

长江三角洲地区四季变化特征及城市化影响研究

胡艳¹ 史军^{1, 2} 张敏³¹

(1. 上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030;

2. 上海市青浦区气象局, 上海 201700;

3. 江苏省气象服务中心, 江苏 南京 210008)

【摘要】: 基于 1961~2017 年长江三角洲地区(以下简称长三角)112 个气象站点逐日气温数据和 1981~2015 年各气象站点周边 10km 范围内建设用地面积变化资料, 利用线性趋势、Mann-Kendall 突变检验、相关性和显著性检验等气候统计方法, 分析了长三角四季开始日期、四季长度变化特征及其受城市化的影响。结果表明: 过去 57 年间, 长三角入春和入夏日期分别以 2.1 和 1.7d/10a 的趋势显著提早, 入秋和入冬日期分别以 2.0 和 1.3d/10a 的趋势显著推迟, 并在几乎所有地区都呈提早或推迟趋势。长三角区域平均夏季长度以 3.6d/10a 的趋势显著延长, 冬季长度以 3.5d/10a 的趋势显著缩短, 且在长三角绝大部分地区都显著; 春、秋季长度变化不显著。四季开始日期大多在 20 世纪 90 年代中后期发生显著突变。区域内城市建设用地的增长与四季变化具有较好的对应关系。城市化进程引起的建设用地增长, 导致了下垫面地表物理属性的改变和地表能量平衡变化, 促进四季增温并使春夏季提早、秋冬季推迟和夏季长度的增加、冬季长度的缩短。

【关键词】: 四季 开始日期 长度 城市化

【中图分类号】: P467 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)06-1343-13

城市化和气候变化是 21 世纪两个重要的全球性环境问题^[1,2]。近百年来, 全球气候呈现出以变暖为主要特征的显著变化^[3]。我国气候在近 60 年也呈现出显著增暖趋势^[4], 并影响到季节开始日期和长度的变化^[3,4]。季节变化与气象灾害、作物熟制、人体健康、生态环境等有密切的关系^[5~7]。尤其在农业经济方面, 四季变化会影响到作物种植结构调整、特定品种的选取、收获产量变化、农业灾害损失等^[8,9]。开展区域四季变化特征研究, 有助于更好地认识全球气候变暖背景下我国气候变化的区域差异, 也可以为国家因地制宜地生态环境建设、农业结构调整和促进社会经济可持续发展等提供重要的科学依据。

20 世纪 50 年代以来, 世界上大部分国家四季起止时间和长度都发生了显著变化, 如 Allen 和 Sheridan^[10]使用美国 60 个地面气象观测站温度数据和高层环流模式, 分析了 1948~2012 年美国四季变化特征, 表明自 1948 年以来, 秋、冬季推迟, 而春、夏季提早, 且在沿海地区和大城市地区变化更为突出。在我国, 大部分地区自 20 世纪 80 年代以来, 春季、秋季和冬季变短而夏季变长, 春夏季提早而秋冬季推迟, 四季开始日期的变化和温度变化较一致, 但也存在空间分布差异^[11~14]。四季变化的主要驱动因素是全球和区域变暖。在区域尺度, 城市化进程及土地利用变化对气候的影响已成为当今全球变化研究中最受关注和亟

作者简介: 胡艳(1980~), 女, 工程师, 主要研究方向为城市生态气象. E-mail: 6544191@qq.com

史军 E-mail: sunrainlucky@qq.com

基金项目: 上海市科技计划项目(20232410100; 18DZ1202106); 国家自然科学基金项目(41571044)

待解决的问题之一。城市化发展对局地气候变化影响的最主要体现是地表气温^[15, 16], 如在 1961~2013 年间, 我国气候变暖达 1.44℃, 其中城市化带来的增暖约占 1/3 (0.49℃)^[17]。因此, 研究区域城市化、土地利用变化导致的地表气温升高以及对四季开始日期和长度变化的影响, 对区域气候变化风险适应和现代城镇规划布局具有显著的实践意义。

长江三角洲地区(以下简称长三角)是我国人口最为密集、区域经济发展水平最高的地区, 也是我国最大的城市群。20 世纪 80 年代以来, 伴随着大规模的城市化、工业化和人口、经济的快速集聚, 大量耕地转变为建设用地, 长三角气候也发生显著变化, 如史军等^[18]分析表明, 1959~2005 年长三角气温显著升高, 而相对湿度、风速和日照时数都显著减少, 也有研究开展了长三角人类活动对地表气温升高的归因分析, 如 Feng 等^[19]表明城市下垫面和人为热排放两者共同作用导致长三角地表气温上升达 2.0℃; Wu 等^[20]也指出城市化进程对长三角区域增暖的贡献达到 36%~68%。对于长三角季节变化, 也有一些相关分析, 如姜燕敏^[21]、吴昊旻^[22]等利用长三角地区 30 个站点对 1961~2010 年四季变化特征进行了分析, 表明气温对夏季延长的影响最显著, 长三角春夏提早、秋冬延后, 四季长度和起始时间存在地区差异。

然而, 已有研究多是基于国家基本、基准站数据, 站点个数有限, 对开展较小区域范围(如长三角)的四季变化特征和空间分布具有局限性, 而且已有研究分析时间段较早, 缺乏对近 10 年来长三角四季变化特征的追踪, 也较少开展四季变化的成因分析, 尤其是从站点尺度上分析城市化、下垫面改变对四季影响的研究很少。城市下垫面的改变导致城市整体气候的变化已经受到全世界的重视^[23]。在长三角地区, 气象站点覆盖率高, 站点数据质量好, 并且有 1980 年以来连续多期卫星遥感反演的土地利用类型数据, 这为开展区域高时空分辨率的四季变化以及站点周边环境变化对四季变化的影响提供了可靠的数据保障。鉴于此, 本文开展 1961~2017 年长三角四季变化特征分析, 并试图利用气温和城市建设用地面积与四季变化的关系来探讨四季变化的成因, 这对决策部门针对该地区的城市发展规划、人类宜居生活评价以及长三角一体化生态环境保护等方面的政策制定具有重要的参考意义。

1 数据及方法

1.1 数据资料

在综合考虑站点时间序列长度及数据缺测率的基础上, 本文选取长三角共 112 个气象站点(包括基准站、基本站和一般站)1961~2017 年逐日气温数据开展四季开始日期和长度变化特征分析。该数据来自于国家气象信息中心, 数据均通过质量控制。

此外, 本文利用上述 112 个气象站点周边 10km 范围内的建设用地面积数据来分析四季变化受城市化的影响。建设用地面积数据来自中国科学院资源环境科学数据中心, 包括 1980 和 2015 年两期 LandsatMSS/TM/ETM+卫星遥感反演的空间分辨率为 30m 土地利用类型数据^[24]。首先分别统计了 112 个气象站点周边 10km 范围内 1980 和 2015 年建设用地面积比例, 然后利用 2015 年建设用地区所占比例减去 1980 年建设用地区比例, 获得各站点 10km 范围内建设用地的增长率。

1.2 四季划分标准

在本文, 采用气温值为标准来划分四季。按照气候季节的划分标准(QX/T152-2012)^[25], 四季划分标准如下:

(1)入春: 立春(2月4日左右)以后, 出现连续五日滑动平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$, 则为入春, 其首日为春季首日; (2)入夏: 立夏(5月5日左右)以后, 出现连续五日滑动平均气温 $\geq 22^{\circ}\text{C}$, 则为入夏, 其首日为夏季首日; (3)入秋: 立秋(8月7日左右)以后, 出现连续五日滑动平均气温 $< 22^{\circ}\text{C}$, 则为入秋, 其首日为秋季首日; (4)入冬: 立冬(11月7日左右)以后, 出现连续五日滑动平均气温 $< 10^{\circ}\text{C}$, 则为入冬, 其首日为冬季首日。四季长度定义为相邻两个季节之间的时间段。由于冬季长度为年末至次年年初, 因此本文得到的冬季长度时间序列为 1961~2016 年。

1.3 分析方法

本文首先基于长三角区域内各站点 1961~2017 年逐日平均气温数据,根据四季划分标准,确定各站逐年四季开始日期以及四季长度,利用气候统计技术,包括线性趋势、显著性检验等,分析了长三角四季开始日期、四季长度的年际变化、年代际变化和空间变化趋势,并利用 Surfer 软件进行空间显示。其次,利用 Mann-Kendall 突变检验并取 0.05 显著性水平,开展四季开始日期、四季长度突变检验,给出相应的突变时间点。然后,充分考虑到 20 世纪 90 年代以来长三角地区快速城市化、土地利用变化及增暖的特征,选择 1990 年为分界点,将整个研究时期再划分为两个时间段:1961~1990 年和 1991~2017 年,分析了区域年平均气温在 1990 年前后两个时间段的变化趋势差异和各站点建筑用地百分比变化率。最后,采用散点图分析 1981~2015 年站点周边建设用地增长率与四季开始日期、四季长度的关系,由此来讨论城市化对长三角四季气候变化的影响。

2 结果与分析

2.1 四季开始日期的变化

1961~2017 年期间,长三角地区入春日期以 2.1d/10a 的线性趋势极显著提早,入夏日期以 1.7d/10a 的线性趋势显著提早,入秋日期以 2.0d/10a 的线性趋势极显著推迟,入冬日期以 1.3d/10a 的线性趋势显著推迟(图 1)。就整个长三角区域平均而言,入春日期在本世纪最初 10 年(2001~2010 年)最早(平均 3 月 16 日),而在 20 世纪 60 年代最晚(平均 3 月 27 日);入夏日期在本世纪 2001~2010 年和 2011~2017 年间最早(5 月 16 日),而在 20 世纪 70 年代最晚(5 月 26 日);入秋日期在 20 世纪 70 年代最早(9 月 20 日),而在本世纪 2001~2010 年间最晚(10 月 1 日);入冬日期在 20 世纪 70 和 80 年代最早(11 月 20 日),而在本世纪 2011~2017 年间最晚(11 月 26 日)(表 1)。

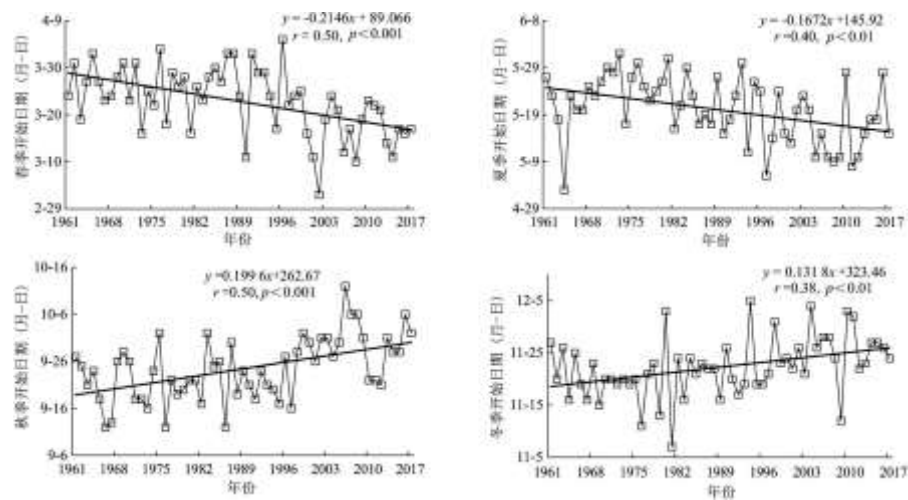


图 1 1961~2017 年长三角地区四季开始日期年际变化

表 1 1961~2017 年长三角地区四季开始日期及长度的年代际特征

时期	四季开始日期(单位: 月/日)				四季长度(单位: d)			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
1961~1970	3/27	5/21	9/22	11/21	57.0	122.3	59.8	125.9

1971~1980	3/25	5/26	9/20	11/20	64.1	115.2	60.4	125.1
1981~1990	3/25	5/22	9/23	11/20	57.3	123.7	58.5	126.8
1991~2000	3/26	5/19	9/23	11/23	58.6	125.9	60.3	120.9
2001~2010	3/16	5/16	10/1	11/25	61.6	136.9	55.1	111.9
2011~2017	3/17	5/16	9/28	11/26	63.0	132.9	58.1	110.5

1961~2017 年间，长三角地区入春和入夏日期在几乎所有地区都呈现出提早趋势，且入春日期的提早在长三角除浙江中南部个别站外的所有地区都在统计上显著(图 2a)，入夏日期的提早仅在江苏东南部、上海中北部和浙江中北部及沿海地区在统计上显著(图 2b)。入春日期显著提早区域的变化趋势多为 1.2~3.0d/10a，入夏日期显著提早区域的变化趋势多为 1.0~3.0d/10a。长三角地区入秋和入冬日期在几乎所有地区都呈现出推迟趋势，入秋日期的推迟在江苏中南部、上海市和浙江北部和沿海地区在统计上显著，推迟线性趋势率多为 1.0~3.0d/10a(图 2c)，而入冬日期的推迟在江苏中南部、上海市和浙江中东部在统计上显著，推迟线性趋势率多为 1.0~2.0d/10a(图 2d)。

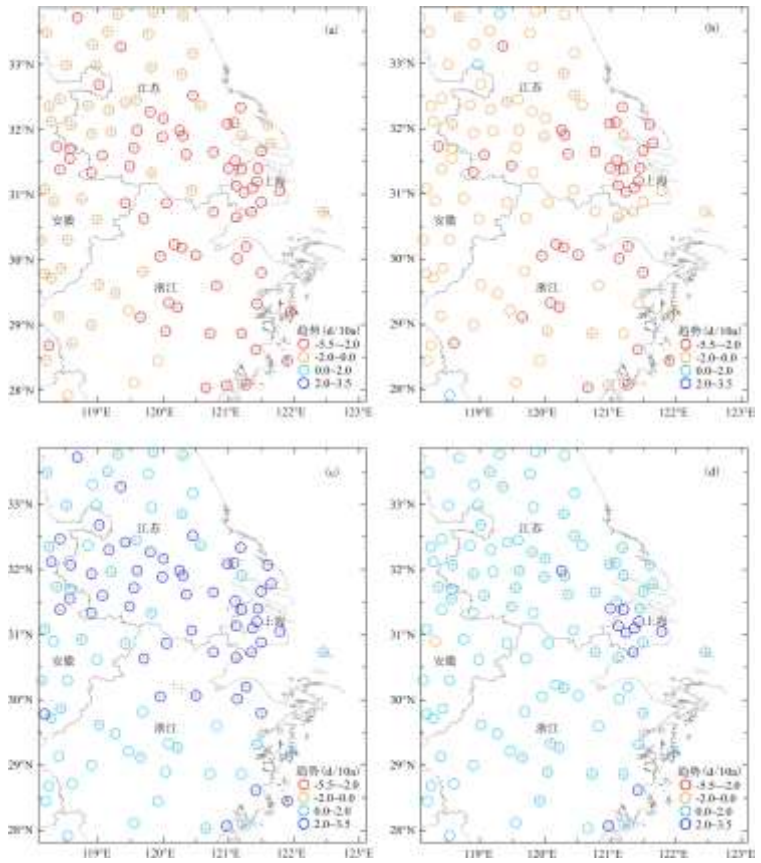


图 2 1961~2017 年长三角地区四季开始日期的变化趋势

注：单位：d/10a；a：春季；b：夏季；c：秋季；d：冬季；+：通过 0.05 显著性水平检验。

2.2 四季持续长度的变化

1961~2017 年期间, 长三角地区夏季以 3.6d/10a 的线性趋势极显著延长, 冬季以 3.5d/10a 的线性趋势极显著缩短, 春季和秋季分别以 0.6 和 0.7d/10a 的线性趋势延长和缩短, 但二者变化趋势在统计上均不显著(图 3)。就整个长三角区域平均而言, 春季长度在 20 世纪 70 年代最长(64.1d/a), 而在 20 世纪 60 年代最短(57.0d/a); 夏季长度在本世纪最初 10 年最长(136.9d/a), 而在 20 世纪 70 年代最短(115.2d/a); 秋季长度在 20 世纪 70 年代最长(60.4d/a), 而在本世纪最初 10 年间最短(55.1d/a); 冬季长度在 20 世纪 80 年代最长(126.8d/a), 而在本世纪 2011~2017 年间最短(110.5d/a)(表 1)。

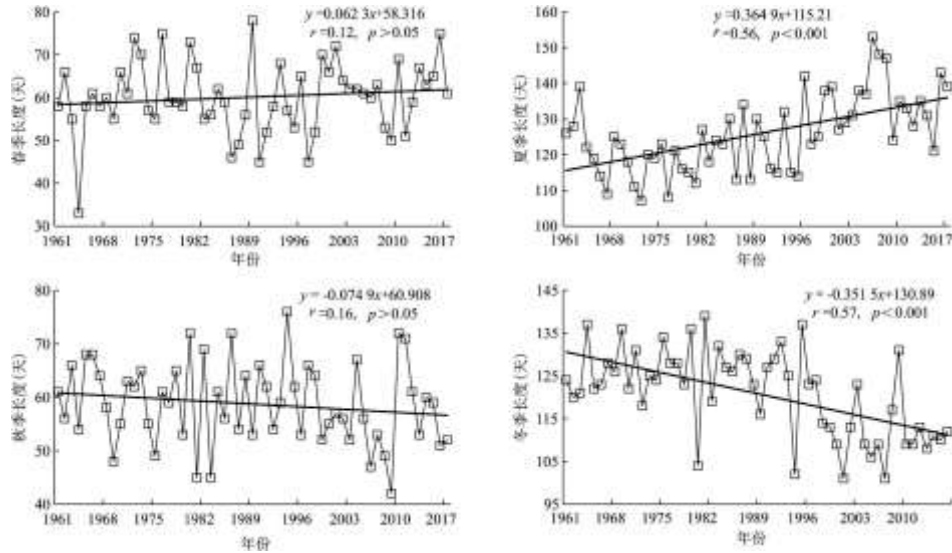


图 3 1961~2017 年长三角地区四季长度(单位: d)年际变化

1961~2017 年间, 春季长度在长三角大部分地区都延长(除上海北部、江苏南通地区及浙江中部个别区域), 夏季长度在长三角所有地区都延长, 但春季长度的延长在长三角地区在统计上都不显著(图 4a)。夏季长度除在浙江中南部、安徽西部和江苏北部地区不显著延长外, 在其余大部分地区都显著延长, 线性趋势率多为 2.0~4.8d/10a(图 4b)。秋季长度除了在浙江东南部延长外, 在长三角其他地区都缩短, 但其长度的变化在统计上几乎都不显著(图 4c)。冬季长度在整个长三角地区都显著缩短, 且在江苏南部、上海、浙江北部和东北部地区, 冬季长度多以 2.1~5.3d/10a 的线性趋势大幅缩短(图 4d)。

2.3 四季变化的突变分析

为了分析长三角地区四季变化的突变特征, 分别对四季开始时间和长度进行 Mann-Kendall 突变检验。结果表明, 1961~2017 年期间, 长三角地区春季开始时间在 2000 年之前大多为推迟, 但不显著; 2000 年之后, 春季开始时间逐渐提前, 在 2008 年之后显著提前, 并在 2013 年开始呈极显著提前趋势(图 5a)。春季开始时间在 2004 年发生了突变, 由不显著推迟变化转为单一明显的提前趋势。夏季开始时间在 20 世纪 60 年代呈提前趋势, 但在 20 世纪 60 年代末到 80 年代初呈显著推迟趋势, 90 年代以后转为一致的提前趋势且逐渐显著(图 5b)。夏季开始时间的一致提前年份(1994 年)比春季(2001 年)早 7 年, 显著提前趋势比春季略早, 即在 2006 年开始提前趋势显著, 并在 2008 年呈极显著提前趋势, 突变时间(1999 年)也比春季偏早。秋季开始时间在 1961~1983 年间呈提前趋势, 其中 1965~1967 年出现了显著提前, 1983 年以后秋季开始时间出现推迟趋势, 1997 年(突变时间)后为一致推迟期, 其中 2003 年开始显著推迟, 2005 年开始呈极显著推迟趋势(图 5c)。冬季开始时间在 1961~1985 年为不显著提前, 1985 年以后为一致推迟期, 其中 1996 年为突变时间, 2004 年开始逐渐呈显著推迟趋势, 2006 年开始呈极显著推迟趋势(图 5d)。从秋冬季开始时间的对比分析来看, 变化趋势相似, 但一致推迟时间秋季比冬季偏晚 13 年。总体而言, 秋冬季节的突变转变比春夏季节早, 且春季在 20 世纪 70 年代处于波动调整期, 夏秋季节从 20 世纪 80 年代到 90 年代中期处于波动调整期, 而冬季开始时间呈现出从提前到推迟的明显线性趋势。

从四季长度突变检验结果来看(图 5e 和 5f), 从 1989 年夏季长度开始由缩短转为延长, 且从 2002 年开始显著延长, 2004 年开始极显著延长。冬季长度从 1999 年开始转为缩短, 且从 2005 年开始显著缩短, 2007 年开始极显著缩短。冬季长度突变时间点比夏季偏晚。春秋季长度突变变化不显著(图略)。从 1961~2017 年长三角地区四季突变时间点统计(表 2)可见, 季节变化气候特征的突变与我国长三角地区 20 世纪 90 年代开展的大规模城市化、工业化有一定的联系, 本文将在下一节进行讨论。

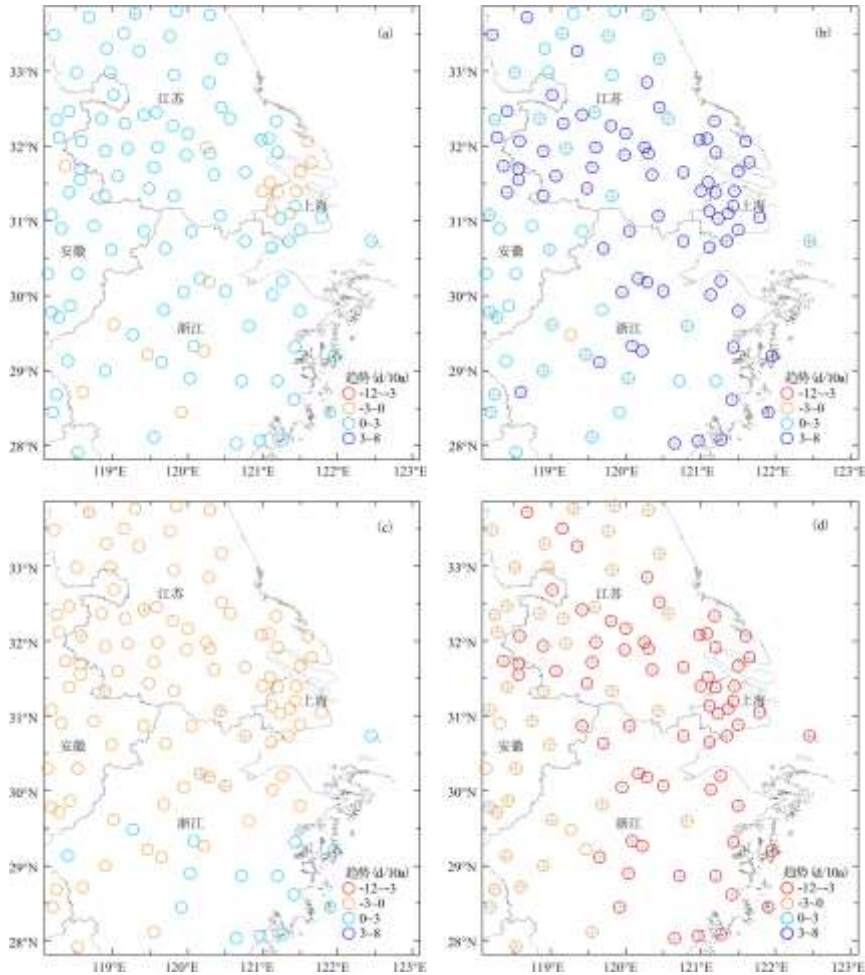


图 4 1961~2017 年长三角地区四季长度的变化趋势

注: 单位: d/10a; a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季; +: 通过 0.05 显著性水平检验。

3 四季气候变化的成因分析

3.1 气温对四季变化的影响

由 2.3 节四季突变分析可知, 四季开始期的提早或推迟、长度的缩短或延长的转变时期大都集中在 20 世纪 90 年代中后期, 而 20 世纪 90 年代初正是长三角地区工业、经济、社会发生巨大变革的时期, 城市化进程加速, 人类活动对气候产生了较大影响, 所以选取 1990 年作为气候转折点来分析年平均气温对四季气候变化的影响。

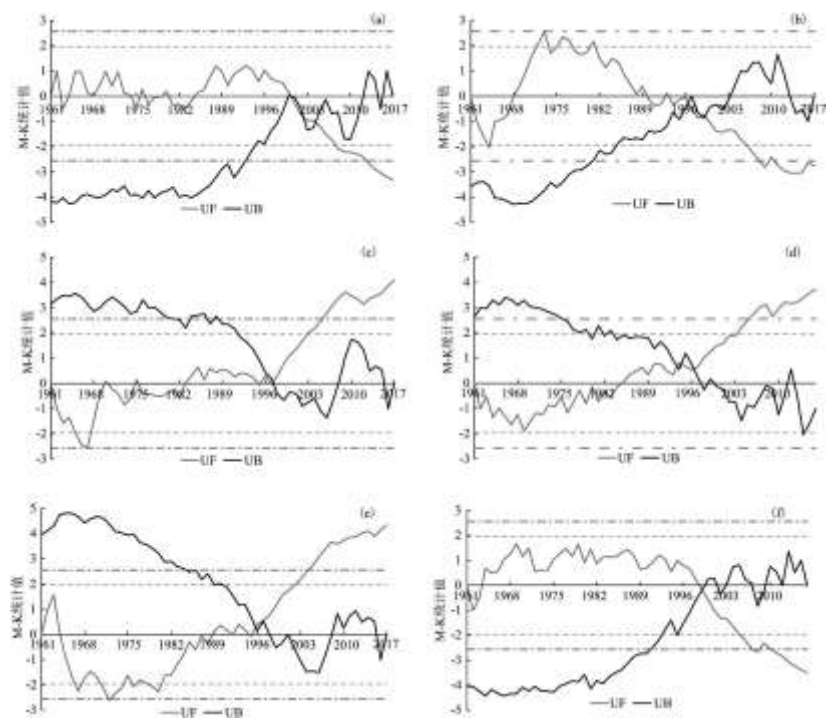


图 5 1961~2017 年长三角地区(a)春季开始日期、(b)夏季开始日期、(c)秋季开始日期、(d)冬季开始日期、(e)夏季长度、(f)冬季长度时间序列 Mann-Kendall 统计值曲线

注：虚线为 0.05 显著性水平，点划线为 0.01 显著性水平。

表 2 1961~2017 年长三角地区四季突变时间点统计

时期	四季开始日期(单位：年)				四季长度(单位：年)			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
1961~2017	2004	1999	1997	1996	/	1997	/	1999

从长三角区域近 57 年平均气温来看(图 6), 年均温度呈极显著上升趋势, 倾向率为 $0.28^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 其中 1961~1990 年, 年均气温呈略下降趋势, 但趋势不显著; 1991~2017 年气温呈极显著的上升趋势, 倾向率为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。从长三角区域 1981~2015 年增温趋势空间分布可见(图 7a), 长三角所有地区增温趋势都显著, 尤其是在江苏南部、上海市、浙江东北部等地, 达到 $0.5\sim 0.8^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。可见, 在全球变暖的气候背景下, 区域年平均气温显著上升, 四季开始日期和长度随之发生了明显的变化, 表现为入春、入夏提早, 入秋、入冬推迟; 春夏季延长, 秋冬季缩短。因此气温的升高对四季变化有较大的影响。

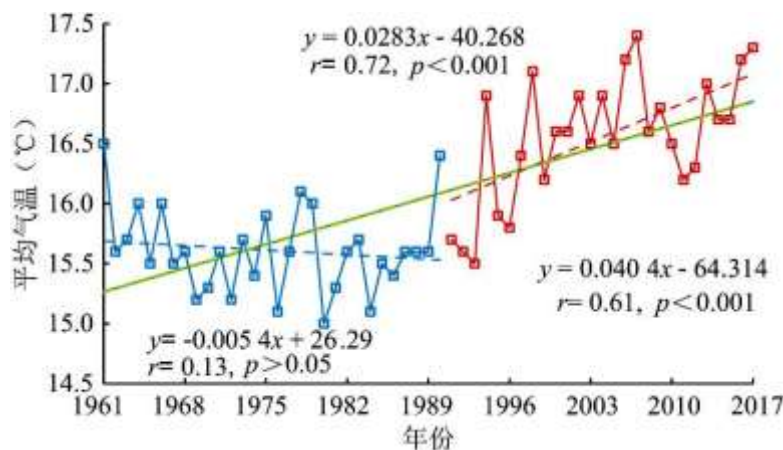


图6 1961~2017年长三角地区平均气温(单位: °C)年际变化

3.2 城市化对四季变化的影响

王原等^[26]研究表明,上海城市化发展可以划分为1960~1978年城市化停滞时期、1978~1990年过渡时期和1990~2006年快速城市化时期3个阶段。1981~2015年间,长三角地区经历了改革开放初期到社会经济高速发展时期,各大中小城市加快建设,工业发展伴随着建设用地普遍较快增长。从1981~2015年站点周边建设用地增长率的空间分布可见(图7b),江苏中北部、安徽和浙江西部地区的建设用地变化较小(<20%),与当地城市化进程较慢相一致;而长江沿岸、浙江中北部及沿海地区 and 上海市等长三角核心区域近年来城镇化、工业化发展较快,其建设用地增长率普遍达30%以上,与气温增温幅度较大区域有较好的对应关系(图7a)。其中,建设用地增长40%以上的地区中,有一半达到了0.6~0.8°C/10a的显著增温趋势。1981~2015年间的增温率与建设用地增长率呈极显著的正相关,其线性相关系数(r)为0.64(图8)。

在1981~2015年建设用地快速增长期间,长三角四季也发生了显著的变化。长三角春、夏季开始时间变化率与建设用地增长率呈极显著负相关,线性相关系数(r)分别为0.51和0.54;秋、冬季开始时间变化率与建设用地增长率呈极显著正相关,线性相关系数(r)分别为0.46和0.42(图9)。入夏时间的提早与建设用地增长率关系最显著。在四季长度方面,春季长度变化率与建设用地增长率呈显著负相关($r=0.27$),夏季长度变化率与建设用地增长率呈极显著正相关($r=0.56$),秋季长度变化与建设用地增长率相关不显著,冬季长度变化率与建设用地增长率呈极显著负相关($r=0.53$)。与入夏时间显著提早相对应,夏季长度的延长与建设用地增长率关系最显著(图10)。

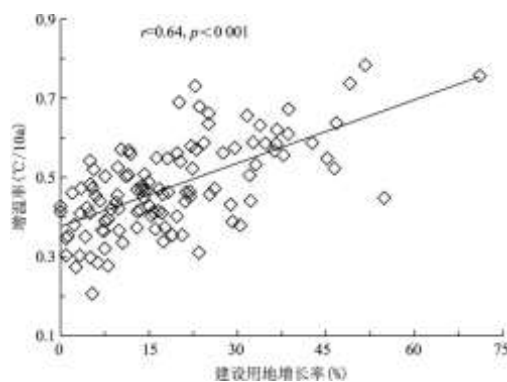


图8 1981~2015年长三角地区气象站点增温率与站点周边建设用地增长率的关系

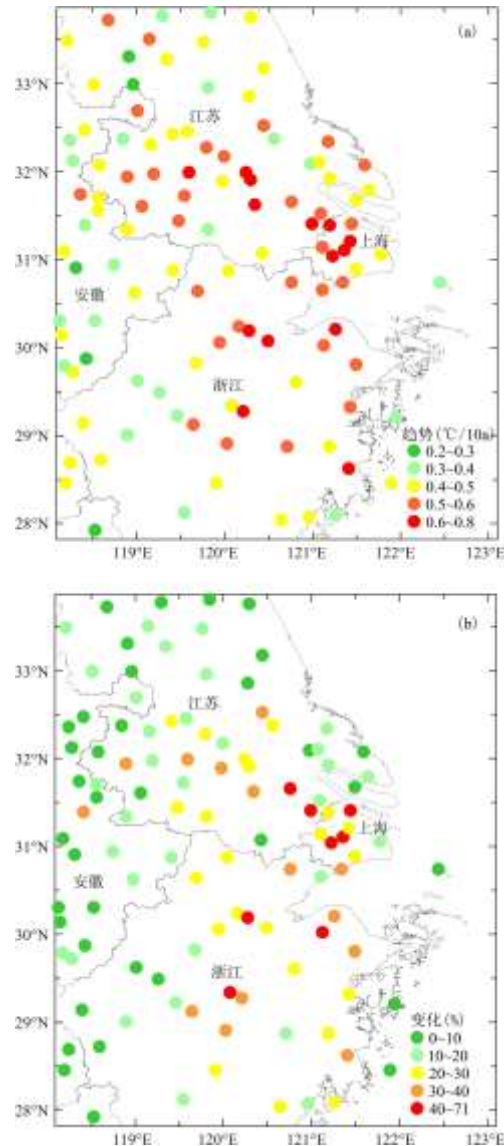


图 7(a) 1981~2015 年长三角地区平均气温变化趋势

(单位: d/10a) 与 (b) 站点周边建设用地增长率(单位: %)的空间分布

4 讨论

4.1 长三角四季开始日期及长度变化

全球气候变暖和快速而大范围的城市化已经造成了许多气候和环境问题。长三角城市群是世界六大城市群之一,其城镇最为密集、城市化水平最高,加速发展的工业和频繁的人类活动导致该区域形成了独特的城市气候特征。1961~2017 年,长三角地区的入春、入夏日期分别以 2.1 和 1.7d/10a 的线性趋势显著提早,入秋、入冬日期分别以 2.0 和 1.3d/10a 的线性趋势显著推迟;夏季以 3.6d/10a 的线性趋势极显著延长,冬季以 3.5d/10a 的线性趋势极显著缩短(图 1 和图 3)。这与全国四季变化趋势和现有的研究结果基本一致。如郁珍艳等^[12,13]对 1961~2007 年我国四季长度的变化研究表明,四季长度在全国范围内主要表现为春季变短(-0.8d/10a)、夏季变长(3.2d/10a)、秋季变短(-0.5d/10a)和冬季变短(-1.6d/10a)的趋势;全国大范围地区夏季变

长且变化最为明显，秋季和冬季变短；华东地区春季略有变长，而其他地区春季变短。任妍等^[14]利用经验模态分解自适应趋势统计方法对 1971~2013 年我国四季开始日期分析表明，全国大部分地区春、夏季起始日提早，春季比夏季提早趋势更明显，秋、冬季起始日推迟，秋季比冬季推迟的范围更大。对于长三角地区四季变化研究也获得一致的结果，如吴昊旻等^[22]对 1961~2010 年长三角地区季节变化分析指出，夏季长度有极显著的延长趋势，春、夏两季的起始日期有显著的提早趋势；空间分布上，春、秋季节长度由内陆向沿海增加，夏季长度由北向南递增，冬季长度由北向南递减。

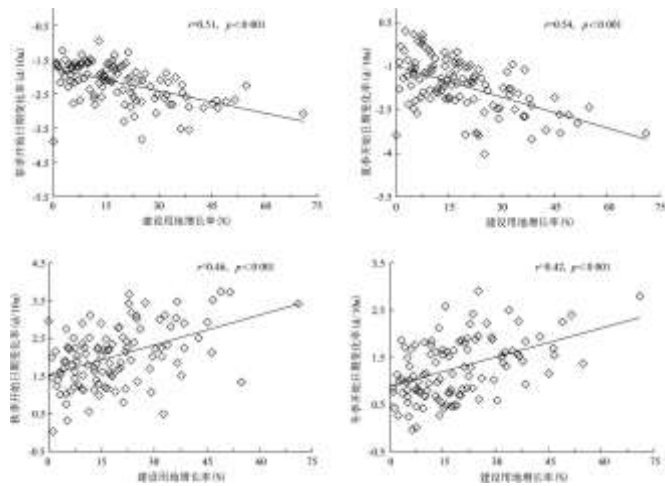


图 9 1981~2015 年站点周边建设用地增长率与四季开始日期的关系

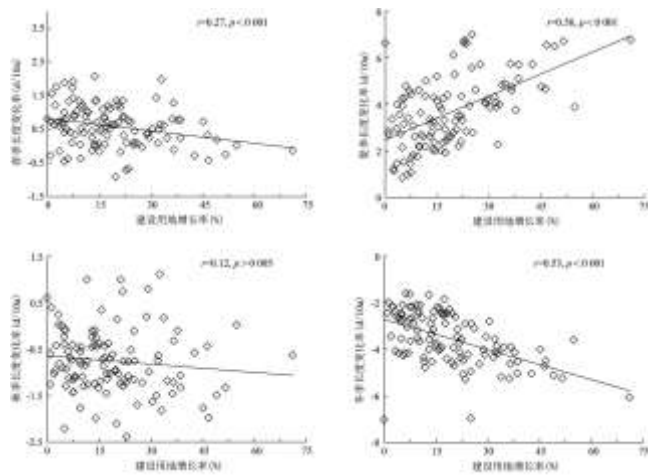


图 10 1981~2015 年站点周边建设用地增长率与四季长度的关系

4.2 城市化对长三角四季特征变化的影响

城市化对自然环境的影响是多方面的，其中城市对下垫面类型的改变是其造成的最直接的影响之一。城市土地利用方式的改变是城市化影响局地天气、气候的最直接途径^[27]。城市建设用地的增加引起城市不透水表面积的增加和下垫面形态的复杂化，这些都会改变城市地表物理属性(反照率、热容量、导热率等)，显著改变城市地表能量收支平衡(感热增大，潜热减小)，并引起城市近地面气温、湿度、湍流等边界层结构的变化以及局地、区域大气环流的改变，进而成为直接影响城市气候的重要因素^[28, 29]。

城市化进程及土地利用变化对城市的增温作用已成为当今区域气候变暖研究中最受关注的问题之一。长三角城市群拥有我国最高的城市密度,其城市覆盖面积从 20 世纪 80 年代的 $2.29 \times 10^3 \text{ km}^2$ 迅速发展至 2005 年的 $4.19 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[25] 和 2016 年的 $6.11 \times 10^3 \text{ km}^2$ ^[30]。崔林丽等^[31]分析了长江三角洲大城市、中等城市和小城镇的气温变化特征,结果表明城市化对中等城市和大城市有明显的增温作用,长三角城市化效应的增温率和贡献率与其它地区比较一致。江俊杰等^[32]分析了城市化及土地利用变化对长三角地区气温变化的影响,表明自 20 世纪 90 年代末开始,城市化及土地利用类型的改变使长三角地区气温显著上升,年平均气温、年平均最高和最低气温的增温速率分别为 0.197、0.045 和 0.308℃/10a。史兰红^[33]也指出,长三角地区的城市城镇建成区面积扩张在一定程度上影响了城市的地面气温变化,1992~2007 年和 2000~2007 年间城镇建成区面积对年、季平均气温的影响具有较好的一致性。Li 等^[34]对京津冀、长三角和成渝三个城市群在 2000~2015 年来由耕地转化为城乡建设用地的温度影响进行对比研究表明,城乡建设用地的扩张使温度上升明显,地表温度的增温幅度大于近地气温的增温幅度,这种现象在夏季更为明显。

在全球变暖的背景下,城市化带来的土地利用变化、人为热排放都会影响城市的气温变化。由于气温的升高,必然对以平均气温来衡量的四季变化产生影响,并导致局地气候要素的重新分布,尤其是长三角中东部和沿海地区,四季开始日期和长度随区域内平均气温的升高发生了明显的变化(图 2 和图 4)。郁艳珍等^[10,11]指出气温变化导致四季开始日期和长度变化,即 1961~2007 年我国年平均气温上升明显,年平均温度的突变时间超前于四季长度的变化时间,年平均温度对四季长度的变化有较大的影响。姜燕敏等^[19]对长三角地区四季长度变化原因分析也指出,气温与夏季长度呈明显正相关,且气温对夏季长度变化的影响最显著。长三角区域内建设用地的高增长区域与高增温区域有较好的空间对应关系,且增温率与建设用地增长率呈极显著的正相关($r=0.64$)(图 7 和图 8)。1981~2015 年间建设用地的快速增长使四季气候特征发生了明显的变化,其中入夏时间的提早和夏季时间的延长与建设用地增长率关系最显著(r 分别为 0.54 和 0.56)。已有研究也表明,在 1989~2007 年,长三角地区城镇建成区扩展主要影响春季平均气温升高^[31]和夏季地表增温明显^[32],导致夏季开始时间显著提早和夏季长度显著延长。本文利用建设用地的变化来分析四季变化的成因具有一定的参考价值。

5 结论

本文基于长三角地区 112 个气象站点 1961~2017 年逐日气温数据和卫星遥感反演的站点周边 10km 范围内 1981 和 2015 年建设用地面积,利用线性倾向估计、显著性检验和 Mann-Kendall 突变检验等气候统计方法,开展了区域四季开始日期、长度变化特征分析及其受城市化的影响,得出如下主要结论:

(1) 1961~2017 年期间,长三角地区入春和入夏日期分别以 2.1 和 1.7d/10a 的线性趋势显著提早,入秋和入冬日期分别以 2.0 和 1.3d/10a 的线性趋势显著推迟。空间分布上,入春和入夏日期在几乎所有地区都呈提早趋势,入秋和入冬日期在几乎所有地区都呈推迟趋势;入春、入秋变化趋势在长三角大部分地区都显著,而入夏、入冬显著变化主要集中在长三角中东部地区。

(2) 长三角地区夏季以 3.6d/10a 的线性趋势极显著延长,冬季以 3.5d/10a 的线性趋势极显著缩短,春季和秋季长度变化趋势在统计上都不显著。空间上,春季长度在长三角大部分地区都延长,但在统计上都不显著;夏季长度在几乎所有地区多以 2.4~4.8d/10a 的趋势显著延长;秋季长度变化不显著,冬季长度在整个长三角地区多以 2.1~5.3d/10a 的趋势显著缩短。

(3) 1961~2017 年,长三角地区四季开始日期均发生突变,且突变发生的时间基本上在 20 世纪 90 年代中后期,入春提早突变时间最晚(2004 年),入冬推迟突变时间最早(1996 年)。夏季长度延长和冬季长度缩短分别在 1997 和 1999 年发生突变,春、秋季长度突变不显著。

(4) 1981~2015 年间,长三角区域快速城市化进程引起城市建设用地增加,建设用地增长率与区域内增温幅度具有较好的空间对应关系,加之全球气候变暖的影响,区域年平均气温显著上升并导致四季开始日期和长度随之发生了显著的变化。

参考文献:

- [1] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global Change and the Ecology of Cities [J]. *Science*, 2008, 319 (5864): 756–760.
- [2] SETO K C, SATTERTHWAIT D. Interactions between urbanization and global environmental change [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010, 2 (3): 127–128.
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013, 1–1535 pp.
- [4] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2015, 903 pp.
- [5] 王雷, 吴正方, 杜海波, 等. 1961–2010 年东北地区四季开始日及长短变化特征分析 [J]. *气象科学*, 2014, 34 (5): 499–507.
- [6] YAN Z, WANG J, XIA J, et al. Review of recent studies of the climatic effects of urbanization in China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 7 (3): 154–168.
- [7] 环海军, 刘岩, 姚丹丹, 等. 近 50 年山东中部地区四季开始日期及长度变化特征 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2017, 11 (3): 79–85.
- [8] 张谋草, 王琴, 张峰, 等. 庆阳市气候四季变化分析及对作物种植的影响 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34 (17): 110–114.
- [9] 耿一风, 黄永平. 近 60 年荆州四季趋变特征及给作物生长影响的对策 [J]. *气象科技进展*, 2018, 8 (5): 81–84.
- [10] ALLEN M J, SHERIDAN S C. Evaluating changes in season length, onset, and end dates across the United States (1948–2012) [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36 (3): 1268–1277.
- [11] DONG W, JIANG Y, YANG S, et al. Response of the starting dates and the lengths of seasons in Mainland China to global warming [J]. *Climatic Change*, 2010, 99 (1): 81–91.
- [12] 郁珍艳, 范广洲, 华维, 等. 气温突变对我国四季开始日期的影响 [J]. *气象*, 2010, 36 (11): 32–37.
- [13] 郁珍艳, 范广洲, 华维, 等. 近 47 年我国四季长度的变化研究 [J]. *高原气象*, 2011, 30 (1): 182–190.
- [14] 任妍, 赵巧华. 1971–2013 年我国四季开始日期及生长期长度的变化特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 2017, 22 (2): 203–211.
- [15] HAFNER J, KIDDER S Q. Urban Heat Island Modeling in Conjunction with Satellite-Derived Surface/Soil Parameters [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38 (4): 448–465.
- [16] ZHOU Y, SHEPHERD J M. Atlanta's urban heat island under extreme heat conditions and potential mitigation strategies [J]. *Natural Hazards*, 2010, 52 (3): 639–668.

-
- [17] SUN Y, ZHANG X, REN G, et al. Contribution of urbanization to warming in China [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 706–709.
- [18] 史军, 崔林丽, 周伟东. 1959~2005 年长江三角洲气候要素变化趋势分析[J]. *资源科学*, 2008, 30(12): 1803–1810.
- [19] FENG J, WANG Y, MA Z, et al. Simulating the Regional Impacts of Urbanization and Anthropogenic Heat Release on Climate across China [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(20): 7187–7203.
- [20] WU K, YANG X. Urbanization and heterogeneous surface warming in eastern China [J]. *Science Bulletin*, 2013, 58(12): 1363–1373.
- [21] 姜燕敏, 梁艳, 沙欣欣. 气候变暖对长三角地区四季长度的影响[J]. *干旱气象*, 2012, 30(4): 570–574.
- [22] 吴昊旻, 黄安宁, 黄旋旋. 近 50 年长三角地区季节的气候变化特征[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(3): 317–324.
- [23] YAO X, WANG Z, WANG H, et al. Impact of Urbanization and Land-Use Change on Surface Climate in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, 1988–2008[J]. *Advances in Meteorology*, 2015: 1–10.
- [24] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010–2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 789–802.
- [25] 中国气象局. 中华人民共和国气象行业标准(QX/T 152-2012) 气候季节划分[M], 北京: 气象出版社, 2012: 1–5.
- [26] 王原, 赫强, 何成, 等. 国际大都市城市化发展对局地气候变化影响的对比研究-以上海, 旧金山为例[J]. *中国科技论文在线*, 2016.
- [27] 汪笑眉. 城市化对长三角城市群边界层结构的影响及其气候效应[D]. 南京大学, 2016.
- [28] CHAN J C. Impacts of land use changes and synoptic forcing on the seasonal climate over the Pearl River Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012: 25–36.
- [29] WANG X, SUN X, TANG J, et al. Urbanization-induced regional warming in Yangtze River Delta: potential role of anthropogenic heat release [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(15): 4417–4430.
- [30] 许礼华. 基于 NPP-VIIRS 数据长三角城市群城市扩张时空演变研究[D]. 上海师范大学, 2019.
- [31] 崔林丽, 史军, 周伟东. 上海极端气温变化特征及其对城市化的响应[J]. *地理科学*, 2009, 29(1): 93–97.
- [32] 江俊杰, 孙卫国, 裴兴云. 近 51 年长江三角洲地区气候变化及可能原因[J]. *气象与减灾研究*, 2012, 35(4): 17–25.
- [33] 史兰红. 长江三角洲城市化进程中温度和建成区面积变化分析[D]. 东华大学, 2014.
- [34] LI J, ZHENG X, ZHANG C, et al. Impact of Land-Use and Land-Cover Change on Meteorology in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1990 to 2010[J]. *Sustainability*, 2018, 10(1): 176.