

太湖流域下垫面改变与气候变化的响应关系

纪迪^{1,2}, 张慧^{2,3*}, 沈渭寿², 王桥^{3,4}, 李海东², 林乃峰^{1,2}

(1. 南京信息工程大学 遥感学院, 南京 210044; 2. 环境保护部 南京环境科学研究所, 南京 210042;
3. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210046; 4. 环境保护部 环境卫星应用中心, 北京 100094)

摘要: 运用两种 NDVI 数据集 (Pathfinder AVHRR 和 SPOT VEGETATION) 和卫星遥感数据, 采用 3S 技术, 通过人机交互式目视方法解译出 1979、1984、2000 和 2009 年太湖流域的土地利用数据, 结合 1956—2007 年太湖流域主要气象站点的气象资料, 研究了太湖流域下垫面 (NDVI 和土地利用) 变化与各主要气候因子的响应关系。结果表明: ①近 30 a 太湖流域 NDVI 变化呈先增后减的趋势, 空间上呈由东北向西南递增的趋势, 浙江省区域植被覆盖较好, 其次为苏锡常镇地区, 上海植被较为稀少; ②太湖流域耕地面积显著减少, 城镇用地显著增加, 林地与草地呈缓慢增长趋势, 其中上海和苏州城市化进程速度最快, 其次为无锡、常州, 而杭州、嘉兴、湖州和镇江城市化进程较为缓慢; ③20 世纪 80 年代初期太湖流域出现显著的增温, 并在近 20 a 增温幅度显著增加, 平均相对湿度呈波动下降趋势, 其下降速率为 $-1.25\%/10\text{ a}$, 近 50 a 降水总量呈现小幅上升趋势, 但近 20 a 降水量呈减少趋势, 速率达到 $-37.31\text{ mm}/10\text{ a}$, 日照时数呈现下降趋势, 其下降速率为 $-56.66\text{ h}/10\text{ a}$; ④与太湖流域 NDVI 变化响应最为显著的气候因子为气温, 其次为平均相对湿度以及日照时数, 降水总量与 NDVI 的相关性比较弱; ⑤城市化进程迅速的地区相较于城市化缓慢的地区, 其增温更快、相对湿度降幅更大、降水量增加更为缓慢, 日照时数减少越快。

关键词: 下垫面改变; 土地利用; NDVI; 气候变化; 太湖流域

中图分类号: Q948 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2013)01-0051-12

下垫面类型的改变会影响地球表面热量和水分的分配, 从而导致局地或者更大范围的气候变化。近年来许多学者对土地利用变化、植被指数 (NDVI) 变化与气候变化的关系进行了广泛的研究, 如黄奕龙、陈利顶等研究了黄土丘陵地区下垫面的变化对土地利用以及气候的影响^[1], 杨续超、张锦锂等分析了中国地表温度变化对土地利用以及覆被变化的影响^[2], 周淑贞研究了上海地区城市化对气候的影响^[3], 刘娇妹等分析了北京地区不同下垫面对气候的影响^[4], S. K. Jusuf 等分析了新加坡土地利用变化对城市热岛效应的影响^[5], J. L. Weiss 等分析了新墨西哥州不同季节及年内植被与气候的相关性^[6], Fabricante 等分析了巴塔哥尼亚北部地区 NDVI 与降水量之间的关系^[7], 宋怡等利用 NDVI 数据分析了中国寒旱地区的植被生长状况及其对各种气候因子的响应关系^[8]。可以看出, 多数研究并没有将气象数据以及下垫面变化数据 (包括 NDVI 数据、土地利用数据) 相结合开展二者之间的耦合关系研究。

收稿日期: 2011-09-15; 修订日期: 2012-05-04。

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目“基于环境一号等国产卫星的环境遥感监测关键技术及软件研究” (2008BAC34B07-03, 2008BAC34B01-2); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07528-005)。

第一作者简介: 纪迪 (1987-) 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要研究生态环境遥感监测。E-mail: jackal0077@hotmail.com

* 通信作者简介: 张慧 (1968-) 博士, 研究员, 主要从事 GIS、RS 在区域生态环境质量评价、生态承载力和生态安全、气候变化与应对、资源开发与大型工程环境管理等方面的应用研究。E-mail: zhanghui@nies.org

太湖流域位于东经 $119^{\circ}11' \sim 121^{\circ}53'$, 北纬 $30^{\circ}28' \sim 32^{\circ}15'$ 之间 , 流域边界西抵天目山和茅山山脉 , 北滨长江口 , 东临东海 , 南濒杭州湾 , 总面积 $3.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占全国国土总面积的 0.4% , 属于亚热带季风气候区 , 是我国经济最发达、投资增长和社会发展最具活力的地区之一。由于受到全球变暖以及人类活动的影响 , 太湖流域的下垫面出现了显著的变化 , 主要表现在: 耕地显著减少 , 城镇扩张加速 , NDVI 呈现下降趋势。本文以太湖流域为研究对象 , 通过长时间序列植被指数数据集分析流域内 NDVI 的年变化; 利用 1979、1984、2000 和 2009 年的遥感数据 , 解译太湖流域 4 期土地利用变化情况; 选用能够代表太湖流域的常州、溧阳、吴县东山、上海、杭州、平湖 6 个气象站点的气候资料 , 分析主要气候因子的变化趋势。由于 NDVI 数据、土地利用遥感数据以及气候因子数据的时段有差异 , 本文对 NDVI、土地利用与气候因子进行单项分析时使用该数据各自的时间段 , 而进行联合分析时采用的时间段则统一为 1982—2007 年 , 从而保证了这 3 种数据在时间上的一致。在此基础上 , 本文研究了以上海地区为代表的城市化进程较为显著的区域与以嘉兴平湖地区为代表的城市化进程较为缓慢的区域的土地利用变化与各气候因子的不同耦合关系; 此外 , 还分析了太湖流域不同地区 NDVI 变化对其局部气候的响应关系。

1 材料和方法

1.1 数据资料

NDVI 数据主要采用西部数据中心提供的 Pathfinder AVHRR NDVI 数据集以及 SPOT VEGETATION NDVI 数据集 , 其中 Pathfinder AVHRR NDVI 数据集是基于 8 km 分辨率的从 1981 年 7 月至 2001 年 12 月的每 10 d 合成的 4 个波段的光谱反射率及每 10 d 合成的 NDVI 数据集(由于 NOAA-13 发射失败 , 没有使用 Pathfinder AVHRR NDVI 1994 年的数据); SPOT VEGETATION NDVI 数据集是基于 1 km 分辨率的从 1998 年 4 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日的每 10 d 合成的 4 个波段的光谱反射率及 10 d 最大 NDVI 数据集。本文为了保持时间尺度的完整性 , 1982—1998 年采用 Pathfinder AVHRR NDVI 数据集 , 1999—2007 采用 SPOT VEGETATION NDVI 数据集。

遥感影像数据是通过国际科学数据服务平台获取 1979 年 MSS 数据、1984 年 TM 数据、2000 年 ETM 数据 , 以及通过环境保护部卫星环境中心(<http://www.secmep.cn/secPortal/portal/index.faces>) 获取 2009 年环境小卫星数据 , 其中 1979 年 MSS 数据分辨率为 60 m , 1984、2000 和 2009 年的 TM/ETM 数据分辨率为 30 m。

通过中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>) 获取太湖流域地区 1956—2007 年 6 个气象站(常州、溧阳、吴县东山、上海、杭州、平湖) 逐日气象资料 , 包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、日照时数以及风速。

1.2 研究方法

1.2.1 NDVI 数据预处理

虽然这两种 NDVI 数据集数据经过了几何校正、大气校正、辐射校正等预处理 , 并且采用了最大合成法减少了云、大气、太阳高度角等的影响 , 但是由于卫星几何视场角、大气中的灰霾、云以及数据合成过程对 NDVI 的影响 , 因此用不同数据集中的 NDVI 数据仍然有偏差^[9]。在本研究中使用 Chen X Q 等^[10] 提出的三点平滑方法修正 NDVI 数据 , 并且使用遥感软件 ENVI 求取 1982—2007 年(不含 1994 年) 的 NDVI 影像平均值 , 用此值来表征太湖流域植被覆盖的年变化状况。利用现有的太湖流域矢量边界截取研究区域的数字影像 , 显示

研究区植被分布状况,由暗到亮表明植被覆盖度由差到好的基本状况。

采用简单差分分析方法:百分比变化图像 = (NDVI 年份 2 - NDVI 年份 1) / NDVI 年份 1,利用不同年份 NDVI 平均图像,分别生成太湖流域 NDVI 百分比变化图。对于简单差分分析法,选择使用的年份很重要,不同的选择组合,其变化趋势是完全不同的,本文由于用了两种不同的数据源,因此分别以 AVHRR NDVI 数据(1982、1990 年)以及 SPOT NDVI 数据(1999 年)为基准,生成太湖流域 NDVI 百分比变化图。利用 ArcGIS 软件,提取遥感影像中的 NDVI 数值,对太湖流域 NDVI 的空间变化进行分析。

1.2.2 土地利用遥感解译方法

利用 ERDAS 遥感软件对影像进行预处理,采用最小二乘法分别对 1979、1984、2000、2009 年遥感影像进行几何精校正,像元重采样采用双线性差值法,从而消除不同遥感影像空间分辨率不同所造成的影响,使遥感影像几何精校正误差不超过 1~2 像元。参考相关研究方法^[11]采用人机互动目视解译方法,其中 MSS、TM、ETM 以及小卫星影像在解译过程中均采用 4、3、2 标准假彩色合成,并且参考 GB/T21010—2007 将土地利用现状分为耕地(包括水田、旱田)、林地(包括有林地、灌木林地、疏林地、其他林地)、草地(包括高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地)、城镇用地(包括城镇、农村居民点)四大类,运用 3S 技术获取各个年代的土地利用情况,利用 Excel 2003 统计土地利用变化情况。

1.2.3 气候因子与 NDVI 数据分析方法

对于各种气候因子数据,本文主要采用了 Mann-Kendall(以下简称 M-K)非参数分析趋势法^[12-13]进行处理,并且计算了各个气候因子的 M-K 倾斜度以检验序列单调趋势的变化情况。M-K 法是用来评估各种气候因子时间序列趋势的检验方法,该法不需要样本遵从一定的分布,因此在趋势分析中得到了广泛的应用^[14-15]。为了减少单站记录的片面性,在计算全流域的各种气候因子数据时,主要根据泰森多边形法则计算出各种气候因子的平均序列。本文使用的气象数据都是通过累加或者平均获得的。文中分析所用的距平序列是相对于 1956—2007 年的多年平均距平,并对距平序列计算 5 a 滑动平均。

由于植被生长状况与众多的因素(如气候因素、地形因素等)有关,因此,植被指数与气候因子之间的关系不宜用简单的相关系数来探讨,而偏相关系数分析可以排除假象相关,找到真实联系最为密切的变量。

2 结果与分析

2.1 太湖流域 NDVI 年际变化

运用三点平滑方法修正 NDVI 数据,并且使用遥感软件 ENVI 求取 1982—2007 年太湖流域 NDVI 年际平均值,并求出其距平变化(图 1),可以看出太湖流域 NDVI 变化呈现先增后减的趋势。在 1990 年 NDVI 达到最高值,高于 NDVI 多年均值 0.075;且在 1990 年之后 NDVI 呈现持续下降的趋势,在 2002 年达到最低值,低于 NDVI 多年均值 0.048。

1982—2007 年太湖流域 NDVI 变化量为 $-0.020/10$ a,就不同地区而言,变化最大的为常州,变化率为 $-0.049/10$ a,其他依次为平湖($-0.002/10$ a) > 杭州($-0.004/10$ a) > 吴县东山($-0.006/10$ a) > 上海($-0.017/10$ a) > 溧阳($-0.033/10$ a),可以看出,NDVI 呈由东北向西南递增的趋势。湖州、杭州、嘉兴 NDVI 值较大,在 0.3~0.6 之间,上海、苏州、无锡、常州、镇江 NDVI 值比较低,在 0.06~0.4 之间,太湖流域中部地区 NDVI 在 0.3~0.45 之间。总体上讲,太湖流域浙江省区域植被覆盖较好,其次为苏锡常镇地区,上海植被较为稀少。

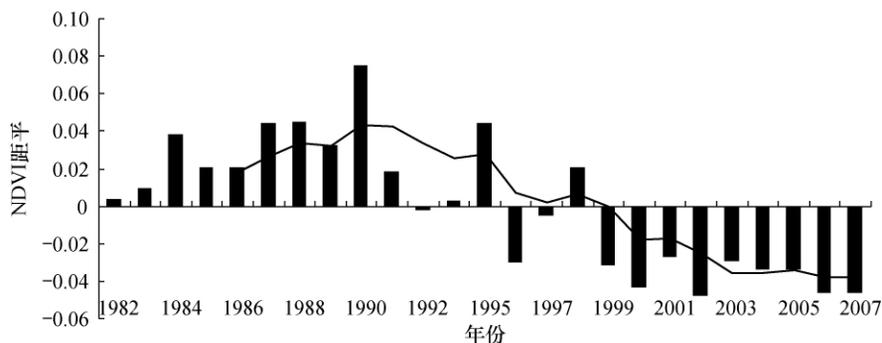


图1 太湖流域 NDVI 距平曲线

Fig. 1 Departure curve for mean NDVI in Taihu Basin

图2为太湖流域NDVI百分比变化图,可见太湖流域不同时间段NDVI变化情况差异较大,大致可分为三个阶段:①1982—1989年太湖流域NDVI呈上升趋势,整体NDVI变化百分比为12.3%;②1990—1998年呈显著下降态势,整体NDVI变化百分比为-13.42%;③1999—2007年NDVI变化地域差异性较大,苏州、上海、嘉兴等区域呈显著下降趋势,湖州、杭州等呈上升趋势,整体NDVI变化百分比为-8.75%。可见,1982—2007年,NDVI下降的区域逐渐扩张,太湖流域整体的NDVI出现了显著的下降。植被覆盖度显著下降的区域集中在上海、苏州、无锡、常州一线,但是在城市内部如上海市区植被的覆盖率有所上升,杭州、嘉兴等区域植被覆盖度良好。

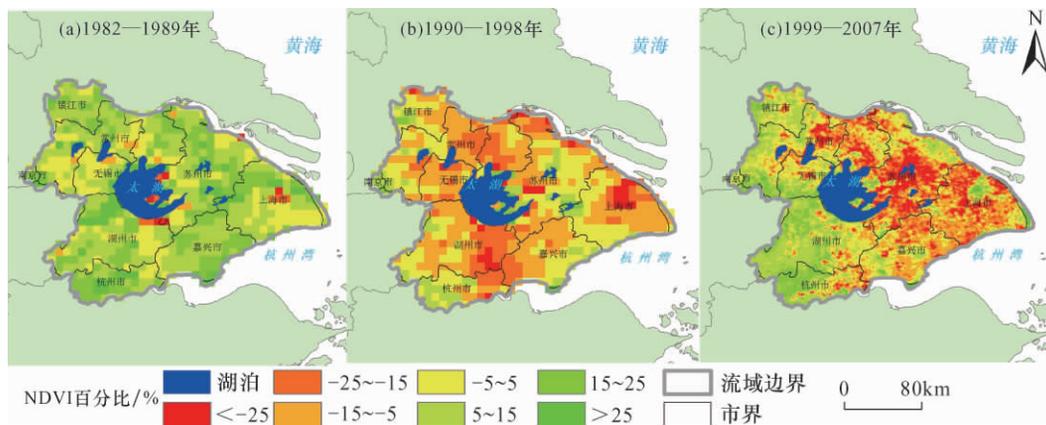


图2 太湖流域 NDVI 百分比变化

Fig. 2 Percentage change of NDVI in Taihu Basin

2.2 太湖流域土地利用变化

在城市化过程中由于人为或自然因素改变了原来的地表特征,引起地表辐射平衡和能量交换过程与其他地区有很大差异,这影响着城市气候,同时也在一定程度上作用于全球气候和大气环流的变化过程^[4]。

太湖流域1979—2009年不同地区下垫面变化情况见表1,可以看出,太湖流域耕地呈显著减少趋势,通过解译近30a遥感影像可知,耕地面积减少了5698.95 km²,占太湖流域总面积的15.19%;林地与草地面积呈小幅度增加趋势,增长率分别为9.94、2.58 km²/a;城镇用地面积增加明显,其增长率为143.28 km²/a,增加面积占太湖流域总

面积的 12.69%。

表 1 1979—2009 年太湖流域不同地区土地利用变化

Table 1 Changes of land use in different prefectures in Taihu Basin

(km²)

时期	常州	无锡	苏州	镇江	杭州	湖州	嘉兴	上海	太湖流域
1979—1984 年	-90.29	-67.50	-210.90	-33.57	-27.87	-44.53	-105.25	-206.88	-838.85
耕地	1984—2000 年	-213.48	-218.51	-323.90	-46.58	-149.95	-80.66	-389.22	-1 623.09
	2000—2009 年	-336.02	-401.37	-1 098.33	-192.19	-127.49	-193.78	-203.32	-736.23 -3 237.01
	1979—2009 年	-639.79	-687.39	-1 633.14	-272.35	-305.31	-340.22	-389.23	-1 332.32 -5 698.95
林地	1979—1984 年	1.81	-5.20	2.85	3.94	4.83	-7.92	1.64	1.35 32.51
	1984—2000 年	13.61	0.01	12.59	1.73	5.70	41.87	4.41	7.92 144.52
	2000—2009 年	71.26	22.37	0.43	5.67	13.10	23.68	1.46	13.82 125.41
	1979—2009 年	86.68	17.18	15.87	11.34	23.63	57.64	7.52	23.10 302.44
草地	1979—1984 年	0.58	-0.43	1.59	0.05	3.12	17.11	-0.24	0.00 19.52
	1984—2000 年	0.72	0.46	1.09	0.42	0.68	10.96	0.60	0.01 26.27
	2000—2009 年	-1.50	-0.12	0.54	0.29	0.89	41.50	2.27	1.39 39.16
	1979—2009 年	-0.20	-0.09	3.22	0.76	4.69	69.57	2.63	1.41 84.95
城镇用地	1979—1984 年	66.68	57.92	147.23	31.48	14.54	38.83	116.58	201.66 714.19
	1984—2000 年	164.28	186.98	243.81	47.94	124.64	40.11	78.76	383.74 1 227.57
	2000—2009 年	228.75	363.38	865.54	165.09	124.46	103.85	215.75	760.58 2 822.42
	1979—2009 年	459.71	608.28	1 256.58	244.51	263.64	182.79	411.08	1 345.98 4 764.18

苏州、上海耕地面积减少最为显著,减少面积分别为 1 633.14、1 332.32 km²(表 1),占苏州、上海总面积的 19.82%、24.58%;无锡、常州、杭州和镇江耕地面积减少也较为显著,下降速率分别为 21.29、19.85、10.10、7.93 km²/a;湖州以及嘉兴耕地减少面积较小,仅占湖州、嘉兴总面积的 5.84%、9.70%。

由表 1 可见,湖州、常州林地面积增加最显著,近 30 a 林地面积分别增加了 57.64、86.86 km²,增长率分别达到 1.99、2.54 km²/a;太湖流域其余地区林地面积增加均较为缓慢,增长率保持在 0.25(嘉兴)~0.73(上海) km²/a 之间。

湖州草地面积增加最为显著,近 30 a 草地面积增加了 69.57 km²(表 1),占湖州总面积的 1.19%;镇江、杭州、嘉兴、上海和苏州草地面积增加缓慢,其增长率保持在 0.03(镇江)~0.13(杭州) km²/a;由表 1 知,无锡与常州 2009 年草地面积均低于 1979 年草地面积,草地减少面积分别为 0.09、0.20 km²。

从表 1 可知,上海和苏州城镇面积增加最为显著,其增加面积分别为 1 345.98、1 256.58 km²,城镇面积增长率分别达到 40.93、36.97 km²/a;无锡、常州和嘉兴城镇面积增加较为显著,增加面积分别占城市总面积的 13.33%、10.59%、10.25%,城镇面积增长率分别达到 18.77、14.38、11.84 km²/a;镇江、杭州以及湖州城镇面积增加较少,近 30 a 增加面积分别为 244.51、263.64、182.79 km²,其增长率分别达到 7.19、8.69、5.37 km²/a。

由此可见,上海和苏州城市化进程速度最快,其次为无锡、常州,而杭州、嘉兴、湖州和镇江城市化进程较为缓慢。

2.3 太湖流域主要气候因子变化

2.3.1 气温变化

根据国际政府间气候变化专门委员会 IPCC 的估计,北半球 20 世纪 80 年代平均温度比 60 年代高 0.4 ℃,90 年代以后升温幅度增大,达 1 ℃左右^[16]。最近的观测事实表明,1906—2005 年全球平均气温上升 0.74 ℃^[17],近 50 a 的温度升高趋势为过去 100 a 的 2

倍^[18]。中国近 100 a 平均气温的变化与全球增温趋势大体相似。北部地区增温较为显著,年平均气温变化趋势为 $0.2 \sim 0.8 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,南方大部分地区变化趋势并不显著^[19-20],且冬季升温明显高于其他季节,年较差呈现减少趋势^[21]。

图 3 为太湖流域 1956—2007 年平均、最高和最低气温距平图以及平均气温的 5 a 滑动平均曲线,可以看出,太湖流域气温呈显著上升趋势始于 20 世纪 80 年代初期,1980—2007 年平均气温比 1956—1979 年的高出了 $0.60 \text{ } ^\circ\text{C}$;并且近 10 a 以来气温升高幅度尤为显著,其平均气温比多年平均气温高 $0.98 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

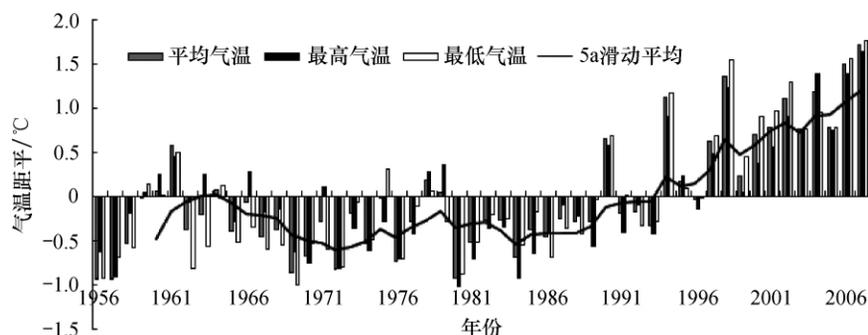


图 3 太湖流域年平均、最高和最低气温距平图与滑动平均曲线

Fig. 3 Annual mean, highest and lowest temperature anomalies curve in Taihu Basin

通过表 1 可知,太湖流域城镇用地与耕地面积的变化最为显著,而城镇用地以及耕地的面积变化对太湖流域的气温有着显著的影响,由于城市化进程不断的加速,在自然和人为因素双重影响下,1956—2007 年全流域增温幅度为 $0.38 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,并且升温幅度不断增加,近 20 a 太湖流域的增温幅度已经上升到了 $0.79 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。

1956—2007 年太湖流域各地区的增温速率差异不明显,均保持在 $0.40 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,其中上海地区增温速率较大,为 $0.48 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$;但近 20 a 以来由于城市化以及全球变暖双重作用影响,太湖流域各地区的增温幅度显著增大。太湖东部形成了以上海为核心的增温区域,20 a 来气温升高达到 $1.80 \text{ } ^\circ\text{C}$;而嘉兴地区形成了增温幅度较小区域,目前其平均气温低于太湖流域平均气温 $0.20 \text{ } ^\circ\text{C}$,最高、最低气温也比太湖流域均值低 $0.33 \sim 0.35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2.3.2 降水总量、平均相对湿度和日照时数变化

根据图 4 中 1956—2007 年的降水量数据序列可以看出,太湖流域降水总量呈现小幅上升趋势,其增幅为 $1.09 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。太湖流域降水增加的地区主要集中在北部地区,其增速为 $5 \sim 10 \text{ mm}/10 \text{ a}$;但是近 20 a 以来,由于城市化进程的加速以及全球变暖的影响,导致了相对湿度的降低,而相对湿度是影响降水的主要因素之一^[22],这也使得太湖流域的降水量呈降低趋势,近 20 a 以来太湖流域降水下降速率达到 $-37.31 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

由图 4 可知,太湖流域相对湿度呈波动下降趋势,其下降速率为 $-1.25\%/10 \text{ a}$,即 52 a 来太湖流域相对湿度下降了 6.50% ,并且平均相对湿度的下降趋势也逐年加剧,近 20 a 其下降速率已增大到 $-1.89\%/10 \text{ a}$ 。全流域总体表现出一定干化现象。尤其是上海地区,增温速率加快加剧了平均相对湿度的下降,其下降速率增大到 $-3.57\%/10 \text{ a}$;而镇江、常州东部和无锡、苏州中部一线由于建设新的水库以及鱼塘等原因,水体面积总体呈现上升趋势,相对湿度降幅较小。

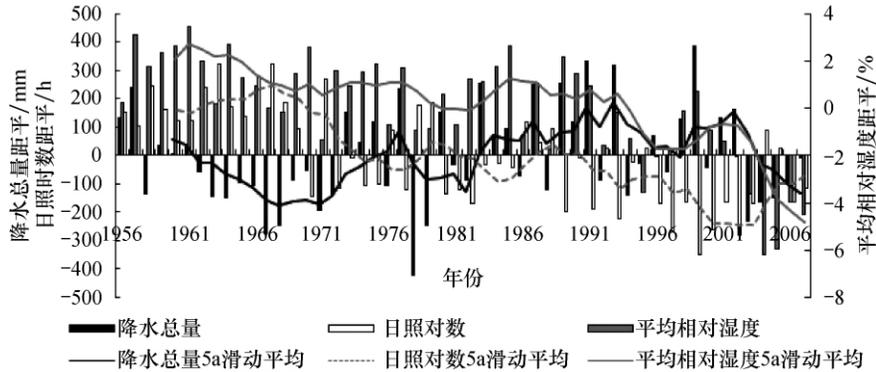


图4 太湖流域降水总量、平均相对湿度、日照时数距平图与滑动平均曲线

Fig. 4 Annual precipitation, relative humidity and sunshine duration anomalies curve in Taihu Basin

研究表明,云量、降水和气溶胶含量都对日照也有很大的影响^[23]。由图4中的日照时数距平曲线可以看出,降水与日照有着显著的负相关,1956—2007年,太湖流域日照时数呈现下降趋势,其下降速率为 $-56.66 \text{ h}/10 \text{ a}$;近20 a以来,由于降水的减少,日照时数的下降趋势也有所减缓,其降速为 $-11.52 \text{ h}/10 \text{ a}$ 。

3 讨论

3.1 NDVI变化与气候因子的响应关系

由表2可知,通过Pearson相关分析得出太湖流域NDVI与年平均、最高和最低气温呈显著的负相关关系,均通过了置信水平为0.01的显著性检验。溧阳NDVI与年平均、最高和最低气温负相关关系最为显著,相关系数分别为 -0.66 、 -0.55 和 -0.68 ,均通过了置信水平为0.01的显著性检验;常州、上海和杭州NDVI与年平均、最高和最低气温的负相关关系较为显著,均通过了置信水平为0.05的显著性检验,吴县东山与平湖NDVI与平均、最高和最低气温相关性较低,均没有通过置信水平为0.05的显著性检验。

通过表2可见,运用偏相关分析得出太湖流域NDVI与年平均、最高和最低气温相关关系不显著,其相关系数分别为 -0.12 、 0.13 和 -0.10 。上海NDVI与年平均、最高和最低气温的偏相关性最为显著,相关系数分别为 -0.62 、 -0.43 和 -0.78 ,均通过了置信水平为0.05的显著性检验,其中NDVI与平均、最低气温的相关系数通过了置信水平为0.01的显著性检验;吴县东山以及平湖的NDVI与年平均、最高气温的偏相关性较为显著,均通过了置信水平为0.05的显著性检验;常州、溧阳和杭州NDVI与年平均、最高和最低气温的偏相关性并不明显。

由表2中的Pearson相关系数分析可知,各种气温因子对NDVI直接作用的次序为年平均最低气温 $>$ 年平均气温 $>$ 年平均最高气温。

近年来太湖流域城市化进程日益加速,大面积耕地转变为城镇用地,并且太湖流域温度的不断攀升使得NDVI与气温呈显著的负相关,研究表明这是由于当温度超过植物生长的最适宜温度后,随着温度的增加会使植物的Rubisco加速反应大于羧化反应,最终使植物的净光合作用下降。同时气温的升高使蒸发量增大,土壤含水量减少,也不利于植被的生长^[8]。

表 2 太湖流域年平均 NDVI 与气温相关关系

Table 2 Correlation of temperature and NDVI in Taihu Basin

地区	平均气温			最高气温			最低气温		
	Pearson 相关	偏相关	通径系数	Pearson 相关	偏相关	通径系数	Pearson 相关	偏相关	通径系数
常州	-0.50*	-0.18	-2.12	-0.53**	-0.01	-0.06	-0.44*	0.28	1.52
溧阳	-0.66**	-0.36	-5.10	-0.55**	0.41*	2.61*	-0.68**	0.27	2.34
吴县东山	-0.16	-0.41*	-5.54*	-0.12	0.44*	3.56*	-0.13	0.32	2.11
上海	-0.59*	-0.62**	-4.62**	-0.49**	-0.43*	-1.73*	-0.69**	-0.78**	-3.63**
杭州	-0.40*	0.29	3.11	-0.37	-0.29	-1.81	-0.43*	-0.22	-1.21
平湖	0.04	0.44*	3.08	0.01	-0.32*	-1.20	-0.03	-0.35	-1.46
太湖流域	-0.60**	-0.12	-2.09	-0.55**	0.13	1.12	-0.61**	-0.10	0.98

注: * 表示通过置信水平为 0.05 的显著性检验, ** 表示通过置信水平为 0.01 的显著性检验。下同。

由于太湖流域降水量较高,从表 3 可以看出年降水总量与 NDVI 之间的相关性不显著,其相关系数仅为 0.23。这是由于水在植物养分输送中起着重要的作用,在较为干旱地区,植被的生长与降水量的多少往往呈现显著正相关,但是在降水量充足的地区,情况则会不同,这可能是由于这些地区降水量较高,对于植被的生长水分已经相对充足,而过多的降水使得云量增加,从而减少了光照。这对于植被的光合作用不利,对植被的生长有着负面影响。

通过表 3 可知太湖流域平均相对湿度与 NDVI 的变化有着显著的正相关关系,其 Pearson 相关系数达到 0.59,偏相关系数达到 0.74,且均通过了置信水平为 0.01 的显著性检验。其中溧阳以及平湖地区平均相对湿度与 NDVI 的相关性最为显著,其 Pearson 相关系数分别为 0.61、0.42,分别通过了置信水平为 0.01 以及 0.05 的显著性检验;其余地区均没有通过显著性检验。

由表 3 可知,太湖流域 NDVI 变化与日照时数呈显著正相关关系, Pearson 相关系数为 0.49,通过了置信水平为 0.05 的显著性检验,偏相关系数为 0.67,通过了置信水平为 0.01 的显著性检验。其中杭州地区日照时数与 NDVI 相关性最显著,其 Pearson 相关系数为 0.55,偏相关系数为 0.47,分别通过了置信水平为 0.01 和 0.05 的显著性检验;溧阳地区日照总数与 NDVI 也呈现较为显著的相关性,其 Pearson 相关系数为 0.44,通过了置信水平为 0.05 的显著性检验。

表 3 太湖流域年平均 NDVI 与降水总量、平均相对湿度、日照时数相关关系

Table 3 Correlation of precipitation, relative humidity as well as sunshine duration and NDVI in Taihu Basin

地区	降水总量			平均相对湿度			日照时数		
	Pearson 相关	偏相关	通径系数	Pearson 相关	偏相关	通径系数	Pearson 相关	偏相关	通径系数
常州	0.06	-0.16	-0.16	-0.15	0.12	0.11	-0.15	0.34	0.43
溧阳	0.25	-0.33	-0.41	0.61**	0.44	0.52	0.44*	0.07	0.07
吴县东山	-0.05	-0.06	-0.07	0.19	0.16	0.19	0.22	0.07	0.07
上海	0.03	0.48	0.30	0.22	0.23	0.68	0.31	0.16	0.08
杭州	-0.08	-0.03	-0.02	0.12	0.06	0.08	0.55**	0.47*	0.56*
平湖	0.49*	0.28	1.21	0.42*	0.44	0.63	0.12	0.22	0.21
太湖流域	0.23	-0.25	-0.20	0.59**	0.74**	1.09**	0.49*	0.67**	0.72**

3.2 土地利用变化与气候因子的响应关系

表4是以城市化进程迅速的上海地区以及进程较为缓慢的嘉兴平湖地区进行比较,分析了两个地区20世纪60—70年代、近20 a各气候因子均值的差值,以及各气候因子变化率差值,归纳下垫面的变化对于各气候因子的影响如下:

从表4可以看出,20世纪60—70年代上海地区平均和最低气温总体要低于平湖地区,其差值分别为0.06℃和0.13℃,上海地区最高气温要高于平湖地区,其差值为0.17℃;但近20 a上海地区平均和最低气温远高于平湖地区,其差值分别达到0.58、1.10℃,最高气温高出平湖地区0.17℃;并且上海地区平均和最低增温速率高于平湖地区0.12℃/10 a、0.23℃/10 a。这是由于城镇用地因直接接收太阳辐射,气温较高,同时由于地表面平整,吸热和放热均比较迅速,气温变化相对激烈^[24-27]。由表1可知,上海地区城镇用地增加面积明显高于平湖地区,特别是近20 a上海地区城镇用地增加速率更为迅速,促使了上海的气温升高速率远高于平湖地区的增温速率。

根据表4可知,上海地区平均相对湿度降幅明显大于平湖地区,并且平均相对湿度的差异正在不断扩大。20世纪六七十年代两地平均相对湿度差异为3.37%,近20 a扩大到5.35%,并且上海地区平均相对湿度下降速率比平湖地区要高出0.38%/10 a。由于草地、林地的蒸散量最大,增湿效应明显;城镇用地蒸散量最小,增湿效应较差,表现为干化特点;耕地的蒸散量介于这两者之间^[25]。由表1可知,虽然上海地区林地增加面积大于平湖地区,草地增加面积与平湖地区相差不明显,但是其耕地减少面积以及城镇用地增加面积要远大于平湖地区,促使上海地区大气相对湿度降低速率高于平湖地区。

由表4可以看出,20世纪60—70年代上海与平湖降水差异并不明显,而近20 a上海地区降水量显著小于平湖地区,并且上海地区降水量增幅小于平湖地区17.63 mm/10 a。根据气象数据分析,近20 a以来上海、苏州等城镇面积增长较快的地区其降水量比太湖流域平均降水量低32.24~40.74 mm;杭州以及嘉兴地区由于城镇面积扩张较小,其降水量高于太湖流域平均降水量61.42~220.85 mm。

城市化发展引起的气溶胶增加还对日照时数的变化有着一定的影响^[28]。根据表4可知,上海地区日照时数降幅明显高于平湖地区,其变化率差值为28.09 h/10 a,20世纪60—70年代平湖地区日照时数略高于上海地区,而近20 a两地日照时数的差距已经扩大到214.71 h。

总体上来看,城市化进程迅速的地区相较于城市化缓慢的地区,其增温更快、相对湿度降幅更大、降水量增加更为缓慢,日照时数减少越快。

表4 上海、平湖各气候因子差值、变化率差值

Table 4 The difference of each climate factor and change rate between Shanghai and Pinghu

	气温			平均相对湿度	降水总量	日照时数
	平均	最高	最低			
20世纪60—70年代	-0.06℃	0.17℃	-0.13℃	-3.37%	-1.99 mm	-68.62 h
近20 a	0.58℃	0.17℃	1.10℃	-5.35%	-93.67 mm	-214.71 h
变化率差值	0.12℃/10 a	0.00℃/10 a	0.23℃/10 a	-0.38%/10 a	-17.63 mm/10 a	-28.09 h/10 a

4 结论

(1) 近30 a太湖流域NDVI总体呈现下降趋势,其下降速率为-0.02/10 a。其中上

海、常州地区 NDVI 下降最为显著,其下降速率为 0.02~0.05/10 a。太湖流域浙江省地区, NDVI 变化并不显著,只呈现出微弱的下降趋势,下降速率保持在 -0.004~-0.002/10 a。

(2) 近 30 a 太湖流域耕地面积显著减少,城镇面积显著增加,林地以及草地也呈现增加的趋势。其中上海、苏州城市化最为显著,常州、无锡其次,杭州、湖州以及嘉兴城市化进程较缓慢。

(3) 在全球变暖的背景下和人类活动的耦合作用下,近 50 a 太湖流域的气温呈现出显著的上升趋势,降水总量也表现出上升的趋势,平均相对湿度和日照时数呈现出下降的趋势;并且在近 20 a 太湖流域各个地区气温增长率不断加快,降水量、平均相对湿度和日照时数均呈下降趋势。

(4) 与太湖流域 NDVI 变化响应最为显著的气候因子为气温,其中气温的变化对 NDVI 的响应最为显著,其相关系数达到 -0.55~-0.61,相关性显著($P < 0.01$);平均相对湿度、日照时数对太湖流域 NDVI 变化的响应也较显著,其相关系数分别为 0.59($P < 0.01$)、0.49($P < 0.05$);太湖流域降水总量与 NDVI 的相关性比较弱,相关系数为 0.23($P > 0.05$)。

(5) 以上海为代表的城市化较为迅速的区域与城市化较为缓慢的地区相比,气候因子受下垫面影响更为显著,其气温上升更快,平均相对湿度降低更快,降水量更少,日照时数减少趋势加快。

参考文献(References):

- [1] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵小流域生态用水试验研究——气候和土地利用变化的影响[J]. 水科学进展,2006,17(1): 14-19. [HUANG Yi-long, CHEN Li-ding, FU Bo-jie, et al. Experimental study on ecological water use in a gully catchment of the loess plateau: Effects of climate and land use change. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 14-19.]
- [2] 杨续超,张镔铨,刘林山,等. 中国地表气温变化对土地利用/覆被类型的敏感性[J]. 中国科学 D 辑,2009,39(5): 638-646. [YANG Xu-chao, ZHANG Yi-lian, LIU Lin-shan, et al. Sensitivity of surface air temperature change to land types in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 39(5): 638-646.]
- [3] 周淑贞. 上海城市发展对气温的影响[J]. 地理学报,1983,38(4): 397-405. [ZHOU Shu-zhen. The influence of Shanghai urban development on temperature. *Acta Geographica Sinica*, 1983, 38(4): 397-405.]
- [4] 刘娇妹,杨志峰. 北京市冬季不同景观下垫面温湿度变化特征[J]. 生态学报,2009,29(6): 3241-3252. [LIU Jiao-mei, YANG Zhi-feng. Dynamics of temperature and humidity in underlying surface of different landscape type in winter in Beijing City, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3241-3252.]
- [5] Jusuf S K, Wong N H, Hagen E, et al. The influence of land use on the urban heat island in Singapore [J]. *Habitat International*, 2007(31): 232-242.]
- [6] Weiss J L, Gutzler D S, Allred Coonrod J E, et al. Seasonal and inter-annual relationships between vegetation and climate in central New Mexico [J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 507-534.
- [7] Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo J M. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across northern Patagonia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(8): 745-753.
- [8] 宋怡,马明国. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系[J]. 遥感学报,2008,12(3): 499-505. [SONG Yi, MA Ming-guo. Variation of AVHRR NDVI and its relationship with climate in Chinese arid and cold regions. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 499-505.]
- [9] 丁明军,张镔铨,刘林山,等. 1982—2009 年青藏高原草地覆盖度时空变化特征[J]. 自然资源学报,2010,25(12): 2114-2122. [DING Ming-jun, ZHANG Yi-lian, LIU Lin-shan, et al. Temporal and spatial distribution of grassland coverage change in Tibetan Plateau since 1982. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(12): 2114-2122.]
- [10] Chen X Q, Tan Z J, Schwartz M D, et al. Determining the growing season of land vegetation on the basis of plant phenology and satellite data in Northern China [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2004, 44: 97-101.

- [11] 刘高焕,刘庆生,叶庆华,等. 黄河三角洲土地利用动态监测与海岸带综合管理[J]. 资源科学,2006,28(5): 171-175. [LIU Gao-huan, LIU Qing-sheng, YE Qing-hua, et al. Monitoring ecosystem change and land resources utilization in the Yellow River Delta. *Resources Science*, 2006, 28(5): 171-175.]
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社,1999: 62-76. [WEI Feng-ying. *Statistic Diagnose and Foreshadow Technology in Present Climate*. Beijing: Meteorological Press, 1999: 62-79.]
- [13] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan [J]. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, 2002, 20(2): 11-26.
- [14] Ercan K, Serdar K. Trend analysis of stream flow in Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 289: 128-144.
- [15] 姜彤,苏布达,王艳君,等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展,2005,1(2): 65-68. [JIANG Tong, SU Bu-da, WANG Yan-jun, et al. Trends of temperature, precipitation and runoff in the Yangtze River Basin from 1961 to 2000. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(2): 65-68.]
- [16] IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability [M]. Summary for Policymakers. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2001.
- [17] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report(AR4) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [18] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Oslo: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [19] 林学椿,于淑秋,唐国利. 中国近百年温度序列[J]. 大气科学,1995,19(5): 525-534. [LIN Xue-chun, YU Shu-qiu, TANG Guo-li. Series of average air temperature over China for the last 100-year period. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, 19(5): 525-534.]
- [20] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京: 科学出版社,2002: 2-10. [QIN Da-he. *Colligate Report of Assessment in Environment Evolvement of West at China*. Beijing: Science Press, 2002: 2-10.]
- [21] 闫冠华,李巧萍,邢超. 不同温室气体排放情景下未来中国地面气温变化特征[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版,2011,3(1): 36-46. [YAN Guan-hua, LI Qiao-ping, XING Chao. Future surface air temperature changes in China under different greenhouse gas emission scenarios. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition*, 2011, 3(1): 36-46.]
- [22] 黄俊雄,徐宗学. 太湖流域 1954-2006 年气候变化及其演变趋势[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(1): 33-40. [HUANG Jun-xiong, XU Zong-xue. Spatial-temporal characteristics of long-term trends for climate change in the TAIHU Basin during 1954 to 2006. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(1): 33-40.]
- [23] 陈碧辉,张平,郝克俊,等. 近 50 年成都市日照时数变化规律[J]. 气象科技,2008,36(6): 84-87. [CHEN Bi-hui, ZHANG Ping, HAO Ke-jun, et al. Variation characteristics of sunshine duration in Chengdu in recent 50 years. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(6): 84-87.]
- [24] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004,23(2): 238-244. [ZUO Hong-chao, LÜ Shi-hua, HU Yin-qiao. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 238-244.]
- [25] 朱西存,赵庚星. 局地不同下垫面对气象要素的影响及其气候效应[J]. 中国农业生态学报,2009,17(4): 760-764. [ZHU Xi-cun, ZHAO Geng-xing. Local influence of underlying surface on meteorological elements and associated climatic effect. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 760-764.]
- [26] 王连喜,闵庆文,李凤霞,等. 宁夏南部山区不同下垫面的小气候特征分析[J]. 资源科学,2005,27(4): 18-21. [WANG Lian-xi, MING Qing-wen, LI Feng-xia, et al. Microclimatic characteristics of different underlying surfaces in South Ningxia mountains. *Resources Science*, 2005, 27(4): 18-21.]
- [27] 娄德君,李治民,孙卫国. 夏季不同下垫面气象要素的对比分析[J]. 气象科技,2006,34(2): 166-169. [LOU De-jun, LI Zhi-ming, SUN Wei-guo. Contrast analysis of meteorological factors at different underlying surfaces in summer. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(2): 166-169.]
- [28] 龙红,谢国清,李蒙,等. 近 46 年来昆明市日照变化特征分析[J]. 云南地理环境研究,2009,21(4): 101-105. [LONG Hong, XIE Guo-qing, LI Meng, et al. The analysis of variation characteristics of sunshine in the recent 46 years in Kunming. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2009, 21(4): 101-105.]

The Response Relationship between Underlying Surface Changing and Climate Change in the Taihu Basin

JI Di^{1 2}, ZHANG Hui^{2 3}, SHEN Wei-shou², WANG Qiao^{3 4}, LI Hai-dong², LIN Nai-feng^{1 2}

(1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 3. School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 4. China Center of Environmental Satellite Data and Application, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the long-term vegetation index dataset of China-Pathfinder AVHRR NDVI (the data produced through funding from the Earth Observing System Pathfinder Program of NASA's Mission to Planet Earth in cooperation with National Oceanic and Atmospheric Administration, and were provided by EOSDIS, distributed Active Archive Center at Goddard Space Flight Center which archives, manages, and distributes this data set), long-term vegetation index dataset of China-SPOT VEGETATION NDVI (source for this dataset was VITO), the change of land use data which was analyzed by using the data of remote sensing image, including the interpretation of Multispectral Scanner (MSS) images in 1979, Thematic Mapper (TM) images in 1984, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM) images in 2000 and HJ-1 images in 2009, in combination with the meteorological data gathered from six weather stations in Taihu Basin, variation of vegetation in Taihu Basin and its NDVI in the period of 1956-2007, as well as their relations with major climate factors (temperature, relative humidity, precipitation, sunshine duration) were analyzed. The results show that: 1) The annual mean NDVI in Taihu Basin demonstrated a decreasing trend during the 26 years, with an increase rate of $-0.02/10$ a. The most significant NDVI decrease occurred in Changzhou area and Shanghai. It remarkably decreased by -0.017 to $-0.049/10$ a in those two areas. 2) The cultivated area shows significant reducing trend and the urban area shows significant increasing trend, and area of forest land, grassland and water area shows a slow increasing trend during the recent 30 years. 3) Because of the global warming and the increasingly rapid urbanization process, the annual mean temperature in Taihu Basin demonstrated an increasing trend during the 52 years, with a significant rising rate of 0.38 °C/10 a, which caused the precipitation demonstrating an increasing trend during the 52 years with the increase rate at 1.09 mm/10 a and also caused the average relative humidity demonstrating a declining trend that decreased at a rate of $-1.25\%/10$ a, and sunshine duration presented an decreasing trend, with the decrease rate at -56.66 h/10 a. 4) The analysis of the interrelationship between climate factor and NDVI by adopting the path coefficient shows that the temperature and the relative humidity are highly related with the NDVI ($P < 0.01$). The correlation coefficient was -0.55 to -0.61 for NDVI and temperature, and 0.59 for NDVI and relative humidity. And the sunshine duration is also related with NDVI ($P < 0.05$). The correlation coefficient was 0.49 for NDVI and the sunshine duration. However, no significant statistical relationship was found between NDVI and precipitation ($P > 0.05$). This is because there's no remarkable increasing or decreasing trend found for this climate factors. The correlation coefficient was 0.23 for NDVI and precipitation.

Key words: underlying surface changing; land use changing; NDVI; climate change; Taihu Basin