

# Effects of Land Use/Cover Change on Atmospheric Humidity in the Midstream Urban Agglomeration along the Yangtze River

Baoni Li, Lihua Xiong\*

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan Hubei  
Email: baonili@whu.edu.cn, \*xionglh@whu.edu.cn

Received: Oct. 10<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 13<sup>th</sup>, 2020; published: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2020

## Abstract

Land use/cover change (LUCC) affects regional climate not only through its direct changes of land surface properties, but also through its further modifications of land-atmosphere interactions. Urban land expansion, as a typical case of LUCC in highly populated areas, would inevitably have a strong influence on atmospheric humidity, a key variable in hydrometeorology and climate. We employed observation data to examine atmospheric humidity changes by trend analyses of humidity indicators in the midstream urban agglomeration along the Yangtze River during 1965~2017, and found the evident urban dry island (UDI) effects which are characterized by significant relative humidity decrease 1.977% and vapor pressure deficit increase 0.588 hPa per decade, respectively. Furthermore, combining observation and remote sensing data, significant positive correlations between humidity and evapotranspiration, and between evapotranspiration and leaf area were detected during 2001~2017 when cities entered the accelerated stage of land expansion, indicating that LUCC affects regional atmospheric humidity through an eco-hydrological way. Besides, the obvious rise of air temperature was captured much earlier than the decline of atmospheric humidity, and air temperature has not shown marked changes in recent years. Thus, we speculated that the UDI effect will not appear until urban land expands to a certain scale and urbanization-induced LUCC may exert a larger influence on atmospheric humidity than on air temperature in the current later period of urban expansion.

## Keywords

Land Use, Cover Change, Atmospheric Humidity, Evapotranspiration, Urban Dry Island, MODIS

# 土地利用/覆被变化对长江中游城市群大气湿度的影响

李保妮, 熊立华\*

作者简介: 李保妮(1996-), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。  
\*通讯作者。

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉  
Email: baonili@whu.edu.cn, \*xionglh@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年10月10日; 录用日期: 2020年11月13日; 发布日期: 2020年12月22日

## 摘要

土地利用/覆被变化(LUCC)不仅通过直接改变地表特性, 而且通过进一步改变地表-大气相互作用过程来影响区域气候。城市用地扩张作为LUCC在人口聚集区的一种典型情况, 对水文气象关键变量大气湿度产生强烈影响。本文利用站点观测数据, 对1965~2017年长江中游城市群大气湿度指标进行趋势分析, 发现该区域存在明显城市干岛(UDI)效应, 具体表现为相对湿度和水汽压差变化速率最高分别达到每十年-1.977%及0.588 hPa。在2001~2017年城市用地加速扩张时, 进一步结合遥感数据分析, 发现大气湿度指标与蒸散发间以及蒸散发与叶面积指数间均存在显著正相关关系, 这表明LUCC通过改变生态水文过程影响了区域大气湿度。此外, 该区域气温出现显著上升的时间远早于大气湿度出现显著下降的时间, 而近年来气温不再表现出明显变化。因此, 我们推测当城市用地扩张到一定规模时才会出现UDI效应, 并且在当前城市扩张后期阶段, 城市化引起的LUCC对大气湿度的影响要大于其对气温的影响。

## 关键词

土地利用, 覆被变化, 大气湿度, 蒸散发, 城市干岛, MODIS

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

土地利用/覆被变化(LUCC)一方面通过直接改变地表性质(如反照率和粗糙度), 另一方面通过进一步改变地表-大气相互作用过程(如地表能量平衡和水循环), 对区域气候产生影响[1]。城市用地扩张是人口聚集地区LUCC的一种典型情况, 其显著特征是植被覆盖减少和不透水表面增加。城市化对气候产生的影响中最广为人知的是城市热岛(UHI)效应, 即城市地区比其周边乡村地区更为温暖的现象。另一项近年来被越来越多关注到的影响是城市干岛(UDI)效应, 即城市的大气湿度低于其周边乡村地区的现象。

UDI效应是人类活动改变、影响自然生态环境的结果, 反过来它又密切影响着人类生活。以往研究发现, UDI可以通过减少城市云层覆盖, 补偿人为气溶胶对向下长波辐射的影响, 从而减轻城市化对城市变暖的影响[2]。此外, UDI可以在UHI条件下改善人体热舒适性, 因为在高温下人体对湿度变化比对温度变化更为敏感[3]。然而, UDI还可以减慢水蒸汽达到饱和状态的速度, 并延长空气中粉尘、烟雾和颗粒物的悬浮时间, 从而导致空气的能见度降低和污染情况加重[4]。

前人对于UDI效应的研究主要聚焦于其时空分布模式的分析[5][6], 而将UDI直接与以城市化为主的LUCC过程相联系, 并通过分析生态水文学过程的变化来研究其背后形成机制是一种新的思路。城市用地扩张主要是以牺牲耕地和林地面积为代价, 增加不透水地表面积, 这导致了蒸散发(ET)的大量减少。ET通常被认为是大气湿度的主要来源, 同时它还是一个关键的水文气象变量, 可以唯一地将能量循环, 水循环和碳循环联系在一起, 并受到气候变化和LUCC的控制[7]。ET的减少是导致UDI形成的重要因素, 因此, 将LUCC(即叶面积指数[LAI])与水文(即ET)和气象(即气温和大气湿度)的变化过程相联系是合理的, 可以在生态水文过程和城市气候反馈过

程的相互影响中更好地理解 UDI 效应[8]。

本文分析了长江中游城市群大气湿度条件的变化和趋势,并在大气湿度指标和 ET 及 ET 和 LAI 之间进行了相关分析,以期解释城市快速扩张过程是如何通过改变生态水文学过程,从而对区域气候产生影响。相关结果可以为未来城市规划设计、缓解气候变化影响和维持可持续发展提供参考。

## 2. 研究数据及方法

### 2.1. 研究区域

本文研究区域为位于长江中游的国家级城市群(图 1),该区域土地面积达 31.7 万 km<sup>2</sup>,人口 1.21 亿,覆盖城市 31 个,其中核心城市为武汉、南昌和长沙。长江中游城市群以江汉平原、洞庭湖平原和鄱阳湖平原为主体,地处我国中南部,纬度位置较低,太阳辐射量大,同时位于亚热带季风区,冬季盛行偏北风,夏季盛行偏南风,风向相对稳定。

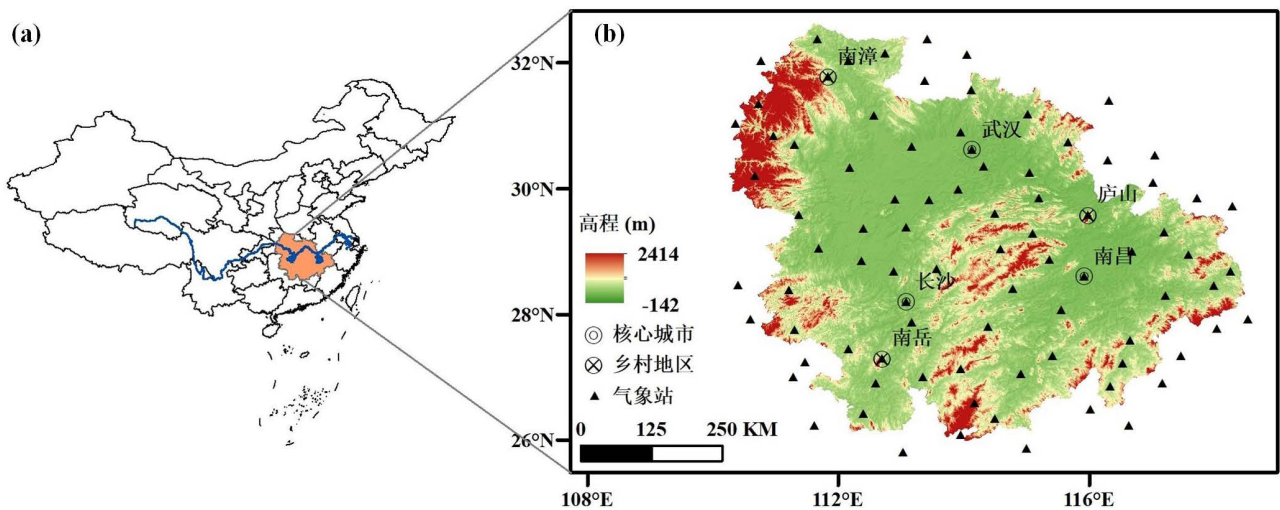


Figure 1. Location and distribution of the weather stations, core urban and rural areas in the study region

图 1. 研究区域位置及气象站点、核心城市和乡村地区的分布

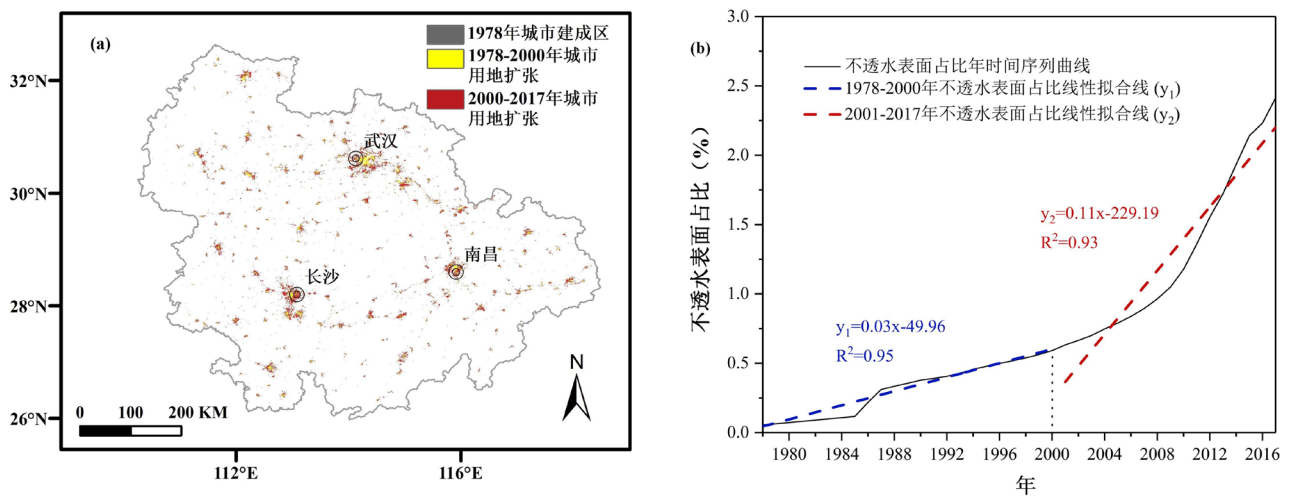


Figure 2. (a) Urban expansion processes of the study region from 1978 to 2017, and (b) annual time series and linear fit of percentage of urban impervious surface

图 2. (a) 研究区域 1978~2017 城市扩张过程及 (b) 不透水表面占比的年时间序列曲线和线性趋势

由不透水表面面积表征的城市建成区表现出了明显的以核心城市为中心的扩张过程(图 2a)。在 1978 年改革开放初期,长江中游城市群的不透水表面占比为 0.055%,而到 2017 年达到 2.413%(图 2b)。不透水表面占比在 2000 年之前以每年 0.03%的速度缓慢增加,而之后以每年 0.11%的速度开始快速增加。不同速度的城市扩张过程很可能对区域气候造成不同程度和方面的影响。

## 2.2. 遥感及气象站点观测数据

改进的 MOD16A2V006 中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据集提供了 2001~2017 年时空分辨率分别为 8 天和 500 m 的实际蒸散发(ET)数据,可用于分析研究区域实际蒸散发的变化过程[9]。从 MOD15A2HV006 数据集可以得到 2001~2017 年时空分辨率分别为 8 天和 500 m 的叶面积指数(LAI)数据,用于评估研究区域的植被覆盖变化[10]。遥感数据反演得到的 1978~2017 年 30 m 分辨率的连续一致不透水表面数据可以用来反映研究区域的城市建成区的扩张过程和规模[11]。

气象数据为从国家气象局获得的 86 个国家级气象站点(图 1b) 1965~2017 年的日气象数据,包括日平均相对湿度、日平均大气压、日最高和最低气温,这些数据用来计算大气湿度指标,即实际水汽压、比湿和水汽压差。计算得到的站点数据进一步利用普通克里金插值算法,插值成 500 m 分辨率的栅格数据,用于研究区域气候变化。

## 2.3. 大气湿度指标

基于不同研究目的,可选择不同湿度变量来反映大气湿度。为同时探究水蒸汽含量和大气湿润程度,本文选择四个湿度指标:相对湿度(RH)、比湿( $q$ )、实际水汽压( $e_a$ )和水汽压差(VPD)。表征一定温度下湿空气中所能容纳的水汽分压强可以由以下公式算出[12]:

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left[ \frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (1)$$

式中:  $e^{\circ}(T)$  (kPa)指在气温  $T(^{\circ}\text{C})$ 时的饱和水汽压。

日平均饱和水汽压( $e_s$ , kPa)由日最高气温( $T_{\max}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )时和日最低气温( $T_{\min}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )时的饱和水汽压取平均得到:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min})}{2} \quad (2)$$

实际水汽压( $e_a$ , kPa)由日平均饱和水汽压( $e_s$ , kPa)乘以日平均相对湿度(RH, %)得到:

$$e_a = e_s \times \text{RH} \quad (3)$$

水汽压差(VPD, kPa)表征大气水分需求,定义为饱和水汽压和实际水汽压的差值:

$$\text{VPD} = e_s - e_a \quad (4)$$

比湿( $q$ , g/g)是一定体积空气中水蒸汽质量与湿空气质量的比值:

$$q = \frac{0.622e_a}{pre - 0.378e_a} \quad (5)$$

式中:  $pre$ (kPa)是大气压强。

## 2.4. 变化点识别与趋势分析

在分析站点数据时,首先利用非参数 E-Disjunctive 检验方法[13],确定核心城市气温和湿度的显著变化点。该方法通过分割分层估计算法,无须事先假设即可同时识别多变量观测序列的变化点的数量和位置。然后利用简单线性回归分析来检测区域栅格尺度大气湿度指标的变化趋势。线性拟合线的斜率代表趋势的方向和程度。进一步利用非参数 Mann-Kendall (MK)检验来评估趋势的显著性[14]。

## 2.5. 相关分析

在区域栅格尺度对 RH 和 ET,  $q$  和 ET,  $e_a$  和 ET, VPD 和 ET, 及 ET 和 LAI 间分别进行 Pearson 相关分析 [15]。根据相关系数  $r$  值和置信水平, 本文中的相关关系分为三种:  $p < 0.1$  的显著正相关,  $p < 0.1$  的显著负相关以及  $p > 0.1$  的无显著相关关系。

## 3. 结果与讨论

本文首先对核心城市及其周边乡村地区的年平均相对湿度(RH)观测数据进行分析, 以识别是否存在大气湿度的明显下降过程, 即 UDI 效应。然后通过计算更多的湿度指标并将站点数据插值成栅格数据, 进一步分析大气湿度变化的区域分布模式。最后结合站点和遥感观测数据对导致湿度变化的潜在机理进行研究和讨论。

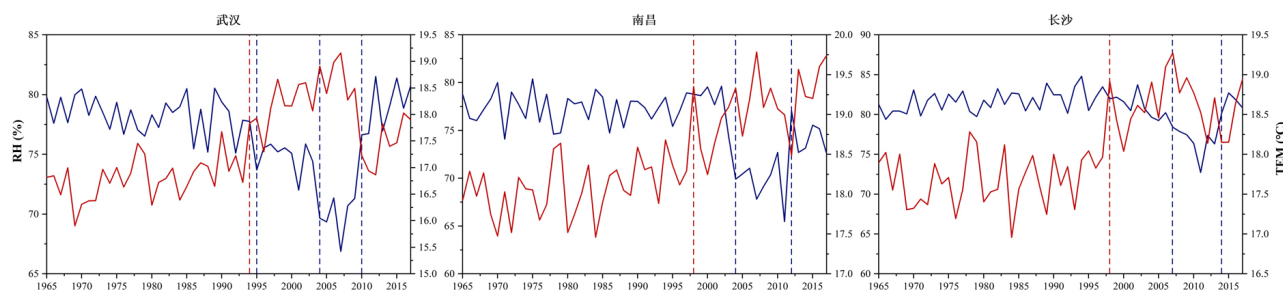
### 3.1. UDI 效应的识别

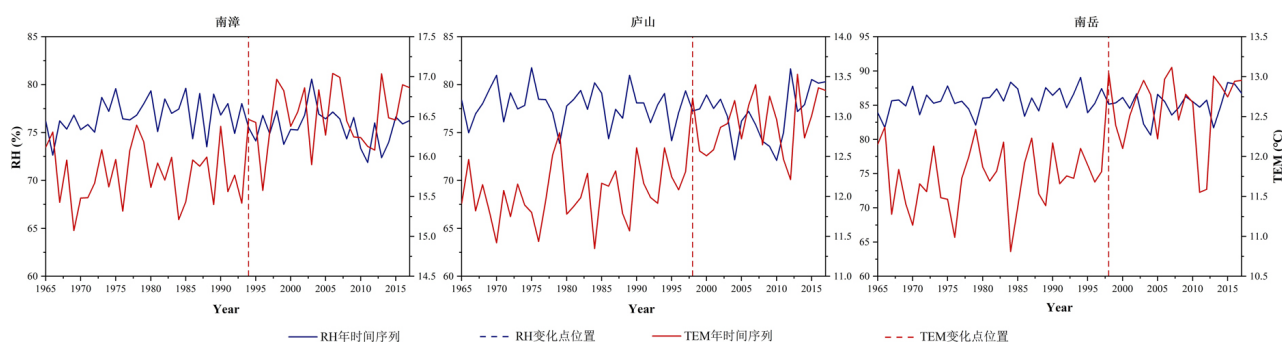
对研究区域核心城市及其周边乡村地区(图 1b)的年平均 RH 和气温(TEM; 图 3)进行非参数多变化点分析的结果表明, 在 1995 年前后, 所有站点(无论是城市还是乡村站点)的 TEM 都存在一个  $p < 0.05$  的显著变化点。在变化点之前, TEM 以较快的速度增长, 而在变化点之后, TEM 开始小幅度波动而没有明显上升或下降。这表明显著升温过程发生在 2000 年之前, 即城市快速扩张阶段之前(图 2)。核心城市与乡村地区同时期发生的升温过程表明, 城市用地扩张可能不是造成气温升高的最主要因素。

核心城市的 RH 显著变化点( $p < 0.05$ )几乎都出现在 2000 年以后, 而乡村地区没有发现 RH 的显著变化点。这说明在城市扩张进入加速阶段后, 核心城市的 RH 在 2000 年之后均出现了不同程度下降并在近些年有所回升, 而乡村地区的 RH 则没有明显变化, 因此研究区域存在 UDI 效应。由于 TEM 的显著变化早于 RH, 而且在 2000 年以后城市不透水表面快速扩张时 RH 才开始下降, 而这时 TEM 却保持相对稳定, 可以推断 LUCC 对大气湿度的影响要强于其对气温的影响。城市地区以大量不透水表面取代植被覆盖的 LUCC, 同时伴随其他影响因素(例如人为气溶胶和温室气体排放), 可能会导致地表辐射量减少, 这首先主要通过降低潜热通量(即蒸散发)来平衡, 然后通过改变显热通量来平衡。因此, 城市用地扩张引起的 LUCC 可能对蒸散发产生更大影响, 从而对地表大气湿度产生影响, 最终导致 UDI 效应的出现[16]。

### 3.2. 区域 UDI 模式

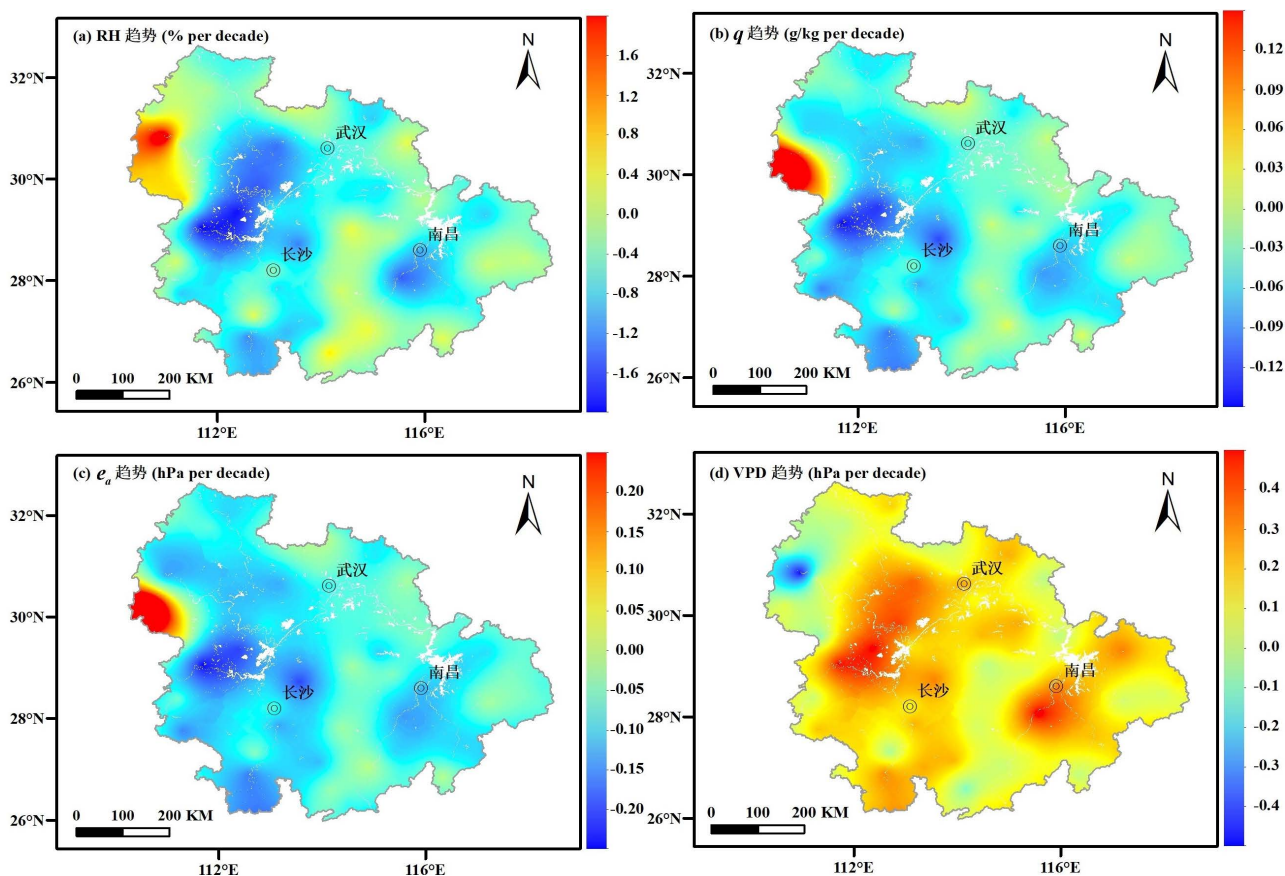
研究区的区域 RH 变化趋势表明, 在 1965~2017 年间, 除西部边缘地区外, 大多数地区都经历了不同程度的下降过程(图 4a)。区域平均的 RH 下降达每十年 0.646%。其中中西部和南昌东部地区的 RH 下降最为明显, 最高达每十年 1.977%。站点数据(图 3)进一步显示, 武汉的 RH 在 1995 年之后急剧下降, 然后在 2004 年之后开始回升, 在 2010 年之后几乎回到上世纪 90 年代水平。南昌和长沙的 RH 都在 2005 年前后开始显著下降, 而在近几年有所回升。在周边的乡村地区, 即南漳, 庐山和南岳, RH 几乎保持不变, 没有发现明显的变化点或变化趋势(图 3; 表 1)。其他三个湿度指标的区域趋势变化分布(图 4b-d)略有不同, 但总体上与 RH 相一致。 $q$ 、 $e_a$  和 VPD 的最大变化率分别为每十年-0.139 g/kg、-0.248 hPa 和 0.588 hPa。





**Figure 3.** Observed annual mean relative humidity (blue solid lines) and air temperature (red solid lines) of core cities (double circles in Figure 1b, the first row in Figure 3) and rural areas (cross circles in Figure 1b, the second row in Figure 3). Blue and red dashed lines indicate change points of relative humidity and air temperature, respectively

**图 3.** 核心城市(图 1b 中双圆圈, 图 3 中第一行)和乡村地区(图 1b 中十字圆圈, 图 3 中第二行)的年平均相对湿度(蓝色实线)和气温(红色实线), 蓝色和红色虚线分别代表相对湿度和气温的变化点



**Figure 4.** Linear trends of annual mean (a) relative humidity, (b) specific humidity, (c) actual vapor pressure and (d) vapor pressure deficit across the study area (1965~2017)

**图 4.** 研究区域年平均(a) 相对湿度、(b) 比湿、(c) 实际水汽压和(d) 水汽压差的线性趋势(1965~2017 年)

### 3.3. UDI 成因

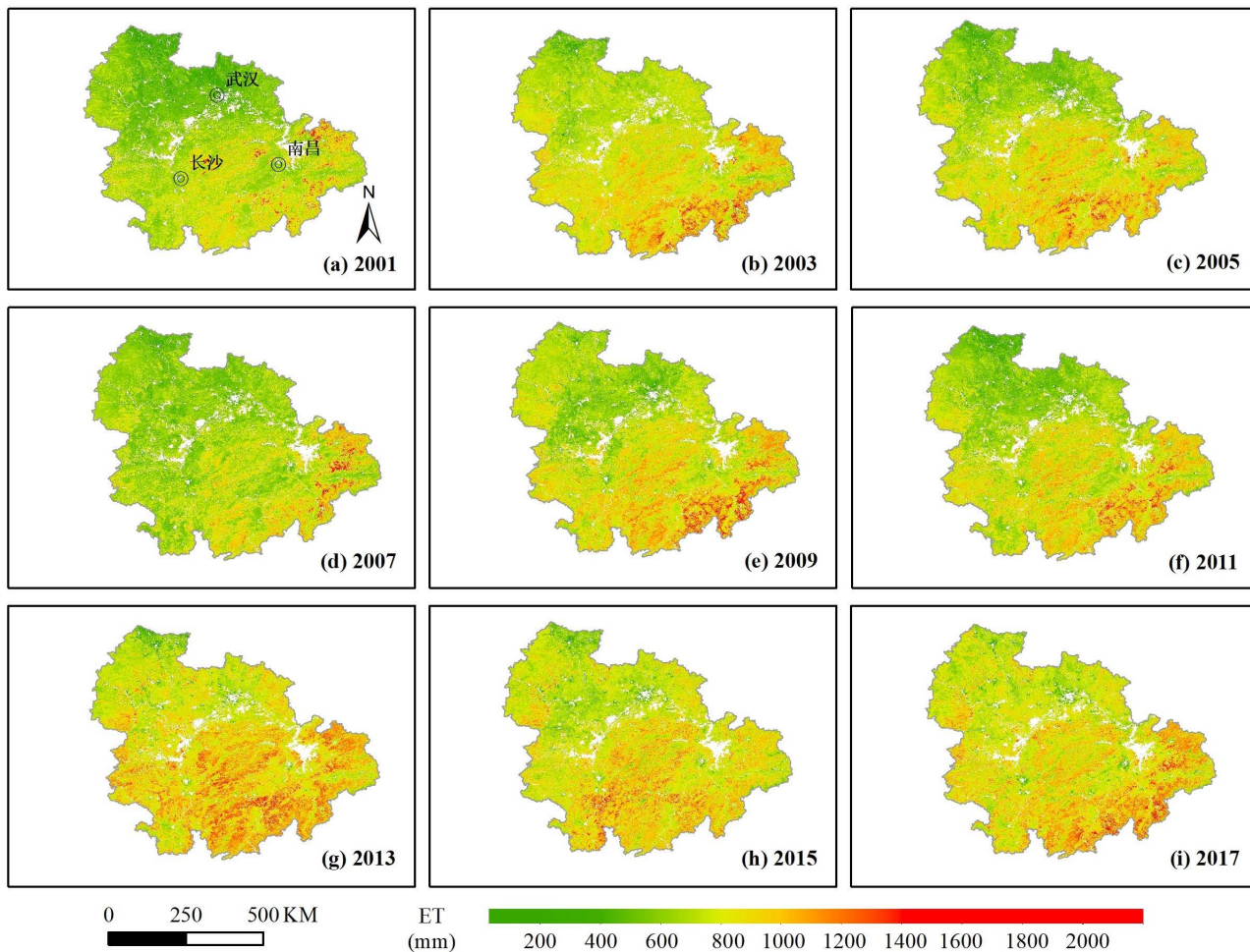
ET 是空气中水蒸汽的主要来源, 其变化与地表大气湿度的变化密切相关。卫星遥感数据(图 5)表明, 在 2001~2017 年间, 研究区北部地区的 ET 首先明显下降, 而后在近些年有明显回升。南部地区的 ET 则表现出相对比较持续的下降过程, 特别是在人类聚集区域。

研究区域湿度指标与 ET 之间的相关分析表明, 在北部和东部地区, RH、 $q$  和  $e_a$  均与 ET 有显著正相关关系( $p < 0.1$ ; 图 6a-c), 而 VPD 与 ET 有显著负相关关系( $p < 0.1$ ; 图 6d)。在中部和中南部地区, 仅  $q$  与  $e_a$  和 ET 有显著正相关关系( $p < 0.1$ ; 图 6b-c), 在 RH/VPD 和 ET 之间没有发现显著的相关性。因此, 武汉、南昌及其周边地区的湿度下降趋势可以很好地通过 ET 下降来解释, 而长沙相对不明显的湿度下降与 ET 变化没有很好的相关性。此外, 武汉及其周边地区近年来绿化和水域面积的大量增加可能引起 ET 回升并减缓了 UDI 效应。

**Table 1.** Linear trends of humidity indicators in core cities and the surrounding areas during 1965~2017. The bold number indicates significant trends with  $p < 0.1$ . (RH: relative humidity,  $q$ : specific humidity,  $e_a$ : actual vapor pressure, VPD: vapor pressure deficit)

**表 1.** 核心城市及乡村地区湿度指标的线性趋势(1965~2017 年), 加粗数字代表通过显著性  $p < 0.1$  的检验(RH: 相对湿度,  $q$ : 比湿,  $e_a$ : 实际水汽压, VPD: 水汽压差)

	RH (% per decade)	$q$ (g/kg per decade)	$e_a$ (hPa per decade)	VPD (hPa per decade)
武汉	<b>-0.80424</b>	<b>0.066135</b>	<b>0.105611</b>	<b>0.345085</b>
南昌	<b>-1.14954</b>	0.004586	0.009024	<b>0.405115</b>
长沙	<b>-0.48624</b>	<b>0.093879</b>	<b>0.13618</b>	<b>0.211619</b>
南漳	-0.27479	<b>0.101103</b>	<b>0.143976</b>	0.055813
庐山	-0.21516	<b>0.140446</b>	<b>0.197131</b>	0.061756
南岳	0.031285	<b>0.140216</b>	<b>0.195</b>	0.016289



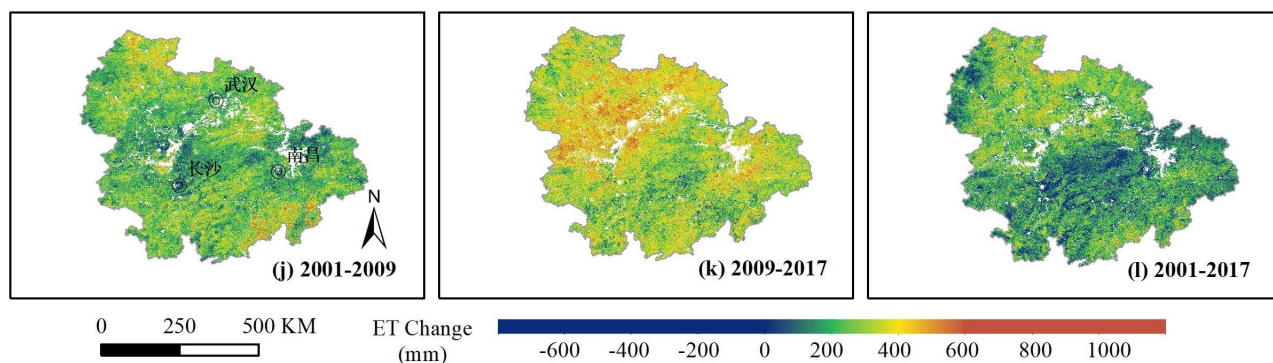


Figure 5. (a)~(i) Annual ET and (j)~(l) its changes between 2001~2009, 2009~2017 and 2001~2017

图 5. 研究区域(a)~(i)年 ET 及(j)~(l)ET 在 2001~2009、2009~2017 和 2001~2017 年间的变化

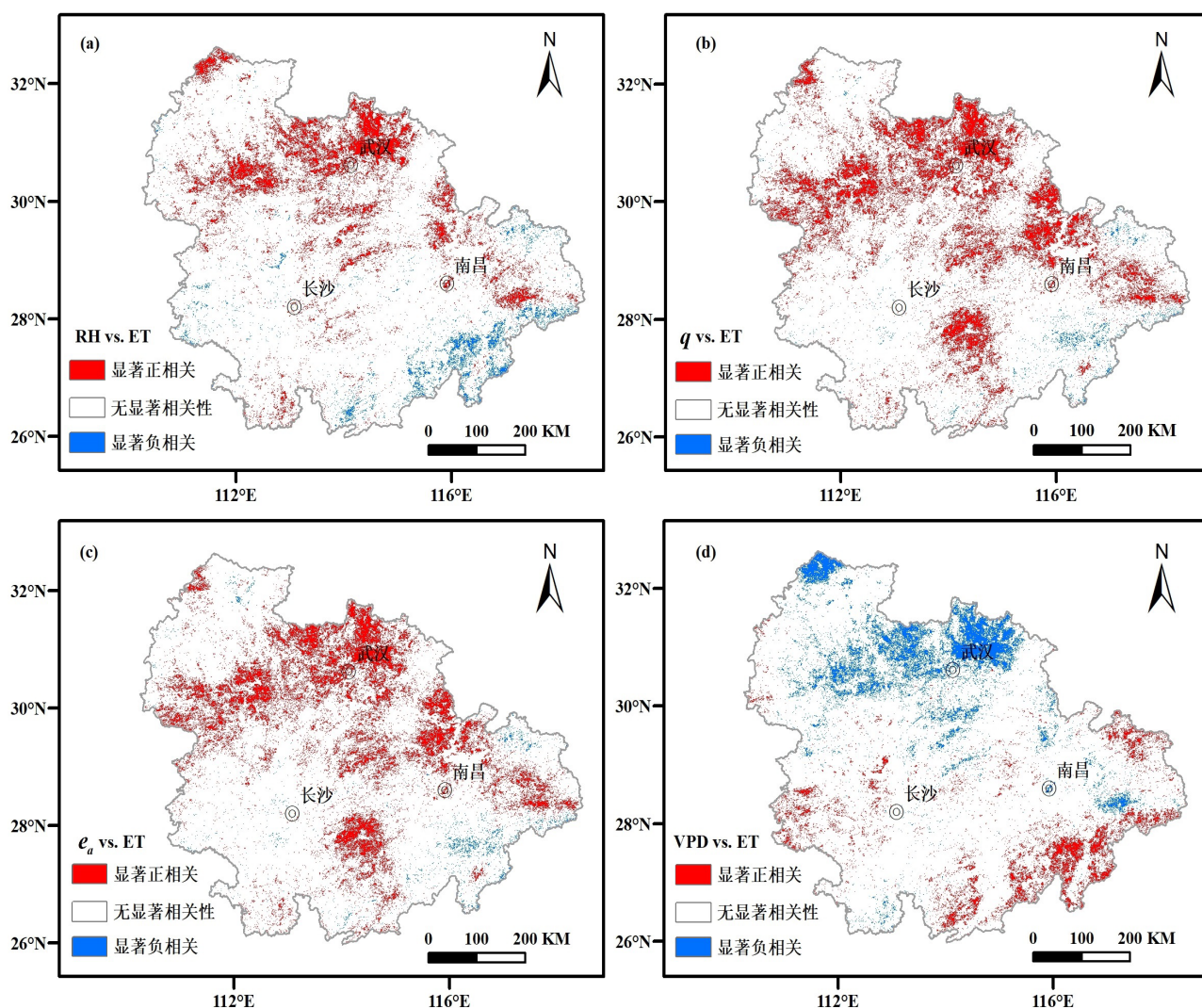


Figure 6. Correlations of (a) RH versus ET, (b)  $q$  versus ET, (c)  $e_a$  versus ET, and (d) VPD versus ET (red and blue areas representing significant positive and negative correlation with  $p < 0.1$ , respectively, and the blank space representing no significant correlation; 2001~2017)

图 6. (a) RH 和 ET, (b)  $q$  和 ET, (c)  $e_a$  和 ET 及(d) VPD 和 ET 的相关关系(2001~2017 年), 红色和蓝色区域分别代表显著性水平  $p < 0.1$  的显著正相关和显著负相关, 空白区域代表没有明显相关性

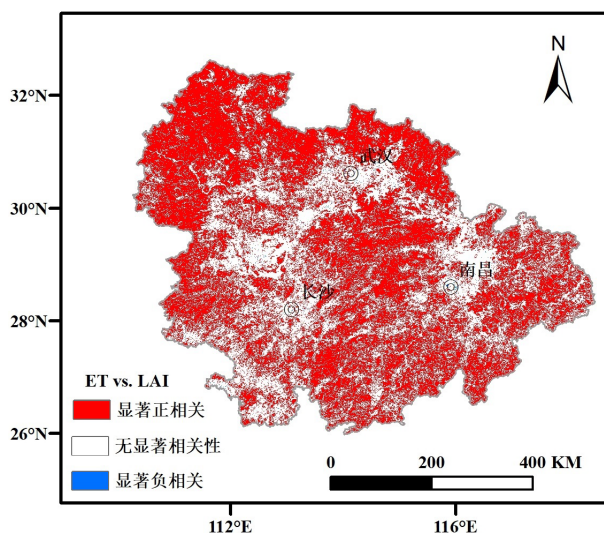


进一步对研究区域的 LAI (图 7) 分析发现, 在人类活动密集的北部、西南和东南地区, LAI 的减少更为明显, 但减少程度不同, 并且在近些年植被覆盖有所恢复。同时, 几乎所有地区的 ET 与 LAI 之间都存在显著的正相关关系( $p < 0.1$ ; 图 8)。这表明 LUCC 通过改变植被覆盖, 极大地影响了相应的蒸散发过程, 进而改变了空气中的水蒸汽含量, 即大气湿度。



Figure 7. (a)~(i) Study region annual LAI and (j)~(l) its changes between 2001~2009, 2009~2017 and 2001~2017

图 7. 研究区域(a)~(i)年平均 LAI 及(j)~(l) LAI 在 2001~2009, 2009~2017 和 2001~2017 年间的变化



**Figure 8.** Correlations of ET versus LAI (red and blue areas representing significant positive and negative correlation with  $p < 0.1$ , respectively, and the blank space representing no significant correlation; 2001~2017)

**图 8.** ET 和 LAI 间的相关关系(2001~2017 年), 红色和蓝色区域分别代表显著性水平  $p < 0.1$  的显著正相关和显著负相关, 空白区域代表没有明显相关性

#### 4. 结论

本研究采用线性回归方法检测了 1965~2017 年长江中游城市群的湿度指标变化趋势, 并通过非参数 Mann-Kendall 方法检验了趋势的显著性。结果表明该区域存在着以大气湿度降低和水汽压差增加为特征的城市干岛(UDI)效应。此外, 在核心城市及其周边乡村站点进行的多变化点分析表明, 核心城市的相对湿度显著变化点均在 2000 年以后, 这与 2000 年以后的城市快速扩张过程相对应。为探讨 LUCC 对区域大气湿度产生影响的机制, 在大气湿度指标与蒸散发之间以及蒸散发与叶面积指数之间进行了相关分析。结果发现, 城市以牺牲植被覆盖为代价快速扩张不透水表面时, 对区域大气湿度产生了巨大影响, 具体表现为大气湿度随着由于植被覆盖减少导致的蒸散发的下降而下降, 这表明城市扩张极大可能会通过改变生态水文学过程来影响区域气候。

此外, 由于城市的扩张和连通性, UDI 效应倾向于形成以核心城市为中心的干岛群, 而不是孤立的干岛。我们推测当城市化发展到一定规模, 即大量的植被被不透水表面所取代时才会出现 UDI 效应, 并且由城市化引起的 LUCC 对大气湿度的影响可能大于其对气温的影响。因此, 在城市加速扩张的后期阶段, UDI 效应可能表现更为突出。考虑到未来城市将更加倾向于发展成为城市群, 城市化对于区域气候, 特别是对大气湿度的突出影响应引起更加广泛的关注, 以应对气候变化和维持可持续发展的挑战。

#### 基金项目

国家自然科学基金项目(41890822 和 51525902)资助。

#### 参考文献

- [1] FOLEY, J. A., DEFRIES, R., ASNER, G. P., et al. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- [2] DU, J., WANG, K., JIANG, S., et al. Urban dry island effect mitigated urbanization effect on observed warming in China. *Journal of Climate*, 2019, 32(18): 5705-5723. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0712.1>

- [3] HONDULA, D. M., JR., R. C. B., ANDRADE, R., et al. Biometeorology for cities. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61: S59-S69. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1412-3>
- [4] DING, Y., LIU, Y. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. *Science China Earth Sciences*, 2013, 57: 36-46. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4792-1>
- [5] HAGE, K. D. Urban-rural humidity differences. *Journal of Applied Meteorology*, 1975, 14: 1277-1283. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1277:URHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1277:URHD>2.0.CO;2)
- [6] MORIWAKI, R., WATANABE, K. and MORIMOTO, K. Urban dry island phenomenon and its impact on cloud base level. *Journal of JSCE*, 2013, 1(1): 521-529. [https://doi.org/10.2208/journalofjsce.1.1\\_521](https://doi.org/10.2208/journalofjsce.1.1_521)
- [7] FISHER, J. B., MELTON, F., MIDDLETON, E., et al. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, 2017, 53: 2618-2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>
- [8] HAO, L., HUANG, X., QIN, M., et al. Ecohydrological processes explain urban dry island effects in a wet region, southern China. *Water Resources Research*, 2018, 54(9): 6757-6771. <https://doi.org/10.1029/2018WR023002>
- [9] RUNNING, S., MU, Q. and ZHAO, M. MOD16A2 MODIS/terra net evapotranspiration 8-day L4 global 500m SIN grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2017.
- [10] MYNENI, R., KNYAZIKHIN, Y. and PARK, T. MOD15A2H MODIS/terra leaf area index/FPAR 8-day L4 global 500m SIN grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015.
- [11] GONG, P., LI, X. and ZHANG, W. 40-Year (1978-2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing. *Science Bulletin*, 2019, 64(11): 756-763. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.04.024>
- [12] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56, Roma: FAO, 1998.
- [13] MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of Economic and Social*, 1945, 13: 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- [14] MATTESON, D. S., JAMES, N. A. A nonparametric approach for multiple change point analysis of multivariate data. *Journal of the American Statistical Association*, 2014, 109(505): 334-345. <https://doi.org/10.1080/01621459.2013.849605>
- [15] PEARSON, K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1895, 58: 240-242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
- [16] MILLER, R. L., TEGEN, I. and PERLWITZ, J. Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109: D04203. <https://doi.org/10.1029/2003JD004085>