

文章编号:1001-7380(2019)02-0038-05

1958—2017年太湖流域气温及降水变化研究

吴凡, 潘梦婷, 孔雨, 罗桂银, 栾兆擎*

(南京林业大学, 江苏 南京 210037)

摘要:太湖流域位于我国长江中下游平原河网地区,是受全球气候变化和人类活动影响最显著的地区之一。该文利用太湖流域范围内的21个气象站点的长期观测资料,运用趋势系数、气候倾向率等方法分析了该区域的气候时空变化规律。结果表明,1958—2017年该区气温有显著上升趋势,平均气温以 $0.293\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 幅度升高。各月气温均呈上升趋势,但是冬、春季升温最为剧烈,达 $0.362\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;夏、秋季最弱,为 $0.222\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。由于最冷月平均温度升高比最热月大,所以导致气温年较差减少。气温升高存在显著的区域差异,东部地区增温剧烈,气温倾向率大于 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;最小的气温倾向率位于西南部地区,小于 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。流域降水总体呈增加趋势,平均年降水量倾向率为 $3.026\text{ mm}/10\text{ a}$,东部地区和无锡、常州地区降水增加显著。全球变化及城市化的影响是导致流域气温和降水地区差异的主要原因。

关键词:太湖流域;气候变化;气候趋势系数;气候倾向率;气温;降水

中图分类号:P332.1;P412.11

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2019.02.009

Study on the change of air temperature and rainfall in the last 60 years in the Taihu watershed

Wu Fan, Pan Mengting, Kong Yu, Luo Guiyin, Luan Zhaoqing*

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract:In the past 60 years, Taihu watershed has tremendously gone through global climate and human activities. Based on the monthly data of air temperature and rainfall in these years from 21 meteorological stations in the Taihu watershed, the climatic variations and tendencies were analyzed by calculating climate trend coefficient and climate tendency ratio. The result showed that from 1958 to 2017, there was an increase of $0.293\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ in the annual mean air temperature. Monthly air temperatures were all tending to rise while increase of air temperature in the winter and spring is higher ($0.362\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$) than those in summer and autumn. Rise of air temperature in the cold season was higher than that in hot season, so the yearly range of the air temperature was tending to decrease. The rise in temperature was regionally different. East area had the higher rising degree ($>0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$) while the west and south margin areas had the lowest rising degree ($<0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$). Tendency of rainfall was increasing and the tendency ratio was $3.026\text{ mm}/10\text{ a}$, most obvious in eastern areas, Wuxi and Changzhou. Global changes and the impact of urbanization were the main reasons for regional differences in air temperature and rainfall.

Key words:Taihu watershed; Climate change; Climate trend coefficient; Climate tendency ratio; Air temperature; Rainfall

人类活动导致的区域气候变化已经成为当今人们普遍关注的全球环境问题之一^[1-3]。太湖流域

地跨苏、浙、沪、皖4省市,地理位置 $119^{\circ}11'—121^{\circ}53'E$ 、 $30^{\circ}28'—32^{\circ}15'N$,是我国经济最发达、产业最

收稿日期:2019-03-13;修回日期:2019-03-28

基金项目:国家自然科学基金(41471078,41871097);江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(18)2016];江苏省“333 高层次人才培养工程”;南京林业大学高层次人才科研启动基金

作者简介:吴凡(1998-),女,江苏南京人,本科生。E-mail:2256152482@qq.com。

* 通信作者:栾兆擎(1976-),男,山东淄博人,教授,博士。主要从事湿地生态水文方面的研究。E-mail:luanzhaoqing@njfu.edu.cn。

密集的地区之一,总流域面积达 $3.69 \times 10^4 \text{ km}^2$;随着全球气候变化的影响和城市化的建设,太湖流域的下垫面特征也随之发生显著的变化^[4-5]。

从理论上说,下垫面发生变化后,其反射率和粗糙度等都随之发生变化,导致其能量平衡发生变化,从而引起区域气候发生变化^[6]。人类活动对太湖流域下垫面的影响及其气候效应已经引起有关研究人员的关注^[7-8]。研究表明,随着经济的快速发展,城市迅速扩张,城市水面率持续缩减,城市水文效应明显,强度高的极端降水过程对太湖流域带来了威胁^[9]。适宜太湖蓝藻生长发育,引起蓝藻暴发的天气类型是温度偏高、降水量偏少。近几年的气候变化向造成太湖区域蓝藻生长的天气类型演变,即太湖区域的气候变化趋势总体上有利于太湖蓝藻暴发^[10]。

本文利用太湖流域内 21 个气象台站 1958—2017 年的长期观测数据,运用趋势系数、气候倾向率等方法对该区气候特征和变化趋势进行了分析,进一步认识太湖流域下垫面变化引起的气候效应,为区域生态环境治理与改善提供科学依据。

1 资料及方法

1.1 资料

采用太湖流域地区内部及区外相邻地区共 21 个气象站 1958 至 2017 年的月平均气温、降水量为主要研究资料,所用气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),各站点分布如图 1 所示。数据分析和绘图采用 DPS 数据处理系统、Origin 和 Golden Software Surfer 等工具。

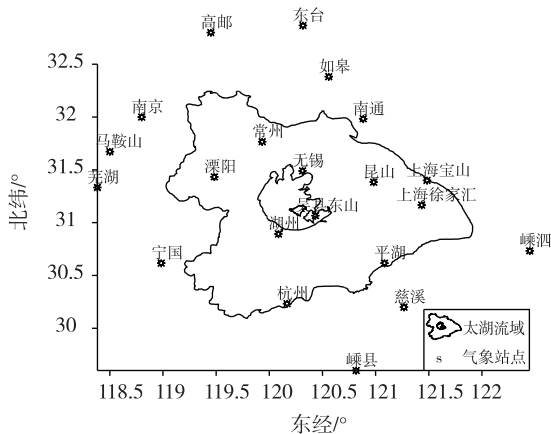


图1 太湖流域及气象站分布

1.2 方法

由于各站建站年代不同,采用回归订正法将较

短的时间序列插补延长,使上述气候要素的时间序列长度统一在 1958—2017 年时段内。然后,对数据按照以下方法进行计算和分析^[11]。

1.2.1 气候倾向率 气象要素 x 的长期趋势变化,可采用线性回归方程

$$\bar{x}_t = a_0 + a_1 t \quad a_1 = \frac{d\bar{x}_t}{dt} \quad t=1, 2, \dots, n \text{ (年度序列号)} \quad (1)$$

式中, a_0 为常数, a_1 为回归系数。当 a_1 为正(负)时,表示要素在计算的时段内线性增加(减弱)。 $a_1 \times 10$ 称为气候倾向率,单位为某要素单位/10 a。由于 a_1 有单位,所以它的数值大小不能在不同的变量中比较;甚至在同一要素的不同地点(区域)也不能进行比较。

1.2.2 气候趋势系数 气温和降水序列是符合正态分布的随机变量,其中,逐年时间是递增序列,即 $1, 2, 3, \dots, n$ 。如果 n 个时刻所对应的要素序列与自然数列相关显著,表示该要素气候趋势明显,存在增加(减少)趋势。要素与自然序列的相关系数 r_{xt} 可表示为:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (2)$$

r_{xt} 称作气候趋势系数。根据回归理论,气候趋势系数 r_{xt} 与气候倾向率 a_1 有如下关系:

$$a_1 = r_{xt} (\sigma_x / \sigma_t) \quad (3)$$

其中, σ_x , σ_t 分别是要素序列与自然数列的均方差。

可以使用通常的相关系数统计检验方法,检验气候趋势 r_{xt} 是否显著。由于 r_{xt} 是无单位的,所以可以根据它的数值大小比较不同的气象要素的长期趋势大小;它特别适合于对一个大范围的气象要素场的长期趋势的空间分布特征的研究。

2 结果与分析

2.1 气温变化趋势

2.1.1 区域平均气温变化特征 各气象站气温数据 1958—2017 年各月、年平均温度和气温年较差的趋势系数,对各站求平均代表整个研究区的气温变化趋势。经信度为 0.05 的 t 检验,当 $|r_{xt}| \geq 0.254$ 时相关显著,可认为此变化不是随机波动而是明显的气候趋势。从表 1 可看出,除 7、8 月外,其余各月

和年均温都达到显著相关水平,表明太湖流域 1958 年以来气温呈上升趋势。表 1 还表明,尽管各月和年均温都有升高趋势,但年均温的趋势系数最大(0.734),方差最小(0.696),表明年均温与自然序列相关最为密切,60 a 中波动小,线性上升趋势最为明显,所以用本法表述年均温的趋势变化效果更好。年较差的趋势系数为负,说明年较差有减少趋势,这种变化趋势与月、年均温相反。从气候变化倾向率可看到,年均温以 0.293℃/10 a 幅度升高,年较差以 0.283℃/10 a 幅度下降。对太湖流域而言,季节可划分为:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12—翌年 2 月为冬季^[12]。从表 1 可看出,冬、春 2 季(主要是 12 月—翌年 5 月)气温上升比其夏、秋 2 季(6—11 月)强烈,平均达 0.362℃/10 a,而夏、秋 2 季平均为 0.222℃/10 a。由于冬、春 2 季变暖程度强烈,而夏、秋 2 季则较为缓和,最冷月平均温度升高比最热月大,所以导致气温年较差减少^[13]。太湖流域变暖程度较强烈,就年均温气候倾向率而言,苏浙沪皖地区平均为 0.277 5℃/10 a^[14],而本区为 0.293℃/10 a,主要原因应该与本区上海、杭州及江苏南部地区城市化的快速推进有关。

表 1 太湖流域 1958—2017 年气候趋势系数及倾向率							
类别	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月
趋势系数(r_{st})	0.434	0.440	0.444	0.540	0.690	0.358	0.224
均方差(σ)	1.314	1.727	1.388	1.264	1.121	0.902	1.274
倾向率/ (℃/10 a)	0.326	0.435	0.353	0.391	0.443	0.185	0.164
类别	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年均值	年较差
趋势系数(r_{st})	0.188	0.354	0.606	0.373	0.289	0.734	-0.286
均方差(σ)	1.136	1.054	1.074	1.306	1.367	0.696	1.730
倾向率/ (℃/10 a)	0.122	0.214	0.372	0.279	0.226	0.293	-0.283

2.1.2 气温年代际变化特征 为反映气温变化特征,选取区内典型气象站,计算了每 10 a 的气候趋势系数,结果如表 2 所示。由表 2 可见,年平均气温在 1958—1967 年以及 1978—1987 年时间段呈下降趋势,1988 年开始有显著的持续上升趋势。从气温年较差来看,除 1978—1987, 1988—1997, 1998—2007 年这 3 个时间段气温年较差与年平均气温变化趋势相同外,其余时间段气温年较差与年均气温变化趋势相反,即气温升高时,年较差降低;反之升高。这说明年内各月气温存在季节差异。1958—1967 年,降温主要出现在 2—4 月、7 月和 12 月;增

温主要出现在 1,5,8,10 月。1968—1977 年年平均气温是降低的,降温主要出现在 5 月和 11 月,增温主要出现在 2—4 月和 10 月。1978—1987 年,降温主要出现于 6,7,12 月,增温并不明显。1988—1997 年除 1 月以外无明显降温,增温主要出现于 5—10 月。1998—2007 年降温并不明显,而增温主要出现于 6—8 月。2008—2017 年除 9 月以外其余月份无明显降温,而增温主要出现在 1,4 月。

综合表 1,2 可看出,本区在 1958—2017 年中年平均气温是上升的,但是此升高并非单边上升,其过程是 1958—1967,1978—1987 年气温下降,尤其 1978—1987 年降温明显,自 1988 年气温开始回升,1998—2007, 2008—2017 年升温明显。夏季气温变化与年均温变化基本一致;但冬季气温变化不同,1958—1967 年冬季气温是上升的,1968—1977 年以及 1978—1987 年变化不显著,1988—1997 年下降明显,1998—2007 年不显著, 2008—2017 年冬季气温上升明显。

表 2 太湖流域 1958—2017 年各年代气候趋势系数

年代	月						
	1	2	3	4	5	6	7
1958—1967	0.319	-0.129	-0.394	-0.217	0.685	-0.153	-0.464
1968—1977	-0.031	0.428	0.415	0.376	-0.394	-0.058	0.010
1978—1987	-0.098	-0.065	-0.192	-0.234	0.141	-0.713	-0.408
1988—1997	-0.478	0.256	0.300	-0.018	0.533	0.129	-0.206
1998—2007	-0.108	0.083	0.275	0.041	0.312	0.633	0.357
2008—2017	0.625	0.272	0.295	0.445	-0.089	-0.255	0.110
年代	月					年均值	年较差
	8	9	10	11	12		
1958—1967	0.443	-0.121	0.393	0.241	-0.669	-0.147	0.008
1968—1977	-0.217	-0.139	0.625	-0.296	-0.138	0.272	-0.100
1978—1987	0.100	0.124	0.202	0.174	-0.450	-0.319	-0.060
1988—1997	0.448	0.481	0.430	0.206	0.016	0.363	0.018
1998—2007	0.463	-0.036	0.165	0.287	-0.108	0.553	0.289
2008—2017	0.148	-0.399	-0.197	0.272	0.310	0.623	-0.441

2.1.3 气温变化的空间分布特征 图 2 为太湖流域气温变化的倾向率分布图。研究区气温倾向率均为正值,表明整个太湖流域都是气温升高区,但是气温的升高存在显著的地区差异,最大的增温中心位于东部的上海地区,由于城市化的扩张,气温升高显著,气温倾向率大于 0.4℃/10 a;最小的气温倾向率位于西南部地区,主要原因是本区以水体和山区为主,土地利用变化较小,同时水体热容量大,导致区域升温幅度较小,气温倾向率小于 0.25

℃/10 a。太湖流域深受城市化建设以及城市化持续扩张的影响,下垫面水热平衡特征发生显著变化,原先大面积分布的水网格局逐步被城市硬化路面所取代,在全球变化的背景下加上城市热岛效应,导致区域气候显著升高。

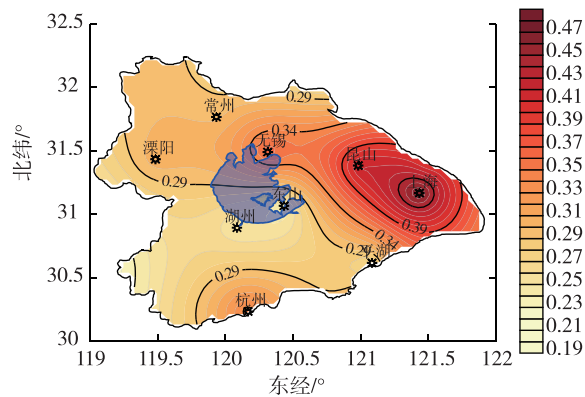


图2 太湖流域年均气候倾向率

2.2 降水变化趋势

由于影响降水的因素比较多,导致降水的时空差异很大。一个地区降水量即有上升或下降的趋

势变化,也是震荡性的上升或下降,与自然序列 1, 2, 3, ..., n 的相关程度就会降低,因此变化趋势较小。表 3 为太湖流域 1958—2017 年的降水量变化趋势,1 月、6—8 月降水量有较为显著的增加趋势,而 4—5 月及 9 月降水呈较弱的减少趋势(见图 3)。从图 4 中可看出,流域年降水量总体上呈显著的增加趋势,降水倾向率为 3.026 mm/10 a。

表 3 太湖流域 1958—2017 年年降水趋势系数及倾向率							
类别	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月
趋势系数 (r_{xt})	0.342	0.105	0.111	-0.202	-0.222	0.300	0.250
均方差 (σ)	30.185	33.548	42.509	37.581	38.168	78.364	76.053
倾向率/ (mm/ 10 a)	5.915	2.023	2.696	-4.347	-4.853	13.456	10.869
类别	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年均值	年较差
趋势系数 (r_{xt})	0.288	-0.224	0.087	0.103	0.120	0.339	0.288
均方差 (σ)	68.698	59.108	51.866	37.136	29.360	187.228	68.698
倾向率/ (mm/ 10 a)	11.348	-7.588	2.595	2.190	2.012	3.026	11.348

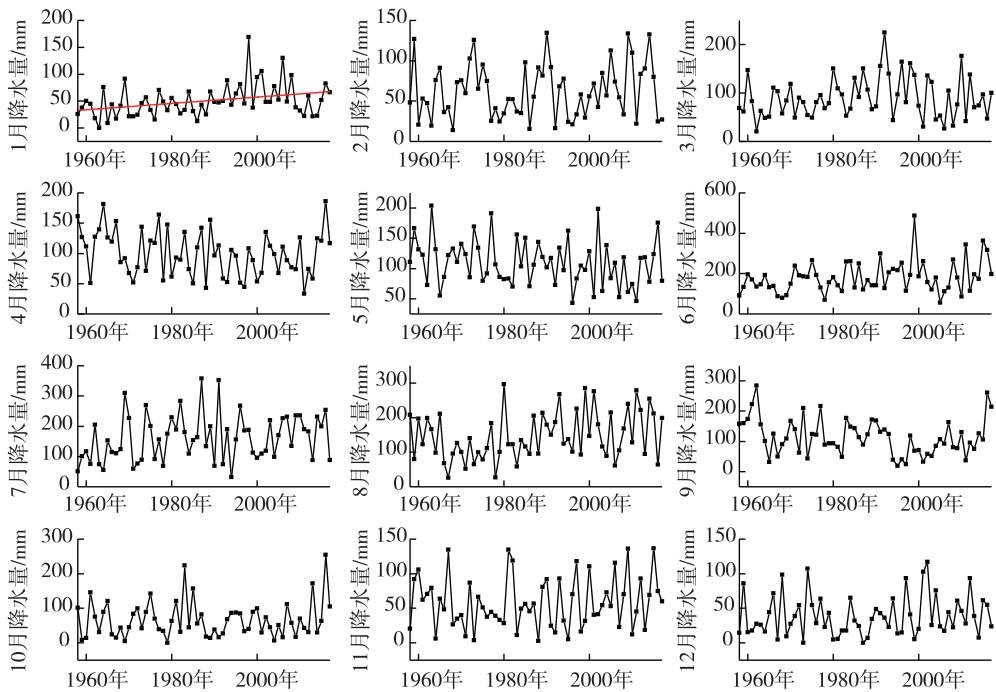


图3 太湖流域各月平均降水量逐年变化

从降水量年代际变化上来看,1958—1967 年,太湖流域降水量为 1 109.4 mm;1968—1977 年为 1 133.7 mm;1978—1987 年与上 1 个 10 a 相近,为 1 138.0 mm; 1988—1997 年有所上升,达到

1 183.8 mm; 1998—2007 年为 1 176.7 mm, 2008—2017 年有显著上升,为 1 320.3 mm。60 a 来,太湖流域年平均降水量呈波动式上升。1968—1977 年和 1978—1987 年降水比 1958—1967 年多 20 mm 以

上,1988—1997 和 1998—2007 年则 1958—1967 年降水 70 mm 以上,2008—2017 年比 1958—1967 年更是多达 210.9 mm。

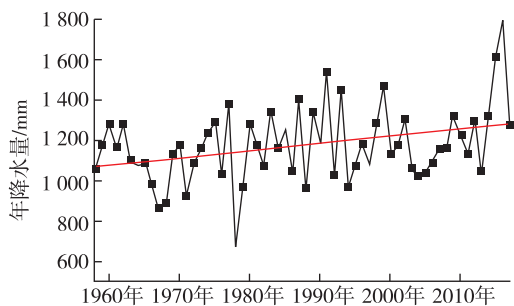


图 4 太湖流域年平均降水量逐年变化

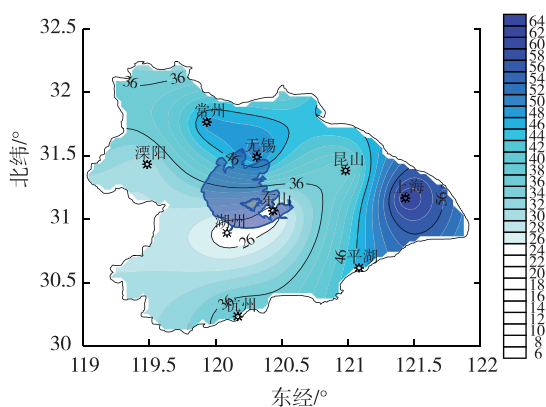


图 5 太湖流域年降水倾向率

研究区降水量变化的区域分析如图 5 所示。太湖流域东部地区降水增加最为显著,降水倾向率高于 50 mm/10 a,常州无锡地区的降水量也有显著的增加趋势,降水倾向率高于 46 mm/10 a,原因主要与这些地区的城市化产生的“雨岛”效应有关;降水增加最不显著的地区位于太湖南部的湖州地区,降水倾向率小于 26 mm/10 a。整体来看,太湖流域在过去的近 60 a 里降水总体上呈增加趋势,太湖流域地区是改革开放后区域土地利用及覆被受人类活动影响最为显著的地区之一,年降水的增加趋势可能与本区下垫面发生显著的改变以及城市化扩张有关。

3 结论

利用气候趋势系数及气候倾向率对太湖流域 1958 年以来气温及降水进行了分析,结论如下:

(1)1958 年以来太湖流域气温有较明显的持续上升趋势,年均温以 0.293 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 幅度升高,波动较小。气温升高的季节变化上,表现为冬、春季升温大于夏、秋季,由于最冷月平均温度升高比最热

月大,所以导致气温年较差减少。

(2)气温年代际变化过程如下:1978—1987 年平均气温呈下降趋势,1998—2007 年、2008—2017 年有显著的上升趋势,其余时间段变化不显著。夏季气温变化与年均温变化基本一致;但冬季气温变化不同,1958—1967 年冬季气温是上升的,1968—1977 年以及 1978—1987 年变化不显著,1988—1997 年下降明显,1998—2007 年不显著,2008—2017 年冬季气温上升明显。

(3)1958 年来整个太湖流域都是气温升高区,但是气温的升高存在显著的地区差异,最大的增温中心位于东部,气温倾向率大于 0.4 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;最小的气温倾向率位于西南部地区,小于 0.25 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

(4)太湖流域年降水量总体上呈显著的增加趋势,平均年降水量倾向率为 3.026 mm/10 a。1 月、6—8 月降水量有较为显著的增加趋势,而 4—5 月及 9 月降水呈较弱的减少趋势。空间分布上,太湖流域东部地区降水增加最为显著,降水倾向率高于 50 mm/10 a,降水增加最不显著的地区位于太湖南部的湖州地区,降水倾向率小于 26 mm/10 a。

参考文献:

- [1] 任婧宇,彭守璋,曹 扬,等.1901—2014 年黄土高原区域气候变化时空分布特征[J]. 自然资源学报,2018,33(4): 621-633.
- [2] 潘 婕,刘 珂,夏冬冬.PRECIS 对 SRES A1B 情景下的中国区域气候变化预估分析[J]. 海洋预报,2017,34(1): 34-46.
- [3] 张炜月.大尺度土地利用变化对温度及水分和能量收支影响的数值模拟研究[D].南京:南京大学,2016.
- [4] 吴浩云,王银堂,胡庆芳,等.太湖流域 61 年来降水时空演变规律分析[J]. 水文,2013,33(2): 75-81.
- [5] 刘兆飞,王翊晨,姚治君,等.太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J]. 自然资源学报,2001,26(9): 1575-1584.
- [6] ZHAO M, ZENG X M. A theoretical analysis on the local climate change induced by the change of landuse[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(1): 45-63.
- [7] 尹义星,许有鹏.太湖流域腹部地区水位对降水变化及城镇化的响应[J]. 自然资源学报,2011,26(5): 769-779.
- [8] 王雪梅,杨龙元,秦伯强,等.太湖流域春季降水化学组成及其来源研究[J]. 海洋与湖沼, 37(3): 249-255.
- [9] 刘 鑫,顾乐雨,王 屏,等.近 30 年太湖流域极端降水特征分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 1-4.
- [10] 尚兆堂,任 健,秦铭荣,等.气候变化与太湖蓝藻暴发的关系[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 55-61.
- [11] 栾兆擎,章光新,邓 伟,等.三江平原 50 a 来气温及降水变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 39-43.
- [12] 张 静,吕 军,项 瑛,等.江苏省四季变化的分析[J]. 气象科学, 2008, 28(5): 568-572.
- [13] 冯敏玉,魏 丽,胡逢喜,等.南昌地区近 55 年的气温与降水变化分析[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(4): 781-784.
- [14] 包云轩,刘 维,高 萍,等.气候变暖背景下江苏省水稻热害发生规律及其对产量的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 289-296.