

太湖典型水稻种植区近 50 年来气候变化特征 及其对浅层土壤温度的影响^①

林 洁, 陈效民*, 张 勇

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要: 根据常熟市 1960—2009 年的气象资料及浅层土壤温度观测资料分析了太湖典型水稻种植区近 50 年来的气候变化特征及其对浅层土壤温度的影响, 其中气候变化特征分析包括气候倾向率、气候突变和气候异常年份及年代际分析。结果表明近 50 年来研究区的气候变化特征明显: ①研究区气温明显升高; 气压、相对湿度、风速及累积日照时数降低; 降水量和蒸发量年际间波动较为明显, 且各季节的倾向率有正有负; ②近 50 年来研究区有 6 个气象要素发生了气候突变, 其中最为明显的是平均风速; ③近 50 年来研究区各气象要素中出现异常年份最多的为平均相对湿度; 异常年份出现次数其次的气象要素是累积蒸发量; 异常现象出现最少的气象要素为平均风速; ④随着土层深度的增加, 平均地温对气候变化的响应逐渐减弱, 各季节中平均地温对气候变化的响应在秋季最弱。平均地表温度、平均 5 cm 地温、平均 20 cm 地温与平均气温及平均最高气温、最低气温均存在着显著的相关关系。

关键词: 气候倾向率; 气候突变; 气候异常; 年代际变化; 浅层土壤温度

中图分类号: S161

全球正经历着显著的气候变化, 其主要特征是温度升高, 最近 100 年 (1906—2005 年) 全球平均地表温度上升了 0.74℃ (0.56℃ ~ 0.92℃)。过去 50 年来温度每 10 年平均上升 0.13℃, 是过去 100 年平均升温量的两倍^[1]。IPCC 第三次评估报告指出, 气候模式模拟结果表明全球平均地表气温到 2100 年时将比 1980 年上升 1.4℃ ~ 5.8℃, 这一增值将是 20 世纪内增值 (0.6℃左右) 的 2 ~ 10 倍^[2]。全球气候变化不仅影响人类生存环境, 也将影响世界经济的发展和社会进步。特别是农业生产这个对自然条件尤其是气候条件 (包括温度、降水、风速和大气 CO₂ 浓度的变化等) 依赖程度很强的产业^[3], 气候变化必将对其产生重大的影响。近年来, 由于全球气温的不断升高, 气候变化对生态环境和农业生产的影响和人类对这种影响所采取的应对措施引起了国内外学者的普遍关注^[4, 10]。气候变化是一个非常复杂的问题, 随着时间尺度的延长, 气候变化存在规律性的同时也存在着一定的非线性变化。此外, 各地气候变化趋势并不完全一致, 也就是说气候变化具有区域性。太湖地区属亚热带季风气候, 适宜水稻、小麦、棉花、油料、绿肥等多作物、多品

种、多熟制种植。但季风进退迟早和强弱多变, 年际和季际差异明显, 造成农业生产不够稳定的低温冷害、洪涝、渍害、台风、寒潮等灾害性气候频繁。目前, 对太湖地区气候变化特征的研究较少。黄俊雄和徐宗学^[11]运用 Mann-Kendall 统计检验方法对太湖流域 6 个气象站点 1954—2006 年降水、气温、相对湿度、日照时数的变化趋势和时空特征进行了分析, 但没有分析各气象因子的气候突变和气候异常。客观、正确地了解太湖典型水稻种植区近 50 年气候变化趋势, 对该地区生态环境的改善和农业生产都有极其重要的意义。本文根据常熟市 1960—2009 年的气象资料及浅层土壤温度观测资料分析了太湖典型水稻种植区近 50 年来的气候变化特征及其对浅层土壤温度的影响, 其中气候变化特征分析包括气候倾向率、气候突变和气候异常年份及年代际分析。

1 材料与方法

1.1 试验材料

常熟市地处江苏省南部, 其耕地类型除北部沿江一带是冲积物形成的沙土外, 分布最广的水稻土是

^①基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (200903003) 资助。

* 通讯作者 (xmchen@njau.edu.cn)

作者简介: 林洁 (1987—), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: linjie_sunny@163.com

主要耕作土壤,是著名的太湖地区水稻土的组成部分,作物以水稻、小麦轮作为大宗。本文以常熟市为太湖水稻种植区的典型,选取了该市 1960—2009 年逐日气象资料和逐日浅层地温观测资料,其中气象资料包括平均气温、最高气温、最低气温、平均气压、平均相对湿度、降水量、蒸发量、平均风速、日照时数,逐日浅层地温观测资料包括平均地表温度、平均 5 cm 地温、平均 20 cm 地温。按 12 月至次年 2 月为冬季,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季生成逐季序列以及年序列。此外,以 10℃ 为界限温度确定温度生长期,从而生成温度生长期序列。

1.2 研究方法

1.2.1 温度生长期的确定 本文将稳定通过 10℃ 界限温度的持续日数定义为喜温作物温度生长期(以下简称温度生长期),即某地区一年内作物可能生长的时期^[12]。

1.2.2 气候倾向率的计算^[13] 采用线性倾向估计法,用 X_i 表示某一气候变量, T_i 表示 X_i 所对应的时间,建立 X_i 与 T_i 之间的一元线性回归方程:

$$\hat{X}_i = a + bT_i \quad (1)$$

式中, a 为回归常数, b 为回归系数。回归系数 b 的符号表示气候变量 X 的趋势倾向: b 的符号为正,说明随时间的增加 X 呈上升趋势; b 的符号为负,说明随时间的增加 X 呈下降趋势。 $b \times 10$ 即为气候倾向率,表示某一气候变量每 10 年的趋势变化率。

1.2.3 气候突变年份的确定 符淙斌和王强^[14]给出了气候突变的普适定义:气候从一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)跳跃式地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)的现象,它表现为气候在时空上从一个统计特性到另一个统计特性的急剧变化。

气候突变是气象要素变化过程中存在的某种不连续现象,因此,常用累积距平曲线来确定,即使用指标:

$$c(t) = \sum_i (X_i - \bar{X}) \quad (2)$$

式中, X_i 为某一气候变量的历年值, \bar{X} 为某一气候变量的多年平均值。当指标绝对值达到最大时,所对应的 t 为突变年份。为了检验转折是否达到气候突变的标准,对转折年份计算它们的信噪比 (S/N),计算公式如下:

$$S/N = \frac{\sqrt{X_1 - X_2}}{S_1 + S_2} \quad (3)$$

式中, \bar{X}_1 、 \bar{X}_2 和 S_1 、 S_2 分别为某一气候变量转折年

份前后两阶段的平均值和标准差。当 $S/N > 1.0$ 时认为存在气候突变,当 $S/N > 2.0$ 时则认为发生强的气候突变,最大信噪比的时间定义为气候突变出现的时间^[15-16]。

1.2.4 气候异常年份的确定 气候异常主要指显著偏离平均状态的异常情况。世界气象组织对气候异常提出了两种差别标准,一是距平超过标准差的两倍以上,二是它在最近完整的 30 年气象资料中未出现过的情况(不一定距平值超过标准差的 2 倍),或称 30 年以上一遇的罕见天气现象^[17]。考虑到一些发展中国家气象观测资料尚不满 30 年,可以稍微放宽条件,一般用 25 年以上资料来分析。本文采用距平大于标准差的 2 倍(包括正负两种情况)作为异常,超过标准差的 1.5~2.0 倍定为接近异常。

2 结果与分析

2.1 气候变化分析

2.1.1 气候倾向率 用线性倾向估计法分析了近 50 年太湖典型水稻种植区春、夏、秋、冬、年及温度生长期内各气象要素统计值的变化趋势性,结果见表 1。由表 1 可见,近 50 年来各季节平均气温的增长趋势明显,增幅为 (0.16~0.45)℃/10a,且春、冬季的倾向率高于夏、秋季;各季节平均最高气温和平均最低气温的增长趋势也较明显,其中春季平均最高气温和冬季平均最低气温的增长最为明显,气候倾向率分别达到 0.48℃/10a 和 0.53℃/10a;各季节平均气压的变化趋势均为逐渐降低,但降幅较小,处于 -0.35~-0.08 hpa/10a,其中春、秋两季的降低幅度高于夏、冬两季;各季节平均相对湿度呈逐渐降低的趋势,春季气候倾向率最小,为 -2.29%/10a,冬季气候倾向率最大,为 -0.43%/10a;各季节平均风速的气候倾向率也均为负值,但四季相差不大,处于 -0.43~-0.32(m/s)/10a 之间;各季节累积降水量的气候倾向率有正有负,其中春、秋季气候倾向率为负值,说明近 50 年来研究区的春、秋季累积降水量变化趋势是逐渐降低的,而夏、冬季的气候倾向率为正值,则说明近 50 年来夏、冬季累积降水量的变化趋势是逐渐增加的;各季节累积蒸发量的气候倾向率也是有正有负,其中冬季的气候倾向率为负值,其他 3 个季节均为正值,且春季的气候倾向率最大,为 14.93 mm/10a;各季节累积日照时数的气候倾向率均为负值,即均呈减少趋势,其中夏季的减少趋势最为明显,气候倾向率为 -59.66 h/10a,春季的减少趋势最不明显,气候倾向率为 -11.02 h/10a。

表 1 近 50 年来太湖典型水稻种植区各气象要素的气候倾向率分析

Table 1 Climatic trend rates of meteorological elements in typical paddy planting area of Tai lake region during 1960—2009

气象要素	春季	夏季	秋季	冬季	年	温度生长期
平均气温 (积温) (°C/10a)	0.45*	0.16	0.30*	0.45*	0.33*	106.75* (积温)
平均最高气温 (°C/10a)	0.48*	0.22	0.29*	0.35*	0.32*	0.19*
平均最低气温 (°C/10a)	0.44*	0.19	0.28*	0.53*	0.35*	0.13
平均气压 (hpa/10a)	-0.35*	-0.08	-0.24*	-0.13	-0.19*	-0.06
平均相对湿度 (%/10a)	-2.29*	-1.27*	-1.29*	-0.43	-1.34*	-1.69*
平均风速 (m/s/10a)	-0.41*	-0.33*	-0.32*	-0.43*	-0.37*	-0.33*
累积降水量 (mm/10a)	-13.51	42.95	-19.16	19.03*	29.57	16.44
累积蒸发量 (mm/10a)	14.93*	1.65	2.19	-3.75	14.80	30.12*
累积日照时数 (h/10a)	-11.02	-59.66*	-30.19*	-32.54*	-133.12*	-69.38*

注：* 表示差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。

气象要素年统计值的气候倾向率分析结果表明，年平均气温的气候倾向率为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，这说明太湖典型水稻种植区近 50 年来气温升高明显，这与气候变化的大背景相呼应；同时近 50 年来年平均最高气温及年平均最低气温也呈逐渐增长的趋势，且增长幅度与年平均气温的增长幅度相近；平均气压、平均相对湿度和平均风速及累积日照时数的气候倾向率均为负值，说明近 50 年来它们的变化趋势都是降低的；累积降水量与累积蒸发量的气候倾向率均为正值，也说明了降水和蒸发在近 50 年中都有一定的增加，但增加幅度不大。

从气候要素温度生长期统计值的气候倾向率分析结果来看，近 50 年来温度生长期内的积温呈增长的趋势，这与季节平均气温及年平均气温的变化规律是一致的；温度生长期内的平均最高气温与平均最低气温也呈升高趋势，但其升高的趋势比年平均最高、最低温度的升高趋势弱；温度生长期内平均气压、平均相对湿度、平均风速及累积日照时数的气候倾向率也均为负值，即在近 50 年内它们的变化趋势都是降低的；温度生长期累积降水量与累积蒸发量的气候倾向率也均为正值，这与季节累积降水量、蒸发量及年累积降水量、蒸发量的变化趋势是一致的，但温度生长期累积降水量的气候倾向率低于年累积降水量的气候倾向率，而温度生长期累积蒸发量的气候倾向率低于年累积蒸发的气候倾向率。

太湖典型水稻种植区气温的升高及温度生长期内积温的增加将使该地区的农业气候热量资源变得更丰富、作物生长期延长以及生长季热量增加，进而使原有的农业气候带和种植熟制界线向北推移。赵海

燕等^[18]研究表明：长江中下游地区日降水量和最高气温都会影响水稻空壳率，尤其是开花期。不管是早稻，还是中稻，开花期的空壳率与平均日降水量都呈正相关，而开花期最高气温对早中稻的影响则不同：对早稻而言，空壳率随着开花期的平均最高气温的升高而降低；对中稻则随着开花期的平均最高气温的升高而升高。气候倾向率的结果分析表明，夏季平均最高气温和累积降水量都呈增长的趋势，这一现象可能将增加中稻的空壳率，从而对中稻产量产生较大的影响。

2.1.2 气候突变 利用式 (2)、(3) 计算了太湖典型水稻种植区各气象要素的气候突变年份 (表 2)，结果表明近 50 年来该地区年平均气温和春季平均气温均在 1989 年发生了气候突变，即从一个相对偏冷期跃变为一个相对偏暖期，而温度生长期内的积温及除春季外其他 3 个季节平均气温没有发生气候突变；年平均最高气温、最低气温都在 1989 年发生了气候突变，与年平均气温和春季平均气温的突变年份一致，春季平均最低气温在 2002 年发生了气候突变；年平均气压及春季平均气压在 1997 年发生了气候突变，夏季平均气压在 2004 年发生气候突变，温度生长期及秋冬季平均气压无气候变化；各季节、年及温度生长期平均风速均在 1979 年左右存在气候突变现象，即平均风速从相对偏高期跃变为相对偏低期；年累积日照时数和夏季累积日照时数在 1979 年发生了突变，但温度生长期和除夏季外 3 个季节的累积日照时数无气候变化；其他气候要素不存在气候突变。近 50 年来研究区年平均气温、年平均气压、年平均风速及年累积日照时数的变化及突变如图 1 所示。

表 2 近 50 年来太湖典型水稻种植区各气象要素的突变年份分析

Table 2 Abrupt climate changes of meteorological elements in typical paddy planting area of Tai lake region during 1960—2009

气象要素	春季	夏季	秋季	冬季	年	温度生长期
平均气温 (积温)	1989 年	/	/	/	1989 年	/
平均最高气温	/	/	/	/	1989 年	/
平均最低气温	2002 年	/	/	/	1988 年	/
平均气压	1997 年	2004 年	/	/	1997 年	/
平均风速	1980 年	1979 年	1979 年	1978 年	1979 年	1979 年
累积日照时数	/	1979 年	/	/	1979 年	/

注：“/”表示无突变年份。

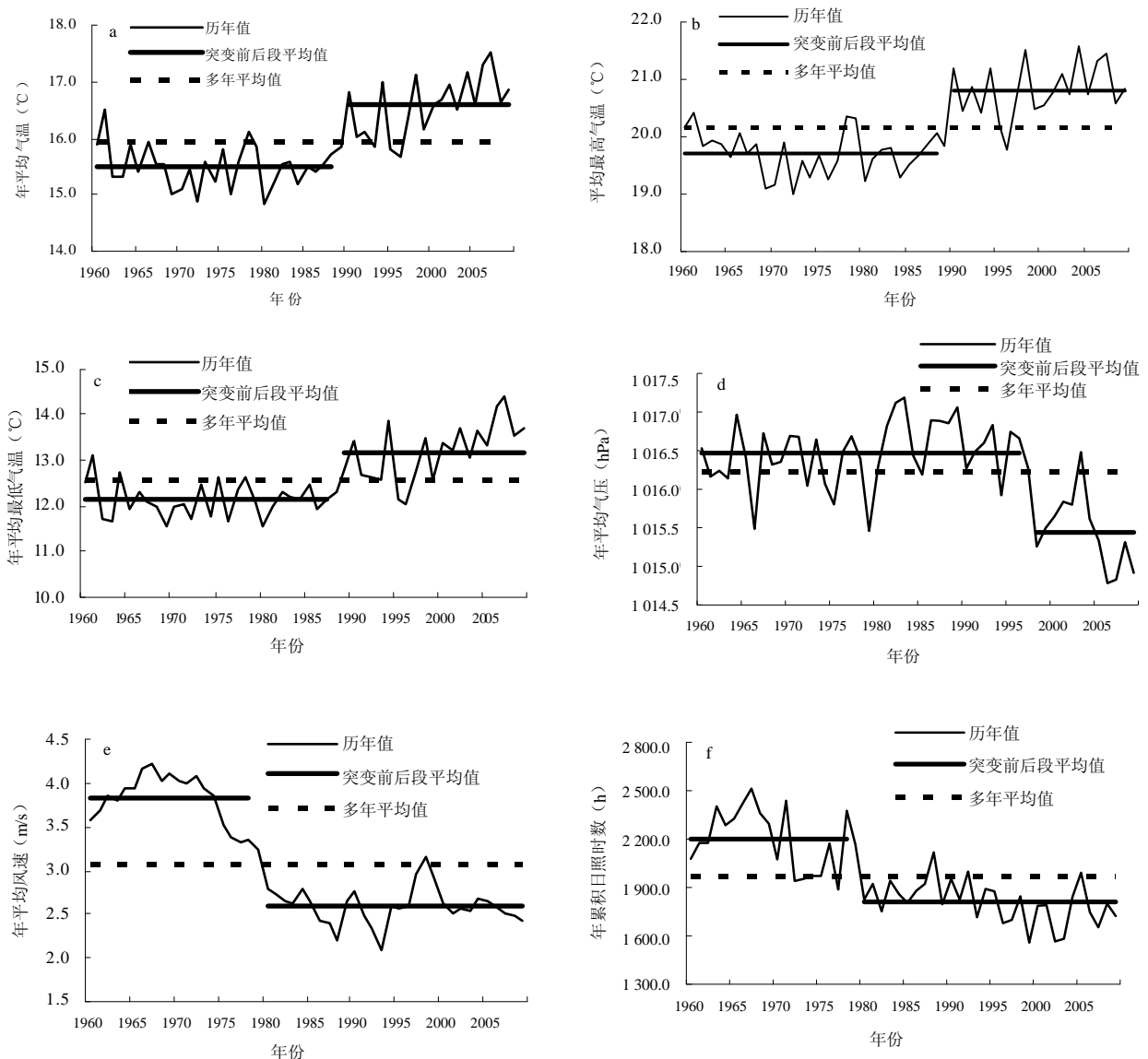


图 1 太湖典型水稻种植区近 50 年来年平均气温 (a)、年平均最高气温 (b)、年平均最低气温 (c)、年平均气压 (d)、年平均风速 (e) 和年累积日照时数 (f) 的变化及突变

Fig. 1 Abrupt climate change of annual mean air temperature (a), annual mean maximum air temperature (b), annual mean air minimum temperature (c), annual mean air pressure (d), annual mean wind speed (e) and annual accumulative irradiation time (f) in the typical paddy planting area of Tai Lake region during 1960—2009

2.1.3 气候年代际变化特征 通过对年平均气温、年平均气压、年平均相对湿度、年平均风速、年累积降水量、年累积蒸发量及年累积日照时数各序列作9点2次平滑的低通滤波,结果发现近50年来这7个气候要素均存在一定的年代际特征。

(1) 平均气温在近50年来呈现明显的逐年升高趋势。20世纪六七十年代的年平均气温相对较低(处于 $15^{\circ}\text{C} \sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间),随着时间的推移,呈波动性升高,特别是在1989年之后,升高的趋势变得更加明显(图2a)。

(2) 年平均气压在20世纪60年代初至70年代末只存在较小的曲折波动,80年代初出现一次升高,到80年代末则开始呈现明显的下降趋势,并且该下降趋势一直延续到21世纪初(图2b)。

(3) 年平均相对湿度在20世纪60年代初至90年代末这一时间段内的变化较为平缓,在70年代和90年代中期分别出现一次较小波峰和波谷,从21世纪开始则呈现较为明显的降低趋势(图2c)。

(4) 年平均风速在20世纪60年代初存在一次较小的升高,之后则转入降低趋势,且这种明显的降低趋势一直延续到80年代初,持续降低过后一直到21世纪初是较为平缓的波动(图2d)。

(5) 近50年来年累积降水量呈波动状态,最大值与最小值相差近500 mm,无明显的升高和降低趋势。但总的来说,可以以1987年为界,之前的年累积降水量绝大多数低于多年平均值(1094.8 mm),且最小值处于该时间段;而1987年之后的年累积降水量大多高于多年平均值,且最大值处于该时间段(图2e)。

(6) 年累积蒸发量近50年来呈明显的波动状态,20世纪60年代变化缓慢,70年代初呈上升趋势至70年代中期出现一次波峰,之后呈小波动下降趋势,90年代出现波谷,最后呈小波动上升趋势,一直到21世纪初(图2f)。

(7) 年累积日照时数在近50年来呈明显的下降趋势,但总的来说20世纪60年代初到80年代末这一时间段的下降趋势比余下这一时间段的下降趋势明显(图2g)。

2.1.4 气候异常 对近50年来太湖典型水稻种植区气象要素进行异常年份分析,结果如表3所示,具体有以下一些特征。

(1) 平均气温(积温)的异常现象主要发生在20世纪七八十年代和21世纪初,其中秋季平均气温和温度生长期积温多异常年份,且在七八十年代存在两个

异常偏低及在2005年存在异常偏高。

(2) 平均最高气温在各年代均存在异常现象,且绝大部分是异常偏低,春季和冬季平均最高气温分别在1970年、1967年异常偏低,年平均最高气温无异常年份。

(3) 平均最低气温的异常现象多出现在春季和温度生长期,且异常偏高多于异常偏低。总体而言,多发生在20世纪六七十年代和21世纪初。

(4) 平均气压的异常多发生在21世纪初,且年及温度生长期平均气压的异常年份相对较多。

(5) 就平均风速而言,异常现象的存在相对较少,只有夏、秋季平均风速有异常年份出现,分别是1972年、1973年和1962年、1967年,且均为正异常,即异常偏高。

(6) 在所有的气象要素中,平均相对湿度的异常现象出现最多,且大多发生在21世纪初,其中春季、夏季、年及温度生长期平均相对湿度的异常年份均出现在2004—2009年之间,且均为异常偏低。

(7) 累积降水量在春、夏季的异常现象较多,主要发生在20世纪六七十年代和2000年前后,且大多为异常偏高;秋季只有1961年和1962年存在异常偏高,冬季1997年异常偏高,而年和温度生长期累积降水量都只在1978年异常偏低。

(8) 春季、夏季、年及温度生长期累积蒸发量均在2006年左右存在异常,一般在夏季、年累积蒸发量的异常现象较多。

(9) 累积日照时数的异常年份多是在20世纪60年代和21世纪初,且春、夏、秋季的异常现象较多。

2.2 气候变化对浅层土壤温度的影响

气候变化不可避免地直接表现在地表温度的变化上,因为大气与地面间热交换关系的变化直接体现在地表温度上。气候变化可引起地温的变化,而地温的变化对气候变化又具有反馈作用。首先运用SPSS16.0对研究区平均气温、平均最高气温、平均最低气温、累积降水量、累积日照时数、累积蒸发量、平均气压、平均水汽压、平均风速、平均相对湿度进行了主成分分析,从这些气象因子中提取出3个主成分(表略)。总的来说,第一主成分为气温因素,均为平均气温、平均最高气温和平均最低气温;第二主成分主要为水分因素,包括降水、蒸发、水汽压等,各季节、年、温度生长期稍有差别。然后,主要对季节、年及温度生长期平均地表温度、平均5 cm地温、平均20 cm地温和第一主成分、第二主成分的各气象要素进行相关分析,结果见表4

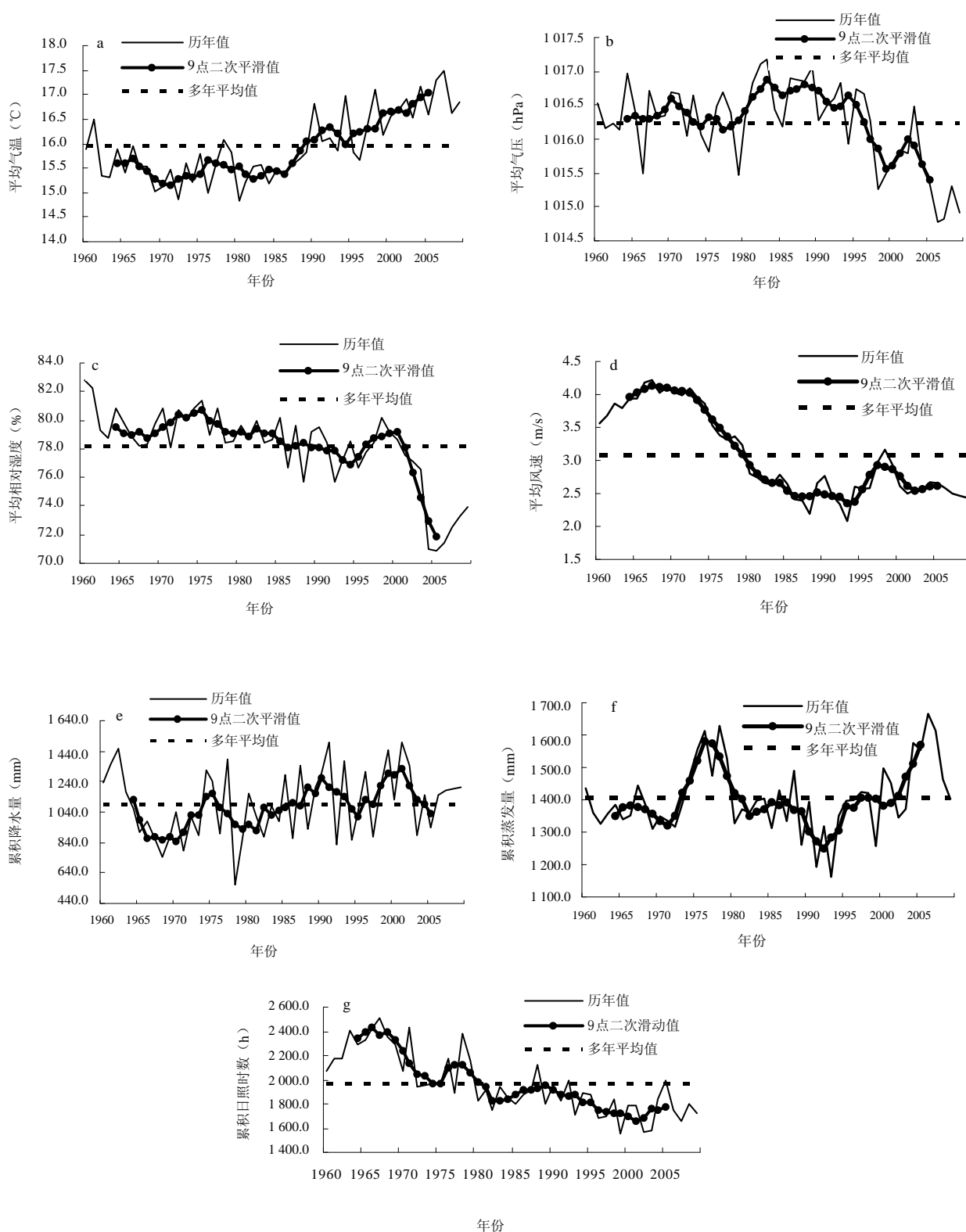


图 2 近 50 年来太湖典型水稻种植区年平均气温 (a)、年平均气压 (b)、年平均相对湿度 (c)、年平均风速 (d)、年累积降水量 (e)、年累积蒸发量 (f) 和年累积日照时数 (g) 的变化曲线

Fig. 2 Change curves of annual mean air temperature (a), annual mean air pressure (b), annual mean relative humidity (c), annual mean wind speed (d), annual cumulative precipitation (e), annual cumulative evaporation (f) and annual accumulative irradiation time (g) in typical paddy planting area of Tai Lake region during 1960—2009

表 3 近 50 年来太湖典型水稻种植区各气象要素的异常年份分析

Table 3 The analysis of climatic extreme years of meteorological elements in typical paddy planting area of Tai lake region during 1960—2009

气象要素	春	夏	秋	冬	年	温度生长期
平均气温(积温)	2007 (+)	1999 (-)	1976 (-) 1981 (-) 2005 (+)	1967 (-)	2006 (+) 2007 (+)	1972 (-) 1980 (-) 2005 (+)
平均最高气温	1970 (-)	1990 (-) 1999 (-)	1976 (-) 1981 (-)	1967 (-)	/	1977 (-) 2009 (+)
平均最低气温	1962 (-) 2002 (+) 2007 (+)	1999 (-)	/	1967 (-)	2006 (+) 2007 (+)	1974 (-) 2007 (+) 2009 (+)
累积降水量	1963 (+) 1964 (+) 1977 (+) 2002 (+)	1978 (-) 1991 (+) 1999 (+) 2001 (+)	1961 (+) 1962 (+)	1997 (+)	1978 (-)	1978 (-)
累积日照时数	1965 (+) 2002 (-) 2003 (-)	1964 (+) 1967 (+) 1999 (-)	1966 (+) 1969 (+) 2000 (-)	1962 (+) 1967 (+)	1967 (+)	1967 (+)
累积蒸发量	2000 (+) 2007 (+)	1978 (+) 1980 (-) 1993 (-) 1999 (-) 2006 (+)	1976 (+) 1981 (-) 2000 (-)	1968 (-) 1975 (+)	1978 (+) 1991 (-) 1993 (-) 2006 (+)	2005 (-) 2006 (-)
平均气压	2006 (-) 2008 (-)	2009 (-)	1998 (-) 2006 (-)	1963 (+) 1978 (-)	2006 (-) 2007 (-) 2009 (-)	1972 (-) 1987 (+) 2009 (-)
平均风速	/	1972 (+) 1973 (+)	1962 (+) 1967 (+)	/	/	/
平均相对湿度	2004 (-) 2006 (-) 2007 (-) 2008 (-) 2009 (-)	2004 (-) 2005 (-) 2006 (-)	1988 (-) 1991 (-) 2005 (-)	1967 (-) 1968 (-)	2004 (-) 2005 (-) 2006 (-) 2007 (-)	2004 (-) 2005 (-) 2006 (-)

注：+为正异常，-为负异常，/为无异常。

表 4 近 50 年来太湖典型水稻土地地区浅层地表温度与各气象要素的相关关系（相关系数）

Table 4 Correlations between shallow soil temperature and meteorological elements in typical paddy planting area of Tai lake region during 1960—2009

气象要素	平均地表温度			气象要素	平均地表温度		
	平均地表温度	平均 5 cm 地温	平均 20 cm 地温		平均地表温度	平均 5 cm 地温	平均 20 cm 地温
春	平均气温	0.743**	0.781**	夏	平均气温	0.647**	0.595**
	平均最高气温	0.806**	0.822**		平均最高气温	0.589**	0.553**
	平均最低气温	0.608**	0.679**		平均最低气温	0.550**	0.486**
	平均水汽压	0.237	0.336*		累积日照时数	0.848**	0.805**
	累积蒸发量	0.444**	0.292*		累积降水量	-0.686**	-0.565**
	平均相对湿度	-0.448*	-0.374**		平均风速	0.495**	0.435**
秋	累积降水量	-0.249	-0.188	累积蒸发量	0.625**	0.542**	
	平均气温	0.659**	0.604**	冬	平均气温	0.916**	0.871**
	平均最高气温	0.607**	0.526**		平均最高气温	0.893**	0.850**
	平均最低气温	0.577**	0.592**		平均最低气温	0.807**	0.787**
	累积蒸发量	0.344*	0.259		累积日照时数	-0.290*	-0.303*
	水汽压	0.538**	0.619**		累积蒸发量	-0.189	-0.161
平均气温	0.499**	0.492**	累积降水量		0.345*	0.336*	
年	平均最高气温	0.474**	0.475**	平均相对湿度	0.319*	0.377**	
	平均最低气温	0.411**	0.434**	温度 积温	-0.223	-0.296*	
	累积日照时数	0.400**	0.394**	生长 累积日照时数	0.566**	0.580**	
	累积降水量	-0.173	0.071	期 平均气压	-0.387**	-0.335*	
	累积蒸发量	0.443**	0.272	累积降水量	-0.466**	-0.401**	
	平均风速	0.228	0.238	平均风速	0.441**	0.475**	

注：* 表示在 $P < 0.05$ 水平下显著相关，** 在 $P < 0.01$ 水平下显著相关。

(只列出了相关关系较为明显的气象要素)。从相关关系来看,随着土层深度的增加,平均土温对气候变化的响应逐渐减弱,各季节中平均地温对气候变化的响应在秋季最弱。总的来说,平均地表温度、平均 5 cm 地温、平均 20 cm 地温与平均气温及平均最高气温、最低气温均存在着极显著的相关关系,气温的显著升高在很大程度上会导致平均地温呈明显升高趋势。夏季、冬季及温度生长期内的各层平均地温与累积降水量存在较明显的负相关关系,且均达到显著水平;春季、夏季、秋季及年的各层平均地温与累积蒸发量的正相关关系也较好;除夏季和年外,其他季节和温度生长期内各层平均地温与平均气压存在显著的负相关关系;除春、秋季外,其他季节及年和温度生长期内各层平均地温与累积日照时数存在较好的相关关系,特别是平均地表温度与累积日照时数的相关关系均能达到显著。

3 结论

(1)近 50 年来研究区的平均气温及温度生长期内的积温均呈上升趋势,这说明研究区近 50 年来气温升高明显,这与气候变化的大背景是相呼应的;同时近 50 年来的平均最高气温及最低气温也呈逐渐增长的趋势;平均气压、平均相对湿度、平均风速及累积日照时数的气候倾向率均为负值,说明近 50 年来它们的变化趋势都是降低的;年及温度生长期的累积降水量呈增加趋势,但各季节累积降水量的变化趋势并不一致,春、秋减少,夏、冬季增加。累积蒸发量的气候倾向率除冬季之外均为正值,说明蒸发在近 50 年中有一定的增加,但增加幅度不大。

(2)近 50 年来研究区各气象要素中发生气候突变最为明显的是平均风速,且均在 1978—1980 年出现;年平均气温、年平均最高气温及春季平均气温均在 1989 年发生气候突变,年平均最低气温和春季平均最低气温分别在 1988 年和 2002 年发生气候突变,即从一个相对偏冷期跃变为一个相对偏暖期;年平均气压及春季平均气压在 1997 年发生气候突变,夏季平均气压在 2004 年发生气候突变;年累积日照时数和夏季累积日照时数在 1979 年发生了突变;其他气候要素不存在气候突变。

(3)近 50 年来研究区各气象要素中出现异常年份最多的为平均相对湿度,且大多集中在 21 世纪初;累积蒸发量是异常年份出现其次的气象要素,各个年代都有异常出现;异常现象出现最少的气象要素为平

均风速,只有夏季和秋季平均风速分别在 20 世纪 70 年代和 60 年代有异常现象存在。

(4)随着土层深度的增加,平均地温对气候变化的响应逐渐减弱,各季节中平均地温对气候变化的响应在秋季最弱。总的来说,平均地表温度、平均 5 cm 地温、平均 20 cm 地温与平均气温及平均最高气温、最低气温均存在着较明显的相关关系,且显著性水平平均达到 0.01。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Oslo: Intergovernment Panel on Climate Change, 2007
- [2] 丁一汇,张锦,徐影,宋亚芳.气候系统的演变及其预测.气象出版社,2003:143
- [3] Chavas DR, Izaurrealde RC, Thomson AM, Gao XJ. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 1118-1128
- [4] 刘颖杰,林而达.气候变暖对中国不同地区农业的影响.气候变化研究进展,2007,3(4):229-233
- [5] 肖风劲,张海东,王春乙,王邦中,刘海波,王长科.气候变化对我国农业的可能影响及适应性对策.自然灾害学报,2006,15(6):327-331
- [6] 蔡运龙.全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策.地理学报,1996,51(3):202-212
- [7] Rosegrant MW, Cline SA. Global food security challenges and policies. *Science*, 2003, 302: 1917-1919
- [8] 李勇,杨晓光,王文峰,刘志娟.气候变化背景下中国农业气候资源变化 I.华南地区农业气候资源时空变化特征.应用生态学报,2010,21(10):2605-2614
- [9] 刘志娟,杨晓光,王文峰,李克南,张晓煜.气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征.应用生态学报,2009,20(9):2199-2206
- [10] 段兴武,谢云,刘刚,蔺涛.黑龙江省粮食生产对气候变化影响的脆弱性分析.中国农业气象,2008,29(1):6-11
- [11] 黄俊雄,徐宗学.太湖流域 1954—2006 年气候变化及其演变趋势.长江流域资源与环境,2009,18(1):33-40
- [12] 韩湘玲.农业气候学.太原:山西科学技术出版社,1999
- [13] 沈瑛,曾燕,肖卉.江苏省日照时数的气候特征分析.气象科学,2007,27(4):425-429
- [14] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法.大气科学,1992,16(4):482-493
- [15] 黄嘉佑.气候状态变化趋势与突变分析.气象,1995,21(7):

54-57

应用气象学报, 2000, 11(2): 221-227

[16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007(5): 61-63

[18] 赵海燕, 姚凤梅, 张勇, 徐宾, 袁静, 胡亚南, 许吟隆. 长江中下游水稻开花灌浆期气象要素与结实率和粒重的相关性分析.

[17] 杜军, 周顺武, 唐叔义. 西藏近 40 年气温变化的气候特征分析.

中国农业科学, 2006, 39(9): 1765-1771

Characteristics of Climate Change and Their Influences on Shallow Soil Temperature in Typical Paddy Planting Area of Tai Lake Region During 1960—2009

LIN Jie, CHEN Xiao-min, ZHANG Yong

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Based on the meteorological data and shallow soil temperatures in Changshu during 1960—2009, the characteristics of climate change and their influences on soil temperature in the typical paddy planting area of Tai lake region were investigated. The analysis of the characteristics of climate change concluded linear trend analysis, abrupt change and anomalous year and decadal analysis. The results were as follows: 1) the air temperature raised significantly, while air pressure, relative humidity, wind speed and accumulative irradiation time reduced. The annual fluctuation of precipitation and evaporation with positive or negative climatic trend rates in different seasons were intensively; 2) There were six meteorological elements with abrupt climate change in study area during 1960—2009, and abrupt climate change of average wind speed was the most obviously; 3) In the all meteorological elements, the climatic extreme year of mean relative humidity had the highest occurrence rate, while cumulative evaporation and average wind speed had the higher and lowest occurrence rate respectively; 4) With the increment of the depth of soil layer, the response to mean soil temperature from climate change became increasingly weak, while the response in autumn was the weakest. All the mean soil temperatures at 0 cm, 5 cm and 20 cm had significant correlations with the mean air temperature, mean maximum air temperature and mean minimum air temperature.

Key words: Climatic trend rate, Abrupt climate change, Climate anomaly, Decadal variation, Shallow soil temperature