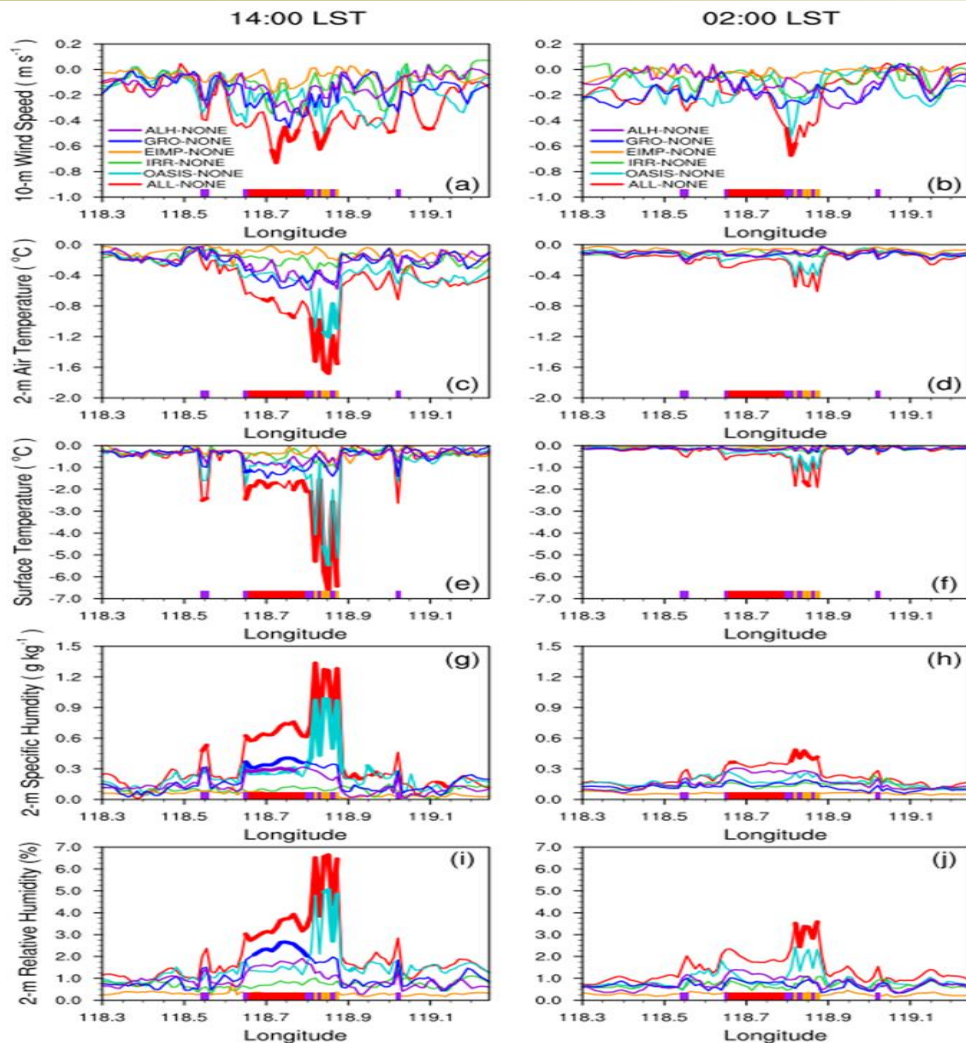


各方案相对于NONE方案的差异，圆点表示通过t检验的95%置信水平





2.2 城市水文过程对14:00和02:00气象要素影响



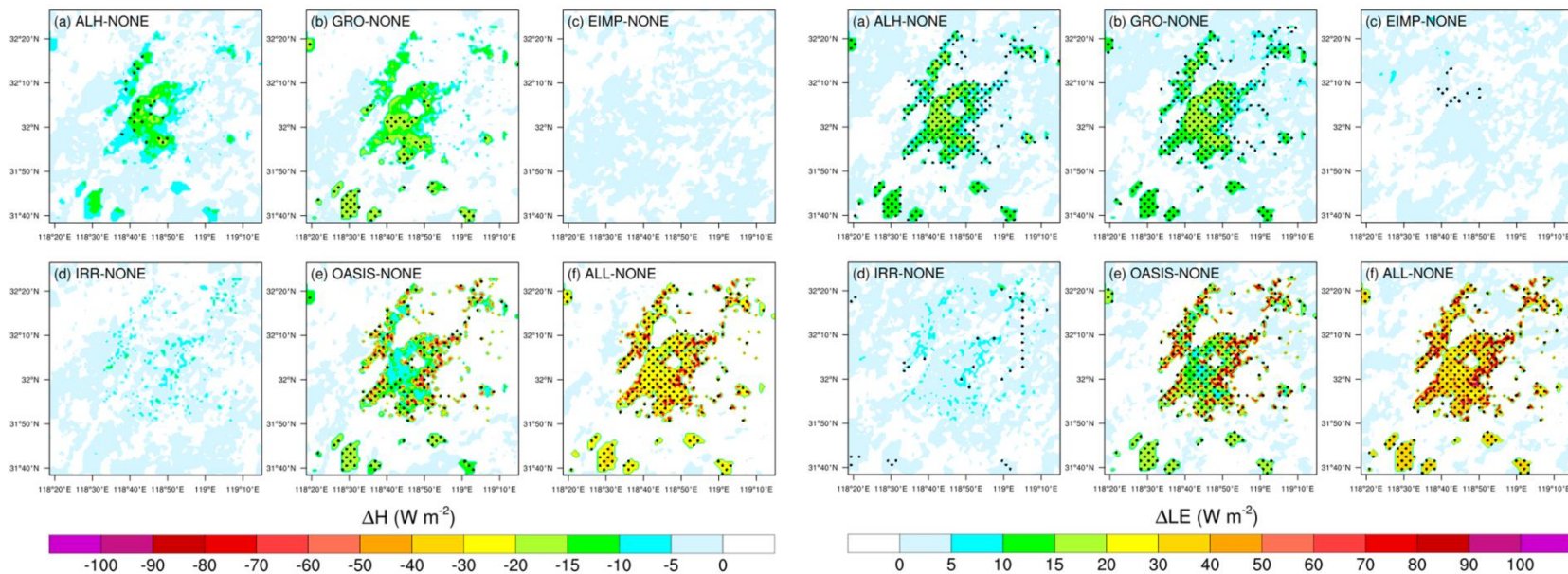
- ▶ 白天影响显著，夜间影响较小
- ▶ COI地区：GR作用略大于ALH和OASIS
- ▶ LIR地区：OASIS作用最大
- ▶ LIR 14:00差异
 T_{2m} : 1.6°C
 T_s : 6.0°C
 Q_v : 1.3g/kg
 RH_{2m} : 6.6%

各方案相对于NONE方案的差异，粗线表示通过t检验的95%置信水平
经线：红色-COI、紫色-HIR、橘色-LIR

2.2 城市水文过程对 Q_H 和 Q_E 影响



各方案相对于NONE方案的差异，圆点表示通过t检验的95%置信水平



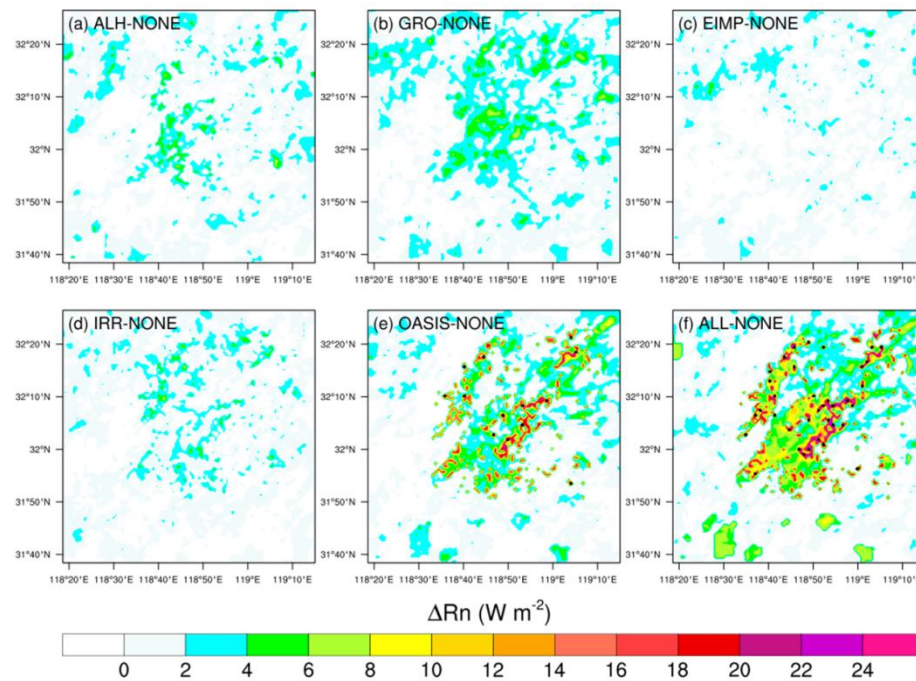
- 对 Q_E 影响略大，比 Q_H 差异略多 $5-10W/m^2$ 左右，空间分布相似
- ALL方案： Q_E 增加 $30\sim40W/m^2$ （COI）和 $90W/m^2$ （LIR）



2.2 城市水文过程对 R_n 影响

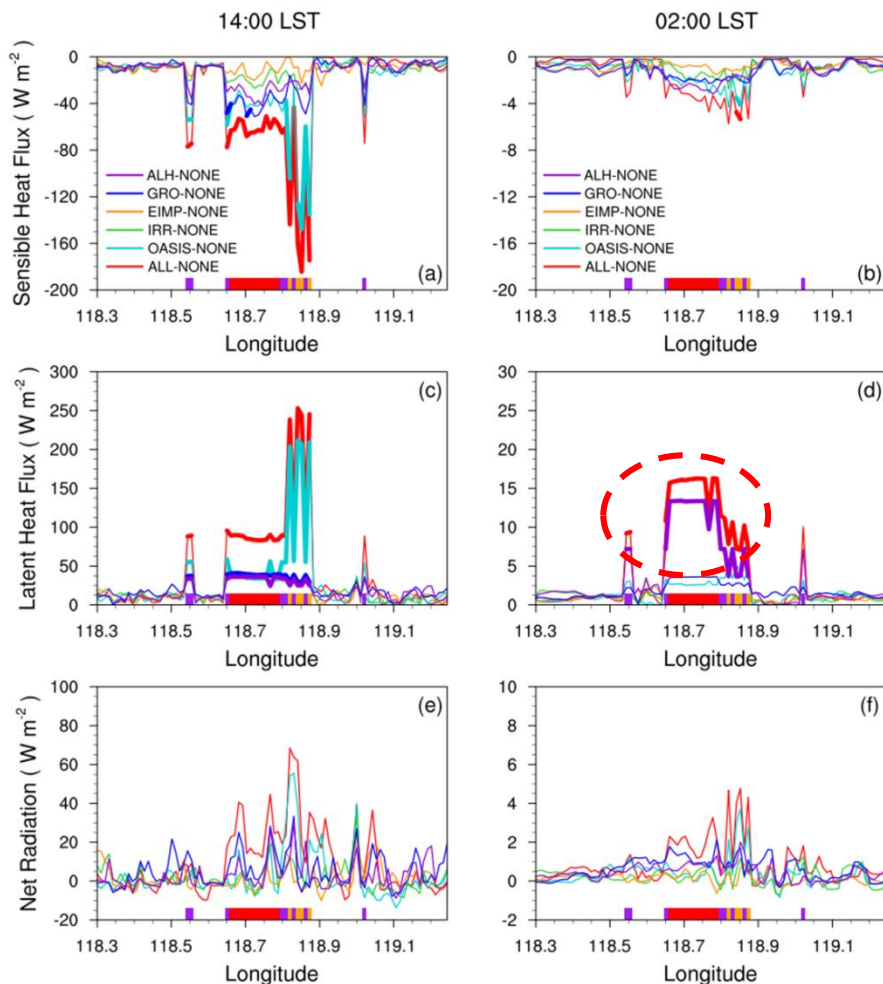


各方案相对于NONE方案的差异，圆点表示通过t检验的95%置信水平





2.2 城市水文过程对14:00和02:00地表能量平衡影响

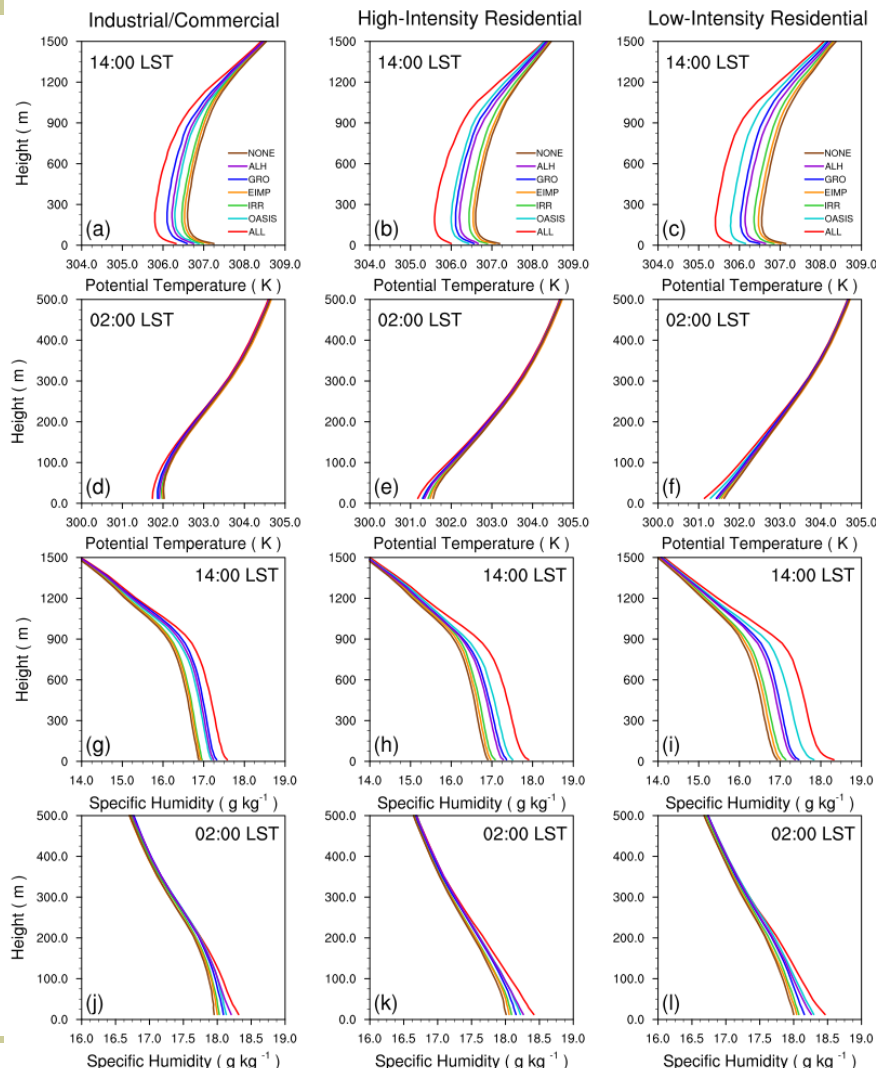


- ▶ 白天影响显著，夜间影响较小
- ▶ 夜间ALH对 Q_E 影响较大
- ▶ LIR 14:00差异
 Q_H : $180W/m^2$
 Q_E : $250W/m^2$
 R_n : $70W/m^2$

各方案相对于NONE方案的差异，粗线表示通过t检验的95%置信水平
经线：红色-COI、紫色-HIR、橘色-LIR



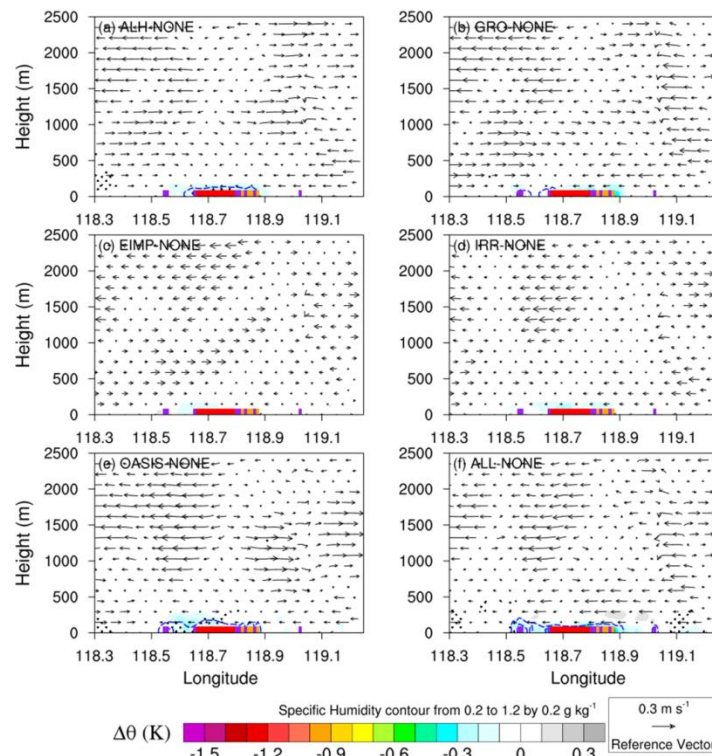
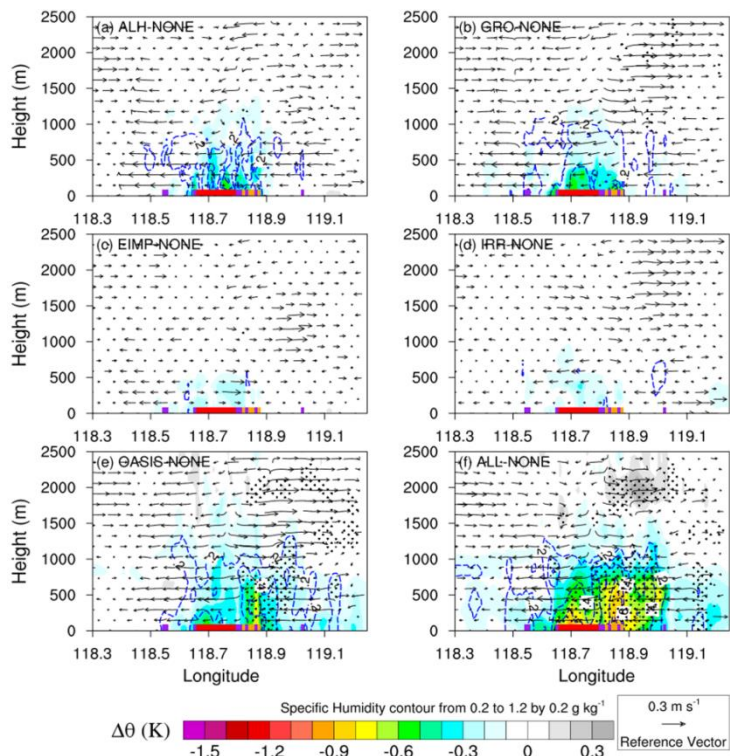
2.2 城市水文过程对14:00和02:00位温和比湿廓线影响



- ▶ 白天影响显著，夜间影响较小
- ▶ 影响高度与PBLH一致
- ▶ COI影响小，LIR影响大
- ▶ 14:00位温差异：0.8、1.1、1.3K
- ▶ 14:00比湿差异：0.7、1.0、1.3 g/kg



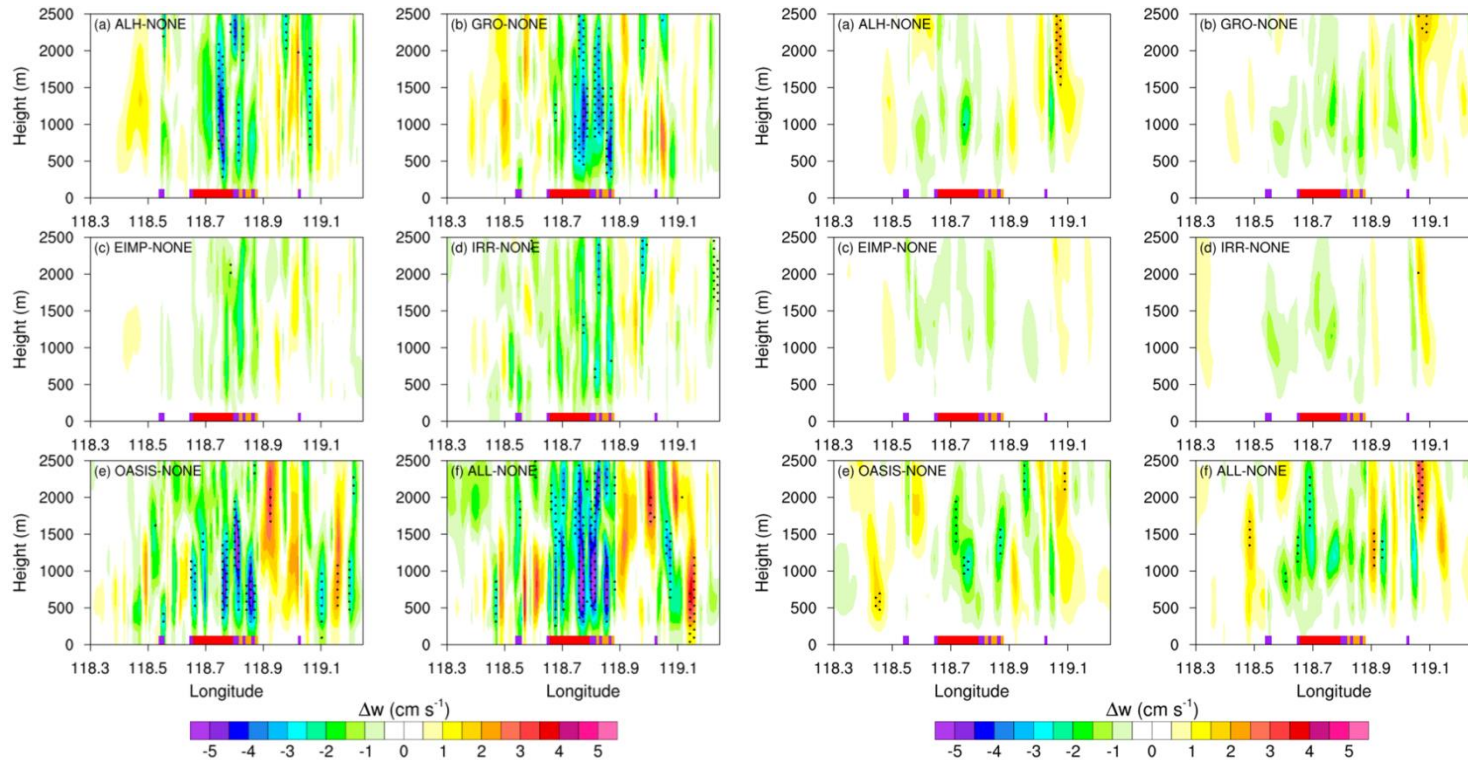
2.2 城市水文过程对14:00和02:00经向位温、风速和比湿影响



- 降温、增湿，导致辐散趋势
- 影响高度与PBLH一致
- COI影响小，LIR影响大
- 边界层顶部反转

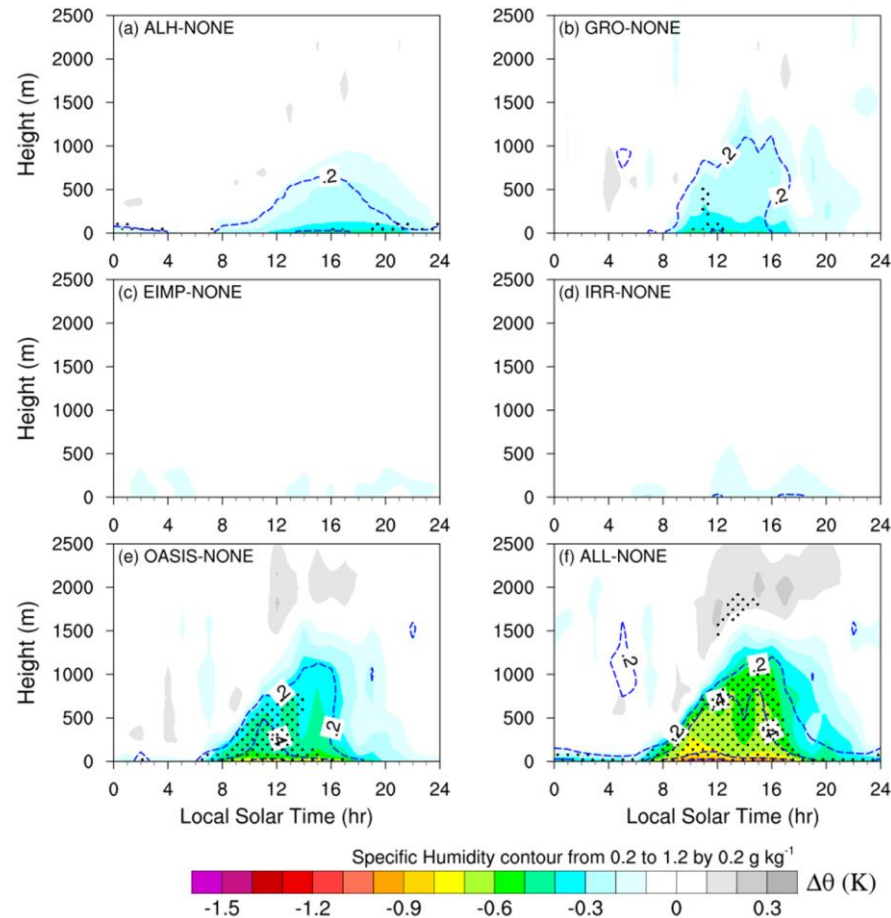


2.2 城市水文过程对14:00和02:00经向垂直风速影响





2.2 城市地区平均的位温和比湿廓线差异日变化

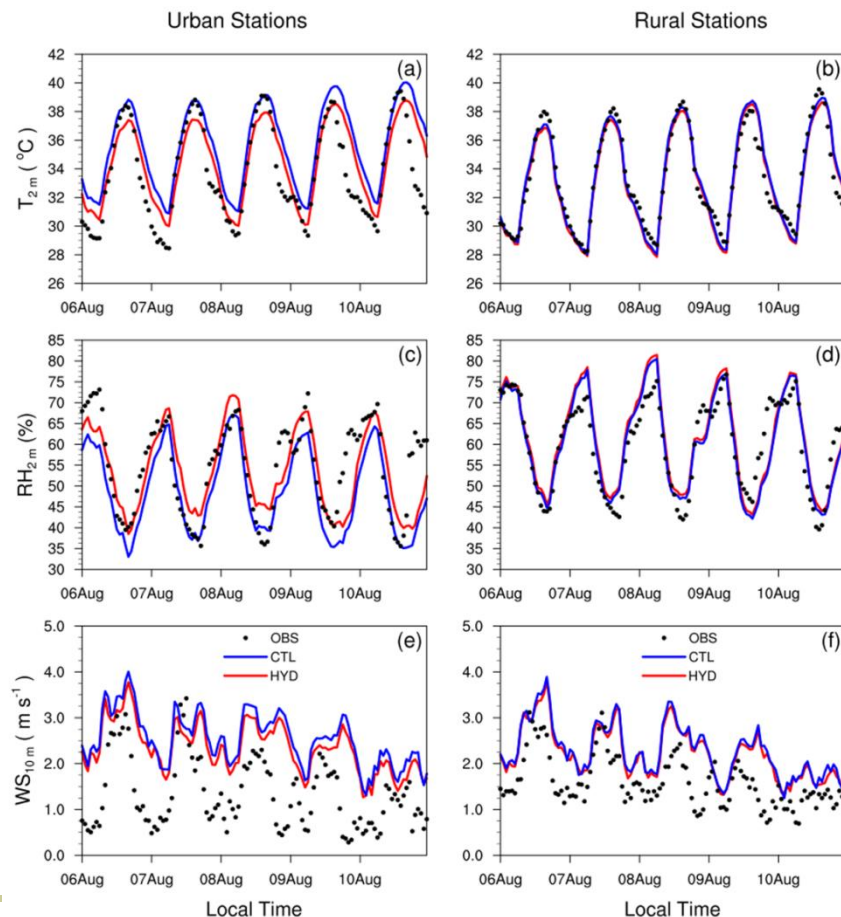




3. 城市水文过程对热岛强度及人体舒适度影响



- 模拟时段：2013.8.06~8.10（高温热浪过程）
- 46个自动气象站，城市26（COI:10, HIR:12, LIR:4），郊区20

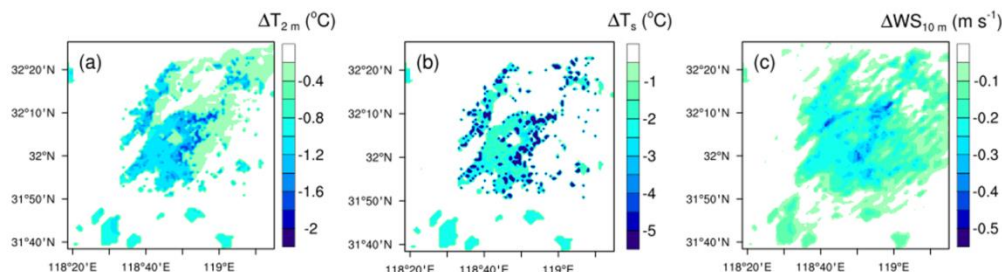


(Wang et al., 2020, JGR, in press)

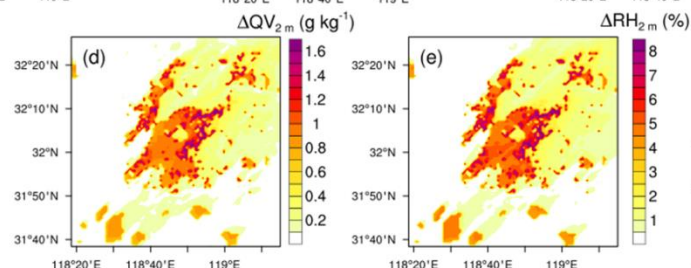
城市与郊区站气象要素观测与模拟对比



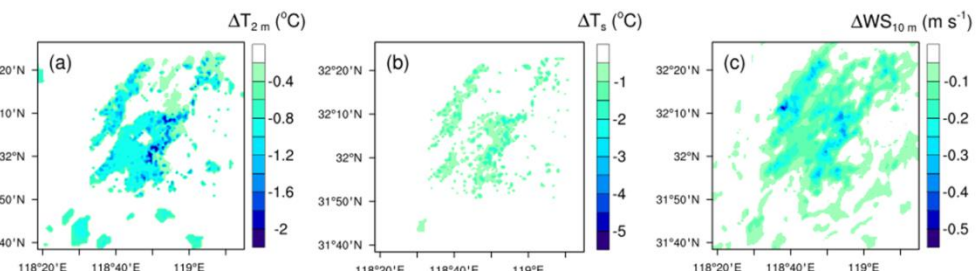
3. 城市水文过程对白天、夜间气象要素的影响



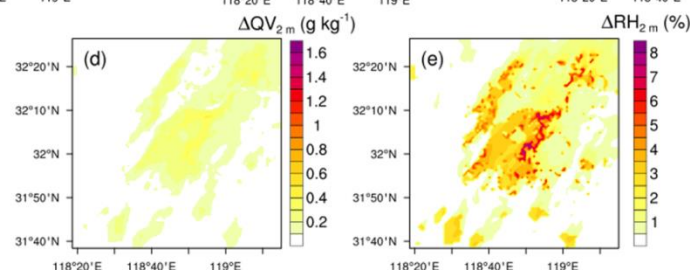
白天



- 白天 T_{2m} 影响超过 1.6°C (LIR)
- LIR地区 T_{sk} 影响显著超过COI和HIR
- T_{sk} 和 Q_v 日夜差异明显



夜间



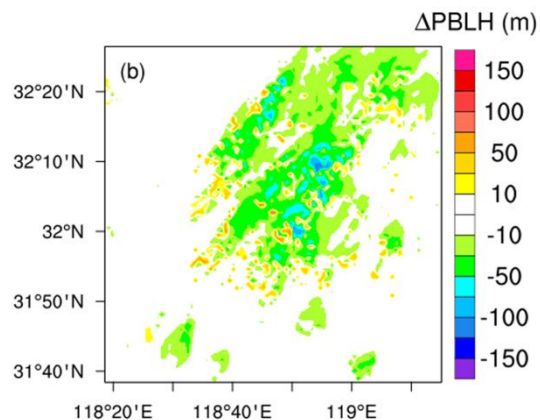
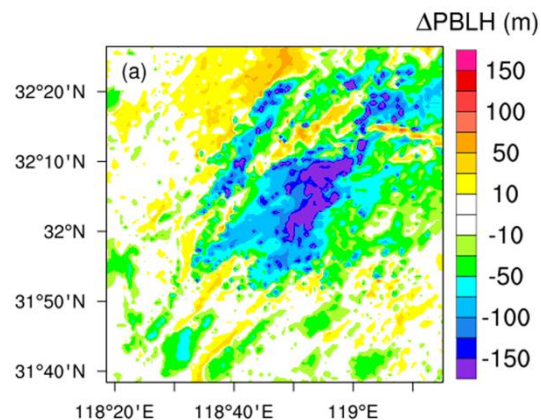


3. 城市水文过程对边界层高度及稳定度的影响



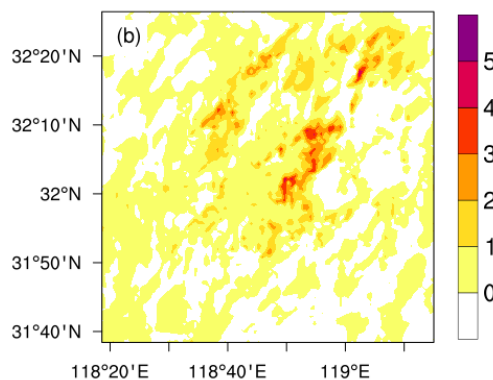
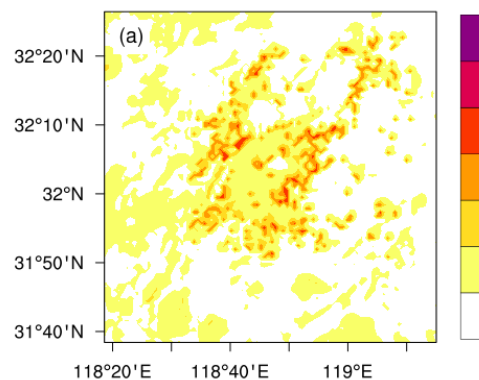
白天

夜间



➤ PBLH减小（白天）
LIR: >150m
COI: 75~100m

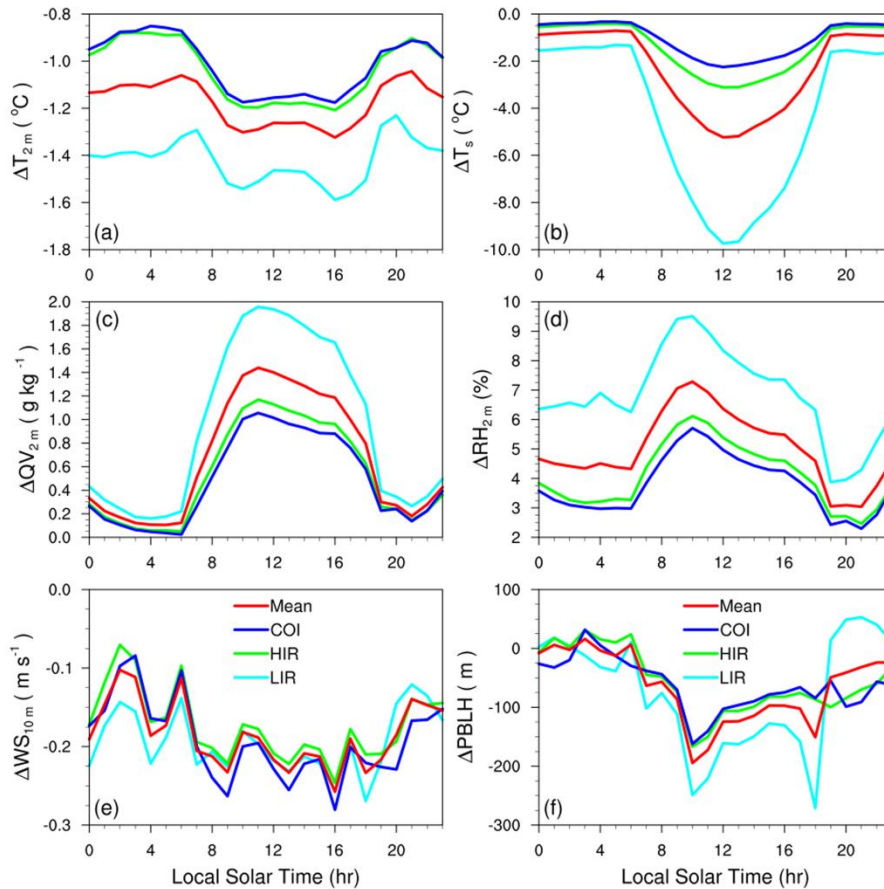
static stability ($10^{-3} K Pa^{-1}$)



➤ 稳定度增加很小



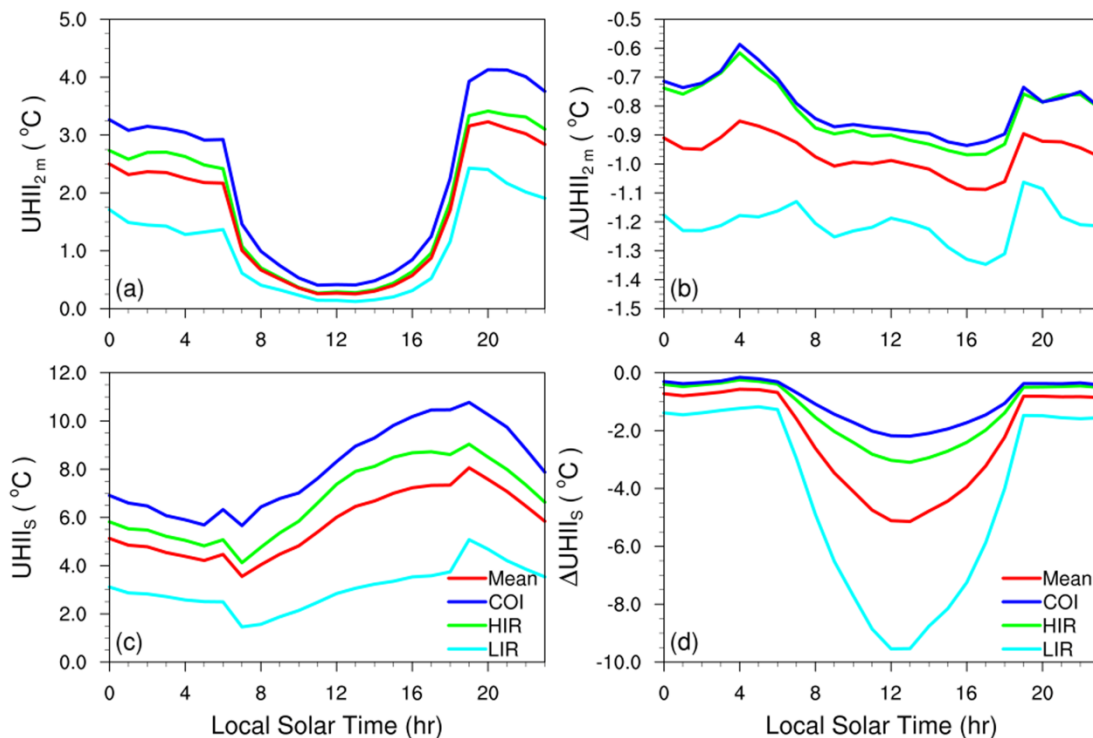
3. 城市水文过程对不同城市类型气象要素影响日变化



- 白天影响高于夜间
- LIR地区影响大于COI, HIR与COI接近
- Tsk和RH_{2m}差异 (LIR/COI) 最明显, 而且影响最大



3. 城市水文过程对不同城市类型热岛强度影响日变化



- $UHII_{2m}$ (HYD) 夜间高, $COI > LIR$, 最高达到 $4^{\circ}C$
- $UHII_s$ (HYD) 傍晚高, $COI > LIR$, 最高达到 $11^{\circ}C$
- 城市水文过程能够显著减小 $UHII_{2m}$ 和 $UHII_s$ (LIR: $1.3^{\circ}C$ 和 $10^{\circ}C$)



3. Heat Stress Metrics

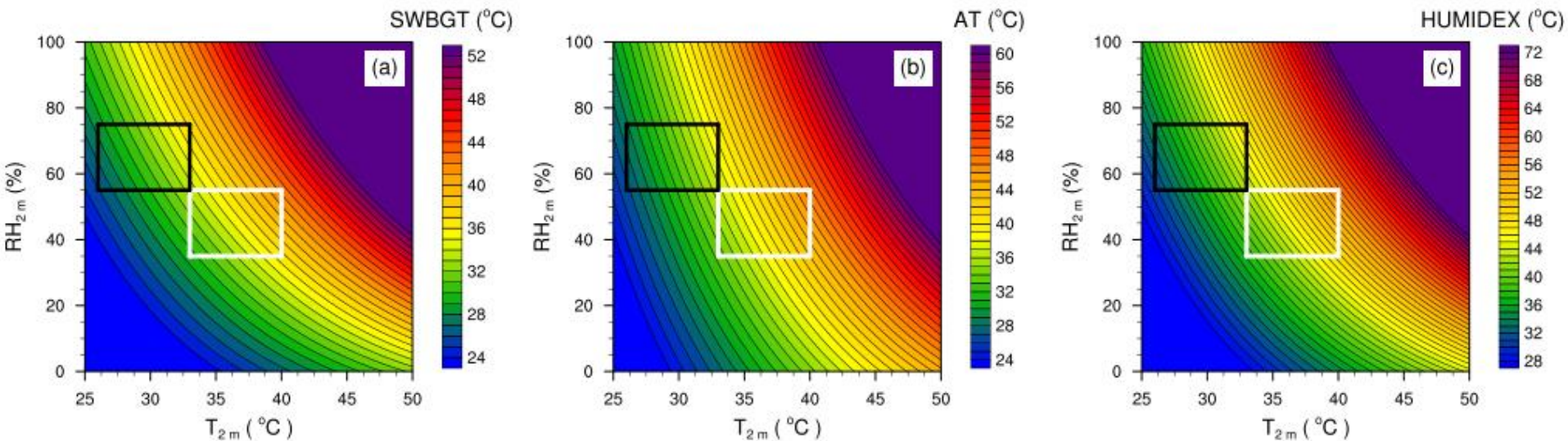


$$SWBGT = 0.567T + 0.393VP + 3.94$$

$$AT = T + 0.33VP - 0.7WS_{10m} - 4.0$$

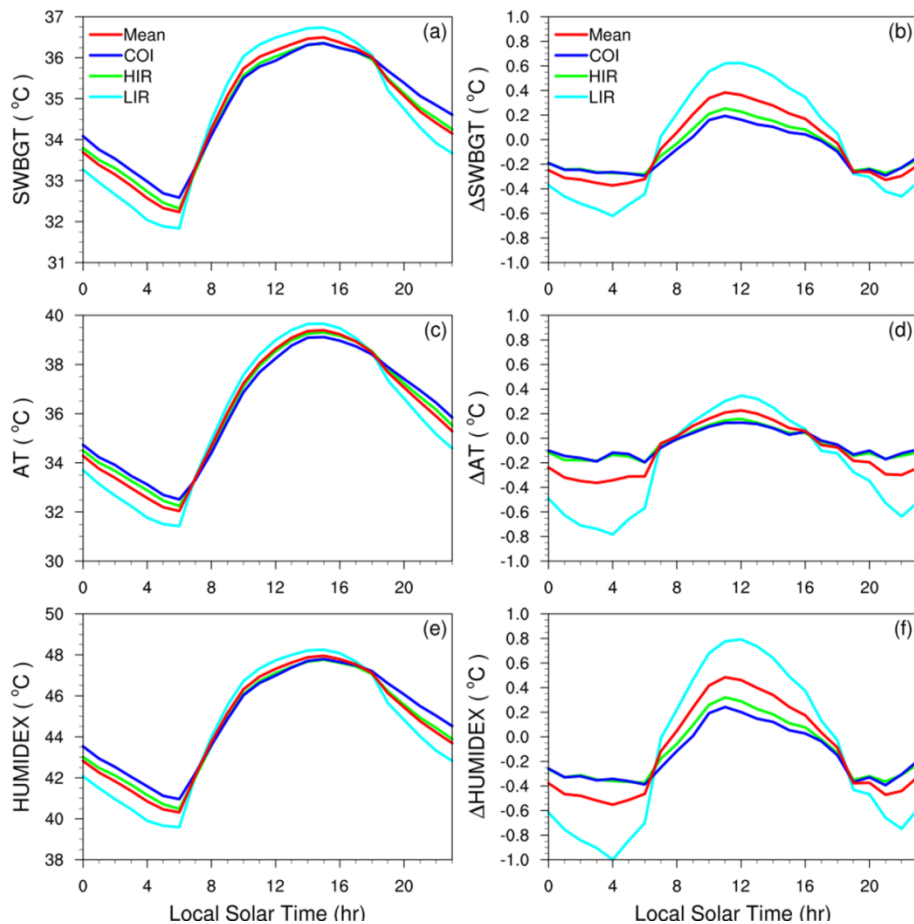
$$HUMIDEX = T + \frac{5}{9}(VP - 10)$$

$$VP = RH / 100 \times 6.105 \times \exp\left(\frac{17.2 \times T}{237.7 + T}\right)$$



- 高温、低湿条件下对相对 RH_{2m} 变化更敏感（右下，对应白天）
- 低温、高湿条件下对 T_{2m} 变化更敏感（左上，对应夜间）

3. 城市水文过程对不同城市类型舒适度指数影响日变化

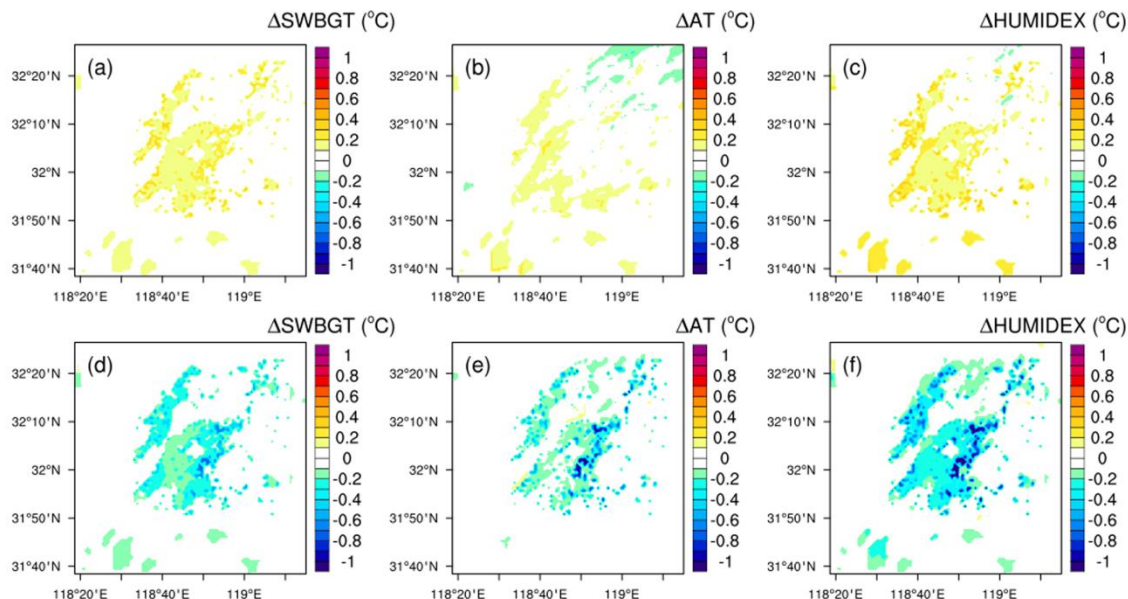


- 舒适度指数白天增加，夜间减小
- LIR振幅最大
- 夜间温度影响大，白天比湿影响大

3. 城市水文过程对白天和夜间舒适度指数影响



白天



夜间

- LIR变化最大
- $\Delta HUMIDEX > \Delta SWBGT > \Delta AT$
- 夜间舒适度指数降低可超过1° C



4.1 总结



- 耦合城市水文参数化方案能够改进WRF模式对城市气象要素以及地表能量平衡的模拟性能
- 通过增加（减小）潜热（感热）通量，城市水文过程能够降低气温和地表温度，增加比湿和相对湿度，减小风速，增加稳定度，降低边界层高度
- 城市水文过程能够有效减缓城市热岛（降低白天地表热岛强度和夜间空气热岛强度）
- 城市水文过程使得夜间人体舒适度增加，但白天人体舒适度恶化
- 城市绿洲效应的作用超过人为潜热释放、绿色屋顶、绿地灌溉的作用，对低密度城市区影响最显著



4.2 展望



- 发展更合理的城市水文方案（如绿地灌溉方案，不同种类植被绿洲效应系数）
- 人为潜热排放清单制作
- 城市水文过程对降水，大气环境的影响
- 研究对城市暴雨洪水和城市内涝等问题的影响



谢谢! 敬请指正!