

## 长三角地区夏季地表热环境的季节内和日夜变化特征

张曼玉<sup>1,2</sup>, 王泓<sup>2</sup>, 杨元建<sup>1,2</sup>, 李煜斌<sup>2</sup>, 石涛<sup>3</sup>, 高志球<sup>2</sup>

(1.南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 江苏南京 210044;

2.南京信息工程大学大气物理学院, 江苏南京 210044; 3.安徽省芜湖市气象局, 安徽芜湖 241000)

**摘要:** 基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感反演的地表温度数据、土地利用数据以及植被覆盖数据,对长三角城市群及周边地区 2013~2017 年夏季地表热环境的时空分布特征及其驱动因子进行了研究.结果表明:①夏季地表高温风险区(即高温区和亚高温区)在日间主要分布在皖北农田覆盖地区、长三角城市群的城市建筑覆盖地区以及浙南的少数城市建筑和农田用地;夜间地表高温风险区转换为长江流域沿线的水体覆盖区域和城市群建成密集区.②季节内变化表现为从 6 月份到 8 月份地表高温风险区在空间上逐渐从长三角的皖北和苏北区域向长三角城市群片区转移;长三角北部区域地表高温风险区比例逐渐减小,而长三角城市群片区地表高温风险区比例逐渐增加.③地表热环境的空间分布与下垫面覆盖类型的空间分布有很好的对应关系,城建用地区域的高温风险比例要显著高于其他下垫面覆盖类型区域;皖北地区的夏季农作物轮作改变了地表的植被覆盖度,导致该地区的季节内和日夜变化特征不同于其他地区;地表高温风险季节内变化规律则表明植被覆盖度的提高对于减少高温风险区比例具有显著作用.

**关键词:** 地表热环境;长三角城市群;MODIS;季节内变化

**中图分类号:** X16      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.11.008

**引用格式:** 张曼玉,王泓,杨元建,等.长三角地区夏季地表热环境的季节内和日夜变化特征[J].中国科学技术大学学报,2019,49(11):920-929.

ZHANG Manyu, WANG Hong, YANG Yuanjian, et al. Intra-seasonal and diurnal variations of summer surface thermal environment in the Yangtze River Delta[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019,49(11):920-929.

### Intra-seasonal and diurnal variations of summer surface thermal environment in the Yangtze River Delta

ZHANG Manyu<sup>1,2</sup>, WANG Hong<sup>2</sup>, YANG Yuanjian<sup>1,2</sup>, LI Yubin<sup>2</sup>, SHI Tao<sup>3</sup>, GAO Zhiqiu<sup>2</sup>

(1.School of Remote Sensing & Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3.Wuhu Meteorological Administration of Anhui Province, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Based on MODIS-based land surface temperature(LST) data, land use and land cover change(LUCC) data and normalized difference vegetation index(NDVI) data, the temporal and spatial characteristics and the associated driving factors of summer surface thermal environment in the Yangtze River Delta(YRD) megalopolis from 2013 to 2017 were investigated. The results show that: ① The summer surface-high-temperature risk zones(i.e., high LST zone and sub-high LST zone) were mainly

**收稿日期:** 2018-08-30; **修回日期:** 2018-12-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(41601550, 41675009, 41505004, 41205126),南京信息工程大学人才引进科研启动基金资助.

**作者简介:** 张曼玉,女,1995年生,硕士生.研究方向:环境遥感研究. E-mail: zmy0728@126.com

**通讯作者:** 王泓,博士/讲师. E-mail: wanghong@nuist.edu.cn

distributed in the day time on the farmland covering areas in the north of Anhui, urban architectural covering areas of the YRD and some urban buildings and some farmland in southern Zhejiang, while the surface-high-temperature risk zones transferred to the water-covered areas and urban densely populated areas along the Yangtze River at night. ②The intra-seasonal variations show that from June to August, the surface-high-temperature risk zones gradually shifted from the north of Anhui and the north of Jiangsu to the YRD megalopolis. The study area presents two opposite trends of intra-seasonal variations: the surface-high-temperature risk zones in the northern part of the YRD are gradually mitigating, while the surface-high-temperature risk zones in the YRD Delta megalopolis are gradually increasing. ③The spatial distribution of the surface thermal environment is highly related to the spatial distribution of the underlying surface coverage type, and the surface-high-temperature risk zones of urban construction land areas are significantly higher than other underlying surface coverage types. Summer crop rotations in the northern part of YRD have changed the vegetation coverage of the surface, resulting in the difference between intra-seasonal and diurnal variations in this area from those in other areas. The seasonal variation of surface-high-temperature risk zones indicates that improvement of vegetation coverage has a significant effect on reducing surface-high-temperature risk zones.

**Key words:** surface thermal environment; Yangtze River Delta megalopolis; MODIS; intra-seasonal variation

## 0 引言

大约 54% 的世界人口生活在城市地区,到 2030 年,随着城市群的出现和从农村到城市或郊区的人口迁移的继续,这一比例预计将增加到 70%。城市化虽然给人们的生活带来了便利,但对区域尺度的环境造成了影响,其中城市化引起下垫面和地气能量交换的改变,最终使得区域地表温度和气温升高,增加了高温时空发生概率及对人类危害的风险(简称高温风险)<sup>[1-8]</sup>。例如,高温热环境可危害人类健康,如导致热射病,增加心血管、呼吸道、消化道等发病风险;流行病学研究表明,城市化引起的热岛效应对极端高温期间的死亡率有着重要影响,即死亡风险增加<sup>[7,9-10]</sup>;此外,高温热环境还会严重影响工农业生产,使空气和水环境恶化,对经济和环境的发展产生严重的负面效应<sup>[9-11]</sup>。因此,研究地表热环境变化的时空演变规律及其驱动因子,对理解区域和城市气候变化归因、影响和应对均具有重要意义<sup>[12-13]</sup>。

卫星遥感反演的地表温度(LST)是分析地表热环境时空变化特征的重要表征参数之一,其优势在于可对地表热环境进行宏观、大范围、动态连续监测。目前,针对城市地表热环境的研究,以美国对地观测系统(EOS)卫星 Terra 和 Aqua 上的中等分辨率成像光谱仪(MODIS)的卫星遥感数据的应用最广泛;MODIS 每 1~2 d 观测整个地球表面状况,可

获得 36 个光谱通道资料,对地表温度和植被指数等特征进行同时反演分析,有助于精确地理解全球/区域甚至局地地表气候环境变化。例如,张佳华等<sup>[14]</sup>利用 EOS-MODIS 数据研究北京城市及其周边热岛的日变化及季节特征,并进行影响因子分析,发现北京城区城市热岛以夏季和夜间最为明显,植被绿地对城市热岛产生负相关效应。Hung 等<sup>[15]</sup>利用 TERR/MODIS 遥感反演地表温度资料,分析了城市热岛对东京、北京等 8 个亚洲地区人口为一百万以上城市的影响。仲雷等<sup>[16]</sup>利用 MODIS 反演了西藏中部一江两河地区地表温度、植被指数等地表特征参数,并结合气象站点数据估算了地气通量交换。张宏群等<sup>[17]</sup>基于 Terra/MODIS 的遥感数据系统地分析了安徽省地表温度季节变化及空间分布特征及其与地表植被覆盖和当地气候的关系。易予晴等<sup>[18]</sup>基于多年的 MODIS 地表温度产品和遥感土地利用分类结果揭示了武汉城市群的夏季热环境分布特征,分析了城市群热环境日夜变化特征与土地覆盖类型的相关关系。Zhou 等<sup>[19]</sup>通过 Aqua/Terra MODIS 数据研究中国地表温度的昼夜和季节变化,结果显示这些昼夜和季节变化强烈依赖于当地的气候-植被状况。Yang 等<sup>[20]</sup>基于 MODIS 和高分辨率的夜间灯光卫星数据,构建了一个考虑人口分布权重的城市地表热环境遥感评估指标,在人口高温暴露度评价方面有着重要的应用价值。上述研究

表明,MODIS 卫星遥感已经成为研究热环境时空分布特征及其成因分析的重要手段。

作为“一带一路”和长江经济带的重要交汇枢纽,长江三角洲城市群地区在国家现代化建设和国际贸易交流中起着举足轻重的作用。相比于全国其他地区,其城镇化水平较高,人口分布密集,经济基础占据龙头地位,长三角城市快速发展的同时,其高温热环境问题也尤为突出<sup>[6]</sup>。已有的基于卫星遥感的长三角地区地表热环境研究多集中在长江中下游城市群或典型大城市<sup>[14-18]</sup>,如长三角的地表高温区呈现为向右倾斜的“Z”字型格局,然而随着最近 5 年快速城市化进程,长三角城市群与周边地区整体地表热环境格局分布及其区域差异有了进一步的发展,有待进一步研究<sup>[19]</sup>。此外,大多数的研究多以一幅或几幅较为完整的数据作为研究时段的代表数据<sup>[14-15]</sup>,从而缺乏统计意义;由于 MODIS 卫星遥感采样受到云和降水等天气条件的影响,因此遥感获得的不同研究时段城市热环境时空分布特征是相对变动的<sup>[20-22]</sup>,不能准确反映长三角城市群地区的真实情况。再者,针对高温频发的夏季,近年来长三角城市群地区地表热环境的季节内及日夜变化特征及其主要驱动因子也尚不知晓。

综上,本文以夏季长江三角洲城市群的上海、江苏省、浙江省和安徽省为研究区,基于 2013~2017 年的 Terra MODIS 8d 地表温度产品,采用均值-标准差法进行地表温度等级划分,识别出高温面积,系统研究近 5 年来高温地表热环境的时空分布特征及其主要驱动因子,旨在为区域和城市气候环境变化问题及其应对策略提供科学依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究区概况

本文的研究区域为长三角城市群的三省一市,即安徽省、江苏省、浙江省和上海市,将整个研究区划分为三个区域,如图 1 所示,分别为北部、南部和长三角城市群。其中,北部包括苏北的宿迁、连云港、徐州、淮安和皖北的阜阳、亳州、淮南、淮北、蚌埠共 9 个城市;南部包括皖南的黄山以及浙南的温州、衢州、丽水 4 个城市;上海市以及江苏省的南京、无锡、常州、苏州、南通、盐城、扬州、镇江、泰州,浙江省的杭州、宁波、嘉兴、湖州、绍兴、金华、舟山、台州,安徽省的合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、安庆、滁州、池州、宣城这 26 个城市被纳入长三角城市群片区。北部片区

的土地利用类型以农田为主,有小部分水体及城市建筑用地分散分布;长三角城市群片区则是农田和植被占据了大部分比重,少部分水体分散分布,城市建筑集中分布在沿海地区;南部片区几乎被植被覆盖,沿海地区分布有部分城市建筑(图 1)。

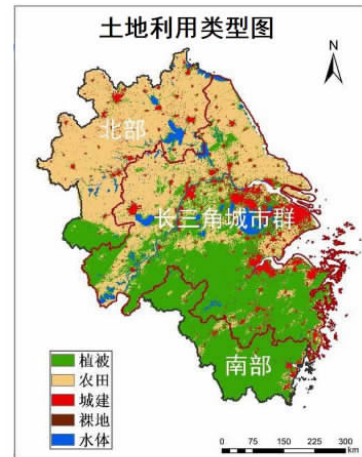


图 1 研究区及土地利用类型图

Fig.1 Map of study area and land use types

### 1.2 方法与数据

#### 1.2.1 数据选择

EOS-MODIS 传感器共有 36 个光谱波段,从  $0.4\mu\text{m}$ (可见光)到  $14.4\mu\text{m}$ (近红外)全光谱覆盖,可以实现对地表、生物圈、固态地球、大气和海洋的长期全球观测。本文采用研究区 2013~2017 年每年 6 月到 8 月的 MOD11A2 8 d 合成地表温度(LST)数据,数据空间分辨率为  $1\text{km}$ ,卫星过境时间为上午 10:30 和夜间 22:30。

土地利用类型数据采用 2013~2017 年的 MCD12Q1 年数据,其为陆地 3 级标准数据产品,内容为土地覆盖类型,空间分辨率为  $500\text{m}$ 。IGBP 数据集是美国地质调查局为国际地圈-生物圈计划建立的全球土地覆盖数据集,总共包含 17 种地物类别,将 17 种地物类别最终合并为 5 类,即植被、农田、城市建筑、裸地和水体。

归一化植被指数(NDVI)数据采用 MOD13A3 月数据,其为陆地 3 级标准数据产品,内容为栅格的归一化植被指数,空间分辨率为  $1\text{km}$ 。对于陆地表面的覆盖而言,由于雨、云、雪在可见光波段比近红外波段有较高的反射作用,其 NDVI 为负值;岩石、裸土的反射率在两个波段相当,其 NDVI 一般为 0;植被的反射率在近红外波段大于红外波段,因此有植被覆盖的地方 NDVI 值一般大于 0,且在取值范围

内, NDVI 的值越大, 说明植被越茂密.

### 1.2.2 数据预处理

首先对 MOD11A2 地表温度数据进行投影和镶嵌处理, 得到完整的研究区数据, 研究时段为夏季的 6 月到 8 月, 每月 4 幅, 5 年共计 60 幅地表温度数据. 通过研究区行政边界的矢量数据批量裁剪出研究范围, 将得到的研究区数据输入到 IDL 求取有效像元 (有数据缺失的像元不参与统计) 的平均值. 均值的求取主要分为两个内容: 一是计算 5 年所有数据的日间和夜间有效像元均值, 用以分析研究区地表温度分布的整体趋势; 二是分别计算 5 年夏季每月日间和夜间数据有效像元的均值, 用以分析夏季季节内的地表温度分布及年际和月际动态变化趋势. 对于 MCD12Q1 土地利用类型数据, 裁剪出研究区之后, 对 IGBP (Type1) 数据进行土地利用类型聚类处理. MOD13A3 数据进行投影、镶嵌和裁剪处理之后, 去除无效值, 计算得到取值范围为  $[-1, 1]$  的 NDVI.

### 1.3 温度等级划分

对于城市热环境程度的界定问题, 也就是地表温度的分级问题, 一般采用两种方法<sup>[23]</sup>: 一是等间距分级法, 这种方法一般在反演的地表温度的基础上, 将研究区的地表温度的最大值和最小值作为端点, 进行等间距密度分割; 另一种是均值-标准差法, 通过将地表温度均值 ( $\mu$ ) 和不同标准差 (std) 进行组合来划分地表温度, 从而有效地界定城市热场程度. 标准差反映了温度对于平均温度的偏离程度, 均值和标准差的组合则能够反映不同地表温度的变异.

陈松林等<sup>[23]</sup>的研究表明, 就城市热场的空间分布而言, 地表温度的均值-标准差划分法可更加精确敏感地区分城市的热场强度. 因此, 本文采用均值-标准差法对研究区的热场强度进行等级划分, 总共分为 5 级, 分别为高温区、亚高温区、中温区、亚低温区、低温区, 具体划分标准如表 1 所示 (其中  $\mu$  代表研究区地表温度 LST 的平均值, std 代表标准差). 本文将高温区和亚高温区定义为高温风险区, 其面积比例越大, 表明研究区内的高温风险等级越高, 反之亦然.

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 近 5 年夏季地表热环境平均分布特征

图 2 分别给出了 2013~2017 年夏季所有有效样本的日间和夜间平均 LST 分级分布特征, 可以看

出, 地表热环境呈现出明显的昼夜空间分布差异. 就热场整体分布特点而言, 在日间, 研究区的高温区和亚高温区主要分布在皖北地区、长三角城市群的中部沿海地区以及浙南的少数城市建筑和农田用地 (图 2(a)); 而夜间, 长三角北部地区的高温区和亚高温区冷却下来, 水体成为相对热源, 长三角城市群的高温区和亚高温区显著增多 (图 2(b)). 研究区日间和夜间各温度等级的统计结果显示, 各温度等级在日间和夜间的面积比例差异并不大, 高温区和亚高温区在日间占的面积比例为 28.95%, 夜间增加 0.6%, 亚低温区和低温区在日间占的面积比例为 30.34%, 夜间增加 0.09%, 中温区在夜间占的面积比例相对于日间有所减少 (表 2).

表 1 研究区地表温度等级划分标准

等级号	温度等级	取值范围
1	高温区	$LST > \mu + std$
2	亚高温区	$\mu + 0.5std < LST \leq \mu + std$
3	中温区	$\mu - 0.5std < LST \leq \mu + 0.5std$
4	亚低温区	$\mu - std < LST \leq \mu - 0.5std$
5	低温区	$LST < \mu - std$

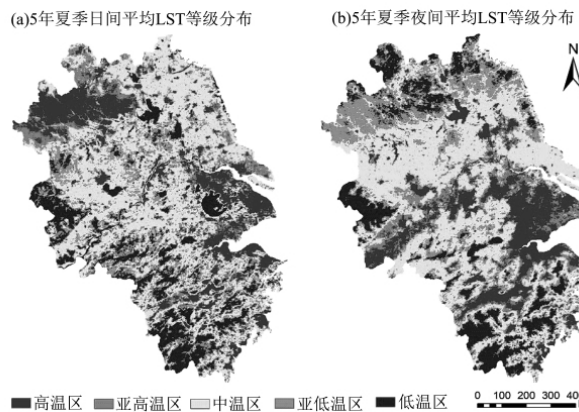


图 2 研究区 5 年 (a) 白天和 (b) 夜间平均地表温度等级分布  
Fig.2 5 year-averaged LST distribution in the study area at (a) daytime and (b) nighttime

表 2 研究区 5 年夏季昼夜平均地表温度等级面积统计  
Tab.2 Area statistics in each LST level at daytime and nighttime in the summer study area in recent five years

	高温区	亚高温区	中温区	亚低温区	低温区
日间	15.89%	13.06%	40.70%	16.21%	14.14%
夜间	15.73%	13.81%	40.03%	17.06%	13.36%

### 2.2 地表热环境季节内和日夜变化的空间分布特征

图 3 和图 4 分别为研究区夏季内每个月的逐年地表热环境昼夜分布图.高温区空间分布比较稳定,但日间和夜间不同月份高温区的空间分布的地理位置有所不同,存在明显的季节内和日夜变化,且不同年份,高温区面积的空间分布形态也存在一定的年际差异(图 3(a)~(c)和图 4(a)~(c)).各温度等级面积比例统计分析结果显示,总体而言,日间和夜间的高温风险区比例年际间变化有一定的波动变化(图 3(d)和图 4(d)).

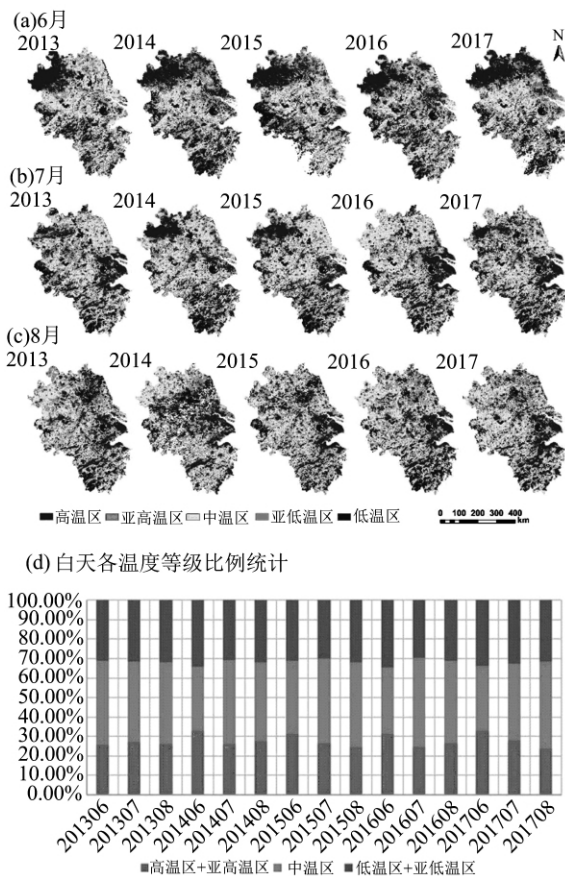
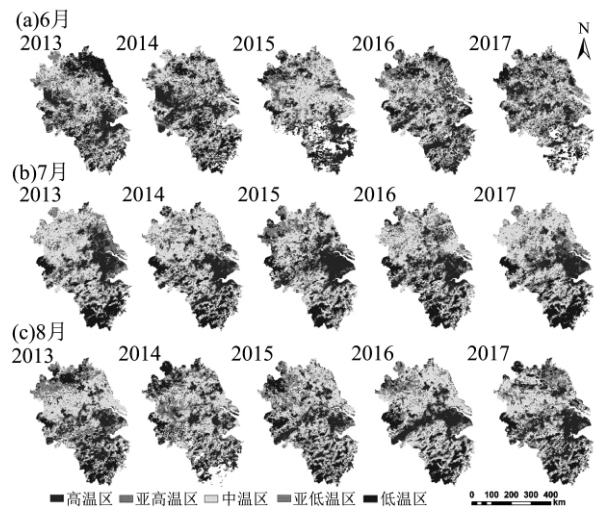


图 3 研究区夏季逐年逐月日间地表温度等级空间分布图  
Fig.3 The monthly LST distribution of the study area at daytime during the summer in each year

结合图 3(d)统计数据,对日间数据进行年际变化分析,各年份高温区和亚高温区的 6~8 月夏季平均面积比例分别为 26.07%、28.71%、27.35%、27.27%、28.04%,其年际变化有一定波动,其中高温风险区的面积比例最高的年份是 2014 年和 2017 年.日间数据季节内变化是比较显著的,就整个研究区而言,6 月份高温区和亚高温区的面积比例最高,



(d)夜间各温度等级比例统计

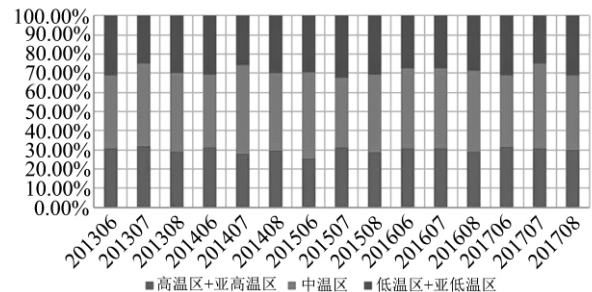


图 4 研究区夏季逐年逐月夜间地表温度等级空间分布图  
Fig.4 The monthly LST distribution of the study area at nighttime during the summer in each year

到 7、8 月份有所下降,6 月份高温区和亚高温区主要分布在长三角北部和长三角城市群地区,以长三角北部地区较为突出,7、8 月份长三角北部的高温风险区比例逐渐减弱,而长三角城市群中部沿海地区的高温风险区比例有所提高.也即研究区内呈现两种相反的变化趋势:一种是北部地区为主,高温风险区比例呈下降趋势;另一种则是长三角城市群区域,从 6 月到 8 月份,高温风险区比例逐渐增加,这一区域的高温分布也与葛伟强等<sup>[24-25]</sup>对 2001~2008 年的长三角城市群区域研究而得出的向右倾斜的“Z”字形格局相符,且相比发现,本文得到的近 5 年的“Z”字形格局更加显著与突出.除 2013 年夏季的月间变化无规律性,2014~2017 年日间数据的季节内变化都遵循以上规律.

夜间数据分析结果显示,夜间高温风险区空间分布比较稳定,主要集中在长三角城市群的中部沿海地区.就整个研究区而言,各年份夜间高温区和亚高温区的 6~8 月夏季平均面积比例分别为 30.58%、29.41%、28.28%、28.44%、30.69%,风险

等级面积比例年际变化不大,高温风险区比例较高的年份是 2013 年和 2017 年,6、7、8 月份的高温 and 亚高温区总面积比例相当,高温区主要分布在长三角城市群(图 1),有从中部沿海向内陆扩张的趋势。一方面,城市区域下垫面水泥、沥青路面等具有较低的反照率以及较大的热导率,因此相比于非城市区域,城市下垫面在日间吸收了大量的热量;另一方面,由于城市表面建筑物的密集分布,使地面长波辐射在建筑物间多次反射,因而日间贮存的热量难以在夜间释放出去;此外,长三角城市群地区主要分布

在长江流域沿线,非城市地区的水域面积较多,水体由于较大的比热容在夜间不容易降温,从而成为相对热源。

虽然各温度等级的昼夜面积比例变化并不大,但空间上的转移比较显著,呈现北部的高温区和亚高温区向长三角城市群转移的趋势,这是由于日间和夜间,不同地区下垫面覆盖类型、植被覆盖状况等都有所差异,从而表现为高温区和亚高温区的空间转移现象。

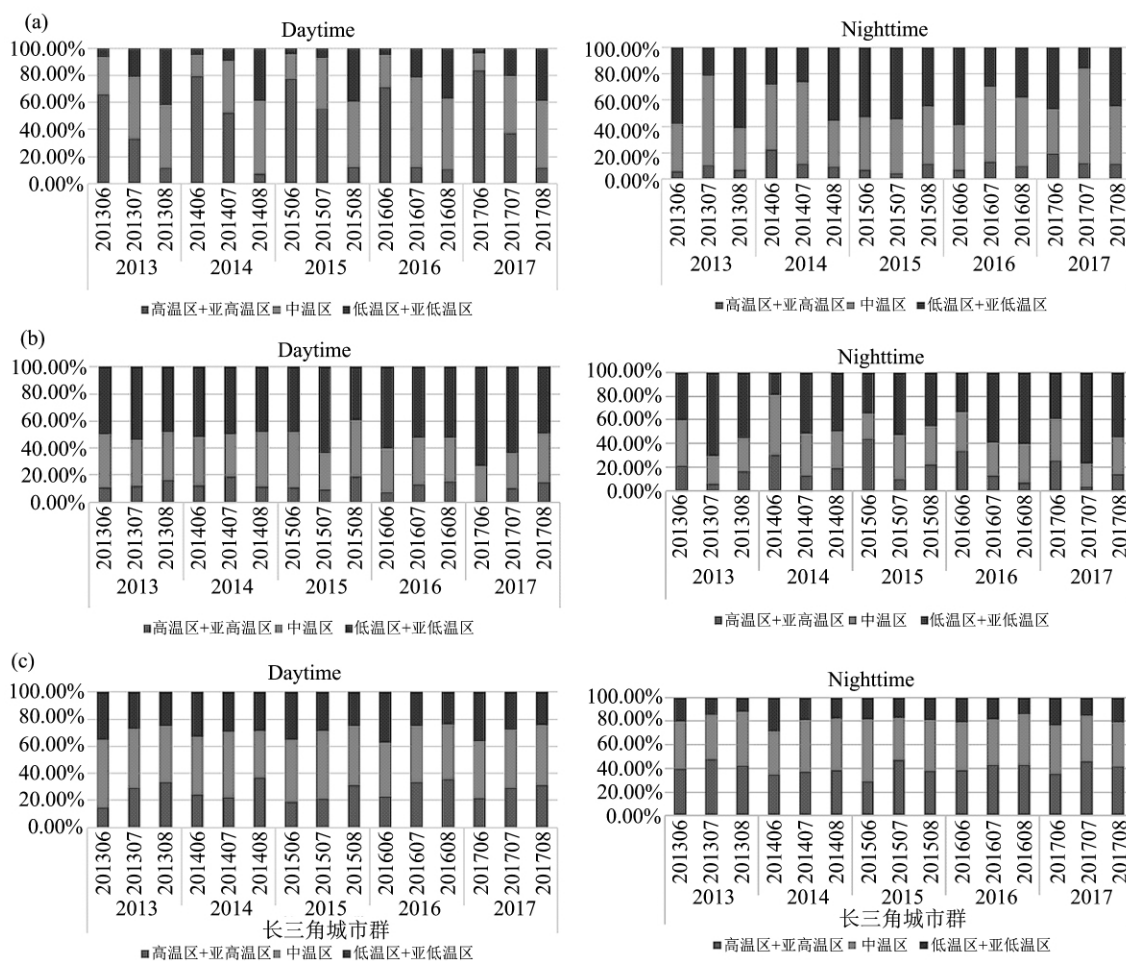


图 5 (a)北部、(b)南部、(c)长三角城市群地表温度等级统计图

Fig.5 LST grades statistics of (a) Northern, (b) Southern, (c) urban agglomerations in the Yangtze River Delta

### 2.3 地表热环境季节内和日夜变化的区域性差异

根据图 1(b)对研究区的划分,分别对北部地区、南部地区以及长三角城市群片区进行逐年逐月的温度等级面积比例统计,统计结果如图 6 所示.日间,北部地区季节内具有明显的月际变化规律,每年高温区和亚高温区的面积比例以 6 月份最高,且面积比例达到 60%以上,7、8 月份则逐渐减小,到 8 月

份基本都降到 20%以下.而长三角城市群则呈现与北部相反的变化趋势,但是变化幅度有所收敛,从 6 月份到 8 月份,高温区和亚高温区的面积比例大约由 20%增加到 40%.南部片区月际间没有明显的变化规律,各年份普遍在 8 月份温度风险偏高一些。

夜间,北部地区的高温区和亚高温区的面积比例迅速下降,基本都降到 20%以下,长三角城市群

高温区和亚高温区的面积比例则呈现增加趋势,到 40%左右,此时长三角城市群的高温风险区比例要显著高于北部地区.南部地区的夜间数据,各年份都是 6 月份高温区和亚高温区的面积比例最高,处于 20%到 40%之间,这是由于南部植被覆盖地区不同月份的植被覆盖度不同.

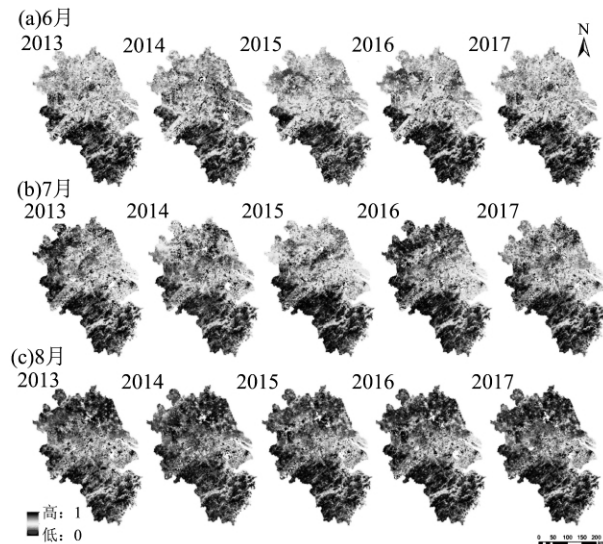


图 6 研究区夏季逐年逐月 NDVI 分布图

Fig.6 The monthly NDVI distribution of the study area during the summer in each year

## 2.4 讨论

### 2.4.1 日夜空间分布差异的成因

就研究区夏季 5 年的平均热环境等级分布来看,日间和夜间各温度等级所占的面积比例相当,其差异性主要体现在高温区和亚高温区空间分布上.以下主要对空间转移比较明显的两个区域,长三角北部地区和长三角城市群的中部沿海地区进行分析;长三角北部地区的土地覆盖类型为大片的农田旱地,相比于植被冠层覆盖地区,旱地土壤比热容较小,白天随着太阳高度角的逐渐增大,这部分的地表温度会迅速上升<sup>[14]</sup>而成为热源;而到了夜间,较小的土壤比热容使其迅速降温,将白天贮存的太阳辐射都释放出来而成为亚低温区.长三角城市群中部发生变化区域的下垫面覆盖类型主要是水体和城市建筑,水体的比热容比较大,吸收(释放)等量的热量,其升温(降温)幅度更加缓慢,因此水体在日间是作为冷源而存在的,在夜间则成为相对热源.城市建筑用地无论是日间还是夜间,都表现为高温区或亚高温区,在夜间有向周边扩张的趋势,根据张佳华<sup>[14]</sup>对北京城市及其周边热岛日变化的研究,城市

地区温度高主要是由于收支热量状况,一方面城市下垫面导热率高,热容量大,白天能够存储更多的太阳辐射;另一方面,建筑密集的下垫面使城市的“天穹可见度”小得多,地面长波辐射在地面建筑物间多次反射,极大地减弱了地面热量向大气的散失,使得城市高温区域在夜间呈现扩张趋势.虽然各温度等级在日间和夜间所占的面积比例相当,但是与日间相比,夜间的平均 LST 要低于日间.

### 2.4.2 季节内演变的主要驱动因子

由图 6 可以看出,夏季季节内 NDVI 的变化是比较明显的,从 6 月份到 8 月份,植被覆盖度呈现整体上升的趋势,8 月份研究区的 NDVI 整体达到夏季峰值.这与陈怀亮<sup>[26]</sup>对黄淮海区域植被 NDVI 变化特征的研究结果一致,单峰型的自然植被 NDVI 峰值出现在 8 月份,双峰型的农业植被(一年两熟作物)NDVI 峰值出现在 4 月份和 7~8 月份,单峰型的农业植被(一年一熟作物)NDVI 峰值出现在 8 月份,且下垫面为植被覆盖区域的 NDVI 高于农田,高于城市区域.6 月份研究区整体的 NDVI 值比较低,且由南到北逐渐减小,其中 2014 年北部的植被覆盖度最低,反映在图 3(d)和图 4(d)中该地区该年份的高温区和亚高温区占整体的面积比例最高,高温风险最突出.随着 7、8 月份的植被覆盖度逐渐提高,LST 逐渐降低,高温区和亚高温区的面积比例也均少于 6 月份,植被覆盖度的提高有利于缓解高温风险.这与大多数研究结果一致:LST 和 NDVI 呈显著的负相关关系<sup>[27-28]</sup>,即 NDVI 逐渐增大,植被覆盖度不断增加,LST 呈现下降趋势;就夏季而言,城市地区的 NDVI 都要普遍低于周边非城市建筑覆盖区,反映为城市 LST 高于郊区,呈现城市热岛效应.可见,在地理位置和气候分区相似的背景下,地表温度的高低变化和不同下垫面植被覆盖类型变化密切相关.

结合图 1 土地利用类型图发现,热环境的空间分布与下垫面覆盖类型的空间分布相一致,城建用地的热容量和热传导率都要比非城建用地大,而且城区建筑密集,人口密集,加上人为热源的排放,使得市区的热量更难以释放,因此下垫面为城建用地区域的高温风险区比例要显著高于其他下垫面覆盖类型区域<sup>[29]</sup>.不同月份间高温区的空间转移,则表现了不同植被覆盖类型调节地表温度的决定性差异,在地表湿度一定的情况下,植被覆盖度越大,植

物的蒸腾进行的越活跃,对高温风险的缓解作用越明显。

就研究区的下垫面覆盖类型来讲,如图 1(b)所示,北部地区基本为农田所覆盖,有少量水体和城市建筑,且由于作物轮耕,淮北平原的农作物在 6 月份已收割完毕<sup>[15]</sup>,新种的作物(如大豆、玉米)没有生长出来,因此农业用地的 NDVI 在 6 月份比较小,如图 6(a)所示。正是由于缺乏农作物植被冠层的调节作用,6 月份旱地土壤比热容变小,日间接收太阳辐射更容易增温,因此 6 月份的北部农田在白天成为地表温度风险最高的区域,到了晚上,郊区土壤中的水分继续气化将热能带走,所以其降温速度也要比城市快;如图 6(b)~(c)所示,7 月和 8 月份农作物的生长旺盛,枝繁叶茂,NDVI 的值增大,使得地表的比热容增大,日间接收大量太阳辐射而造成的升温缓慢,夜间降温也相对缓慢。因而,皖北地区白天和晚上的地表热环境的季节内变化特征显著。相比之下,城市群地区和南部山区的夏季植被覆盖变化季节内变化差异不大,其地表热环境等级的季节内变化不明显。

### 3 结论

本文基于最近 5 年的 MODIS 数据研究了长三角城市群及周边地区夏季地表热环境的时空分布特征,从下垫面覆盖类型和植被覆盖度等方面进行驱动因子分析,主要结论如下:

(I) 长三角城市群地区的地表热环境昼夜空间分布差异显著,高温风险区存在明显的日夜转移。夏季地表高温区和亚高温区(即高温风险区)在日间主要分布在皖北农田覆盖地区、长三角城市群的城市建筑覆盖地区以及浙南的少数城市建筑和农田用地;夜间地表高温风险区转移到以长江流域沿线的水体覆盖区域和城市群建成密集区。

(II) 长三角城市群地区的城市地表热环境的季节内变化特征存在显著的区域性差异,具体表现为从 6 月份到 8 月份地表高温风险区在空间上逐渐从长三角的皖北和苏北区域向长三角城市群片区转移;研究区呈现两种相反的季节内时间变化趋势:长三角北部区域地表高温风险区比例逐渐减小,而长三角城市群片区地表高温风险区比例逐渐增加。

(III) 土地利用类型的差异和植被覆盖度的时空变化是长三角城市群及周边地区的城市地表热环

境时空分布的主要驱动因子。主要表现为地表热环境的空间分布与下垫面覆盖类型的空间分布明显的对应关系,城建用地区域的高温风险区比例要显著高于其他下垫面覆盖类型的区域;皖北地区的夏季农作物轮作改变了地表的植被覆盖度,导致该地区的季节内和日夜变化特征不同于其他地区;地表高温风险区季节内变化规律则表明植被覆盖度的提高对于减少高温风险区比例具有显著作用。

**致谢** 本研究地表温度数据 MOD11A2 以及 NDVI 数据 MOD13A3 来源于 NASA LAADS DAAC;土地利用数据 MCD12Q1 来源于 USGS LP DAAC。在此对以上数据提供院所致谢。感谢两位匿名审稿专家对本文提出的有益建议。

#### 参考文献(References)

- [1] 郑祚芳, 范水勇, 王迎春. 城市热岛效应对北京夏季高温的影响[J]. 应用气象学报, 2006, 17(S1): 48-53.  
ZHENG Zuofang, FAN Shuiyong, WANG Yingchun. Effects of urban heat island on summer high temperatures in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(S1): 48-53.
- [2] REN G, ZHOU Y. Urbanization effect on trends of extreme temperature indices of national stations over Mainland China, 1961-2008 [J]. Journal of Climate, 2014, 27(6): 2340-2360.
- [3] 谢志清, 杜银, 曾燕, 等. 长江三角洲城市群化发展对极端高温事件空间格局的影响[J]. 科学通报, 2017, 62: 233-244.  
XIE Zhiqing, DU Yin, ZENG Yan, et al. Impact of urban clusters on spatial pattern of extreme high temperature events over Yangtze River Delta [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62: 233-244.
- [4] CAO Q, YU D, GEORGESCU M, et al. Impacts of future urban expansion on summer climate and heat-related human health in eastern China [J]. Environment International, 2018, 112: 134-146.
- [5] LIU X, TIAN G, FENG J, et al. Modeling the warming impact of urban land expansion on hot weather using the weather research and forecasting model: A case study of Beijing, China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 35(6): 723-736.
- [6] 陈倩, 丁明军, 杨续超, 等. 长江三角洲地区高温热浪人群健康风险评价[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1475-1484.  
CHEN Qian, DING Mingjun, YANG Xuchao, et al.



- Spatially explicit assessment of heat health risks using multi-source data: A case study of the Yangtze River Delta Region, China [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(11):1475-1484.
- [7] 杨续超, 陈葆德, 胡可嘉. 城市化对极端高温事件影响研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(10): 1219-1228.
- YANG Xuchao, CHEN Baode, HU Kejia. A review of impacts of urbanization on extreme heat events [J]. *Progress in Geography*. 2015, 34(10):1219-1228.
- [8] 吴蓉, 孙怡, 杨元建, 等. 城市化对安徽省极端气温事件的影响 [J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(6): 527-537.
- WU Rong, SUN Yi, YANG Yuanjian, et al. Effects of urbanization on extreme temperature events in Anhui province [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(6): 527-537.
- [9] 杨红龙, 许吟隆, 陶生才, 等. 高温热浪脆弱性与适应性研究进展 [J]. *科技导报*, 2010, 28(19):98-102.
- YANG Honglong, XU Yinlong, TAO Shengcai, et al. Vulnerability to heat waves and adaptation: A summary [J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(19):98-102.
- [10] REID C E, SNOWDEN J M, KONTGIS C, et al. The role of ambient ozone in epidemiologic studies of heat-related mortality [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(12):1627-1630.
- [11] 张清. 夏季人体舒适度研究及高温对能源消耗的影响 [J]. *北京气象*, 1997(2):18-19.
- [12] 宋晨阳, 王锋, 张韧, 等. 气候变化背景下我国城市高温热浪的风险分析与评估 [J]. *灾害学*, 2016, 31(1): 201-206.
- SONG Chenyang, WANG Feng, ZHANG Ren, et al. Risk analysis and assessment of high-temperature and heat-wave disaster in Chinese cities under the background of climate change [J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(1):201-206.
- [13] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价 [J]. *地理学报*, 2015, 70(7):1041-1051.
- XIE Pan, WANG Yanglin, LIU Yanxu, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(7):1041-1051.
- [14] 张佳华, 侯英雨, 李贵才, 等. 北京城市及周边热岛日变化及季节特征的卫星遥感研究与影响因子分析 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2005, 35(增刊 I): 187-194.
- [15] HUNG T, UCHIHAMA D, OCHI S. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2006, 8(1): 34-48.
- [16] 仲雷, 马耀明, 马伟强, 等. 西藏中部“一江两河”地区地表通量的卫星遥感估算 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2):309-317.
- ZHONG Lei, MA Yaoming, MA Weiqiang, et al. Land surface heat fluxes in the middle reaches of Yarlung Zangbo River and its two tributaries derived from AVHRR and MODIS data [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2):309-317.
- [17] 张宏群, 杨元建, 荀尚培, 等. 安徽省植被和地表温度季节变化及空间分布特征 [J]. *应用气象学报*, 2011, 22(2):232-240.
- ZHANG Hongqun, YANG Yuanjian, XUN Shangpei, et al. Seasonal and spatial variability of vegetation and land surface temperature in Anhui province [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(2): 232-240.
- [18] 易予晴, 龙腾飞, 焦伟利, 等. 武汉城市群夏季热岛特征及演变 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1279-1285.
- YI Yuqing, LONG Tengfei, JIAO Weili, et al. Characteristics and evolution of the summer heat island effect in Wuhan city group [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(8): 1279-1285.
- [19] ZHOU D, ZHANG L, LI D, et al. Climate-vegetation control on the diurnal and seasonal variations of surface urban heat islands in China [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(7): 074009.
- [20] YANG Yuanjian, GAO Zhiqiu, SHI Tao, et al. Assessment of Urban Surface Thermal Environment using MODIS with population-weighted method: A case study [J]. *Journal of Spatial Science*, 2019, 64(2): 287-300.
- [21] 邓莲堂, 束炯, 李朝颐. 上海城市热岛的变化特征分析 [J]. *热带气象学报*, 2001, 17(3):273-280.
- DENG Liantang, SHU Jiong, LI Chaoyi. Character analysis of Shanghai urban heat island [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2001, 17(3):273-280.
- [22] 董妍, 李星敏, 杨艳超, 等. 西安城市热岛的时空分布

- 特征[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8):107-112.
- DONG Yan, LI Xingmin, YANG Yanchao, et al. Distributive characters of urban heat island effect in Xi'an city [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(8):107-112.
- [23] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2):145-150.
- CHEN Songlin, WANG Tianxing. Comparison analyses of equal interval method and mean-standard deviation method used to delimitate urban heat island [J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(2): 145-150.
- [24] 葛伟强, 周红妹, 杨何群. 基于 MODIS 数据的近 8 年长三角城市群热岛特征及演变分析[J]. 气象, 2010, 36(11):77-81.
- GE Weiqiang, ZHOU Hongmei, YANG Hequn. Characteristics analysis on heat island effect in Yangtze Delta urban agglomerations in recent 8 years by MODIS data [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(11):77-81.
- [25] 方慧婷, 杨英宝, 汪子豪. 长三角夏季热岛效应时空演变分析[J]. 地理空间信息, 2017, 15(8): 109-112, 122.
- FANG Huiting, YANG Yingbao, WANG Zihao. Spatio-temporal evolution analysis of heat island effect in Yangtze Delta in summer [J]. Geospatial Information, 2017, 15(8):109-112, 122.
- [26] 陈怀亮. 1981~2001 年中国黄淮海地区植被 NDVI 变化特征及其与气候的关系[C]//中国气象学会 2005 年年会论文集. 中国气象学会, 2005:11.
- [27] 江志红, 叶丽梅. 近十年南京城市热岛演变的遥感研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2010, 2(2):148-154.
- JIANG Zhihong, YE Limei. A study of the urban heat island changes of Nanjing in the past decade based on remote sensing [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 2(2):148-154.
- [28] 杨燕丽. 基于 MODIS 数据的长三角地区热岛时空演变及机制研究[D]. 上海:华东师范大学, 2010.
- [29] 杨英宝, 苏伟忠, 江南. 基于遥感的城市热岛效应研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(5):36-40.
- YANG Yingbao, SU Weizhong, JIANG Nan. Application of remote sensing to study urban heat island effect [J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(5):36-40.

(上接第 919 页)

- [24] PLATNICK S, KING M D, ACJERMAN S A, et al. The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 459-473.
- [25] KING M D, TSAY S C, PLATNICK S E, et al. Cloud retrieval algorithms for MODIS: Optical thickness, effective particle radius, and thermodynamic phase[R/OL]. (1997-12-23)[2019-03-01]. [https://eosps0.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd\\_mod05.pdf](https://eosps0.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd_mod05.pdf).
- [26] WIND G, PLATNICK S, KING M D, et al. Multilayer cloud detection with the MODIS near-infrared water vapor absorption band[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(11): 2315-2333.
- [27] WENTZ F J, MEISSNER T. Supplement 1 algorithm theoretical basis document for AMSR-E ocean algorithms [R/OL]. (2007-05-17) [2019-03-01]. [http://images.remss.com/papers/rsstech/2007\\_051707\\_Wentz\\_AMSR\\_Ocean\\_V2\\_Supplement\\_1.pdf](http://images.remss.com/papers/rsstech/2007_051707_Wentz_AMSR_Ocean_V2_Supplement_1.pdf).
- [28] LIU G, CURRY J A, HAGGERTY J A, et al. Retrieval and characterization of cloud liquid water path using airborne passive microwave data during INDOEX [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D22): 28719-28730.
- [29] RICCHIAZZI P, YANG S, GAUTIER C, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(10): 2101-2114.
- [30] KIEMLE C, EHRET G, KAWA S R, et al. The global distribution of cloud gaps in CALIPSO data[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, 153: 95-101.