

# 江苏地表湿润状况的变化趋势与区域特征分析

康俊<sup>1</sup> 邱新法<sup>1</sup> 曾燕<sup>2</sup> 李梦洁<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室 遥感学院, 210044;  
2. 江苏省气象科学研究所)

**提 要:** 为了了解江苏省地表湿润状况,利用江苏省60个气象站1961—2005年月降水和月平均气温资料,通过构造一个既包含降水变化又考虑温度变化对潜在蒸发影响的干湿指标—地表湿润指数  $H_i = P/P_e$  ( $P$  为观测的月降水总量,  $P_e$  为月最大潜在蒸发),采用 M-K 法,对比分析了江苏省区域平均地表湿润指数的年代际变化特征及季节性差异,并讨论了它与降水和气温的联系,突出了在全球变暖背景下温度变化对干湿变化的重要影响。最后给出了地表湿润指数各季节变化趋势的地理分布。结果表明:苏北和苏南地区的年际变化趋势基本相反。由于温度的升高苏北苏中地区均出现变干趋势,苏南部分地区降水显著增加却没有呈现显著变湿趋势。江苏地区的干化趋势主要发生在春秋季节。

**关键词:** 干旱 地表湿润指数 变化趋势

## Variation Trend of Surface Humid Index and Regional Characteristics in Jiangsu Province

Kang Jun<sup>1</sup> Qiu Xinfu<sup>1</sup> Zeng Yan<sup>2</sup> Li Mengjie<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, School of Remote Sensing; Nanjing University of Information Science and Technology, 210044; 2. Jiangsu Meteorological Science Institute)

**Abstract:** In order to realize the situation of the surface humid in Jiangsu province, a dry-wet index, including the impact of both surface air temperature and precipitation on the potential evaporation, is established by using monthly mean temperature and monthly precipitation data of 60 meteorological stations in Jiangsu province from 1961—2005. The index is defined as  $H_i = P/P_e$  ( $P$  is the monthly total of precipitation,  $P_e$  is the potential evaporation from air temperature). Analysis of the index by Mann-Kendall method, the inter-annual variation, decadal variation and the seasonal differences of the surface humid index, precipitation and

temperature over Jiangsu province are analyzed. The warming impact on the surface dryness/wetness state is studied. The geographical distribution and trend of surface humid index are given in the areas. The results indicate that the inter-annual variation of surface humid index over northern Jiangsu is contrary to that of the south region of Jiangsu. There exists a relationship between the drying trend and the warming impact in north and middle part of Jiangsu province. The obvious wetting trend doesn't occur in the regions where the precipitation increases in some part of south Jiangsu. Also, the results show that the drying trend of Jiangsu province generally occurred in spring and autumn.

**Key Words:** drought surface humid index variation trend

## 引 言

目前,干旱化是危及人类生存环境的严重问题,人类可利用水资源的严重匮乏及荒漠化的加剧是干旱化发展的具体表现<sup>[1-6]</sup>。很多学者通过对降水的变化研究揭示了区域干旱的诸多事实<sup>[7-9]</sup>。在增暖的背景下,全球和区域水发生了重大调整,而温度的升高使得地表的蒸发增加,降水和地表蒸发的变化最终导致地表水分收支平衡发生变化<sup>[10]</sup>。全球性干旱的加剧引起人们的广泛关注。据测算每年因干旱造成的全球经济损失高达 60~80 亿美元,远远超过了其它气象灾害,我国也因旱灾每年损失粮食 100 亿公斤。随着社会经济的迅速发展、人口增长及由此引起的以气候变暖为标志的全球变化的发生,干旱有进一步加重的趋势,这已成为我国生态环境的严重问题<sup>[11]</sup>。因而,不得不去寻求一种较客观的指标来表征环境的干湿变化。地表湿润指数( $H$ )近年来在中国区域干湿变化的检测中得到很好的应用<sup>[12-15]</sup>。在本文中,通过分析地表湿润指数的变化,揭示了增暖背景下江苏省湿润指数的年际和年代际变化特征及季节差异。

## 1 资料与研究区

江苏省地处长江、淮河下游地区,属亚热

带湿润季风气候,地势平坦,冬夏季风长驱直入,气候很不稳定。受每年季风进退迟早、强弱不一的影响,降水和气温年际变化比较明显,在增暖和降水综合影响条件下,对地表的干湿状况有必要进行深入分析。干旱化趋势的加重会导致干旱的增加,如 1978 年全省出现春夏秋连旱,结果是河水断流,塘坝干涸,高亢区人畜饮水困难,农业生产遭受严重危害,据统计全省受旱面积  $386.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。20 世纪 90 年代以来该省又多次在不同季节发生区域型干旱,因此加强对江苏省地表湿润状况的研究,对应对旱情具有重要的指导意义。

选用江苏省范围内记录比较齐全的 60 个气象站 1961—2005 年逐月降水量和平均气温资料以及月最小蒸发皿资料,在实际应用之前,对所用的资料进行了严格的质量检测和筛选,并对其中的缺测和错误记录进行了剔除和插补。江苏省政府按照地域和经济发展区划概念将江苏省分为三个区域,苏北、苏中、苏南。其中苏北区域包括 18 个气象站点,苏中包括 28 个气象站点,苏南包括 14 个气象站点。图 1 所示为站点分布和区域划分,分区的目的就是为了更好地分析不同区域干湿变化趋势的特征和气候变率的关系。

## 2 干湿指标定义和分析方法

传统的利用降水作为干湿转化的研究对

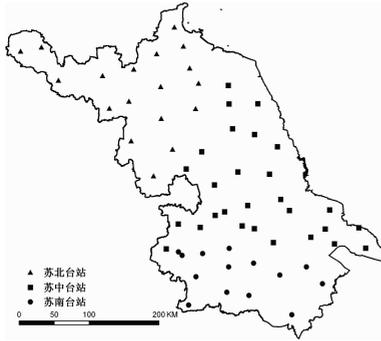


图 1 站点分布和区域划分

象在全球增暖的背景下是不完善的,必须考虑温度变化对地表水分收支的影响,只有这样才能客观地反映地表的水分状况,进而正确认识干湿的演变规律。根据文献[16],地表湿润指数的定义可写成如下形式:

$$H_i = \frac{P}{P_e} \quad (1)$$

其中  $H_i$  为地表湿润指数,  $P$  为月降水总量,  $P_e$  为最大潜在蒸发。我国各气象台站的实际蒸发是使用蒸发皿来测定的(量测仪器有 E201 和 E601 等类型),由于该仪器口径较小,且水体温度与自由水面有很大差异,因此,测定值与实际蒸发有较大的误差[17]。本文选择了用改进后的 Thomthwaite[18]方法来计算潜在蒸发量。这个方法的优点在于它仅依赖于温度变化,计算方便,所用参数少,计算的潜在蒸发量也较符合实际情况。它的计算可表示如下:

$$P_e = \begin{cases} 0 & T_i \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 16d(10T_i/D)^\alpha & 0 \text{ } ^\circ\text{C} < T_i \leq 26.5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \alpha_1 + \alpha_2 T_i + \alpha_3 T_i^2 & 26.5 \text{ } ^\circ\text{C} < T_i \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $P_e$  为最大潜在蒸发(mm),  $T_i$  为月平均温度( $^\circ\text{C}$ ),  $d$  为每月天数除以 30,  $\alpha = 0.49239 + 1.792 \times 10^{-2} I - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 6.75 \times 10^{-7} I^3$ ,  $I = I \sum_{i=1}^{12} i$  为年总加热指数,  $i = |\frac{T_m}{5}|^{1.514}$  为月平均加热指数。  $\alpha_1 =$

$-415.8547, \alpha_2 = 32.2441, \alpha_3 = -0.4325$ 。从式中可以计算月最大潜在蒸发。可以看出:当温度在  $0^\circ\text{C}$  以下时,最大潜在蒸发为零。年潜在蒸发总量  $P_e = \sum_{i=1}^{12} P_{ei}$ 。通过计算得到  $P_e$  的逐年区域平均值与江苏省最小蒸发皿观测数据的逐年区域平均值的相关系数为 0.471,并通过了 99% 的置信度检验,具有很好的相关性。

趋势检验的方法为常用的 Mann-Kendall 方法[18](简称 M-K 法),当检验值的绝对值大于 1.29、1.96 和 2.56 时,变化趋势分别达到 90%、95% 和 99% 的信度检验被认为存在显著的变化趋势;正值表示增大趋势,反之为减小趋势。

### 3 结果分析

#### 3.1 近 45 年的干湿变化趋势

图 2 为利用 M-K 法计算的 1961—2005 年江苏省降水、气温和地表湿润指数的变化趋势。在图 2a 上,虚线区域为降水减少的地区,虚线阴影区为降水量显著减少的地区;实线区域为降水增加的区域,实线阴影区为降水显著增加的区域。在图 2b 上,实线区域为增温区域,实线阴影区为增温显著的地区(由于全球变暖,整个江苏省区域均显著增温)。图 2c 上虚线阴影区为干旱化趋势显著的地区,实线阴影区为显著变湿的地区。分析图 2a 可以发现,降水显著减少的地区分布在苏北邳县,降水显著增加的区域主要分布在苏南江浦、宜兴、昆山和启东地区,其余地区有减少或增加的趋势,但变化均不显著,在近 45 年来江苏省降水主要为苏北苏中为减少趋势,苏南地区为增加趋势。

从图 2b 分析可知,整个江苏省都处于显著增温区且通过了 95% 的显著性检验。但是,无法从图 2a、b 上判断江苏省苏北、苏中

和苏南三个地区的干湿趋势,这是因为温度升高导致蒸发量增大,蒸发增大将减少地表的水分(与降水量对地表贡献相反)。所以,无法用降水量的变化来判断其干湿趋势,这正是引入干湿指标的目的。从图 2c 可以看出,尽管苏南部分地区出现了降水量显著增加,由于受增暖的影响,但并不存在显著变湿趋势,反而变干趋势的地理范围扩大了。通过分析还可以发现,苏中,苏北的大部分区域明显变干,干旱化趋势最显著的地区在苏北

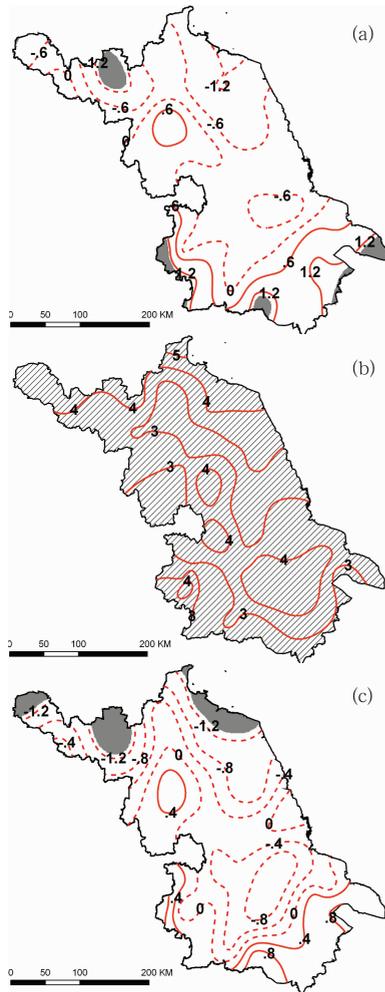


图 2 1961—2005 年江苏省降水(a)、气温(b)和干湿指标(c)的变化趋势(M-K 法)分布 阴影区为超过 90% 信度检验的地区

地区,与增暖最强烈的地区对应,这是温度变化对干湿变化影响的一个有力证据,说明在近 45 年,江苏南部地区尽管降水增加了,但由于温度升高所导致的蒸发力增加量抵消了降水的增加量。在 45 年来大部分地区表现为一个干旱化的趋势,并且苏北部分地区干旱化趋势明显,由此可见,温度变化在干湿变化趋势所起的重要作用。

为了更充分地说明温度变化对干湿变化的影响,把苏南地区作为一个典型个例进行探讨。图 3 给出了苏南地区区域平均干湿指标  $H_i$  和降水  $P$  的年变化曲线及其各自的线性趋势(其中粗黑色趋势线为降水趋势线,虚线趋势线为地表干湿趋势线)。可以看出,降水的线性趋势是显著增加的,而干湿指标的趋势变化不太明显,两条曲线的线性趋势可以看出降水在对干湿变化的影响较小。这充分说明温度变化在分析干湿变化中的重要性。

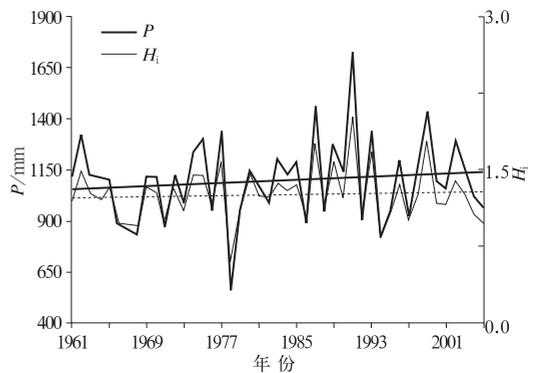


图 3 苏南区域平均降水和干湿指标线性变化趋势的比较

### 3.2 区域地表湿润指数的年际及年代特征

为了比较江苏省内各区域之间的特征差异,对不同区域站点分别进行区域平均,对区域总体特征进行分析,认识不同区域干、湿变化趋势区域差异。图 4 为苏北、苏中、苏南的区域平均地表湿润指数的 10 年滑动平均曲

线及 Mann-Kendall 法对地表湿润指数 10 年和气温 10 年滑动平均变化的趋势分析。图 4 中上图为 10 年滑动平均, 下图为 M-K 方法检验结果。

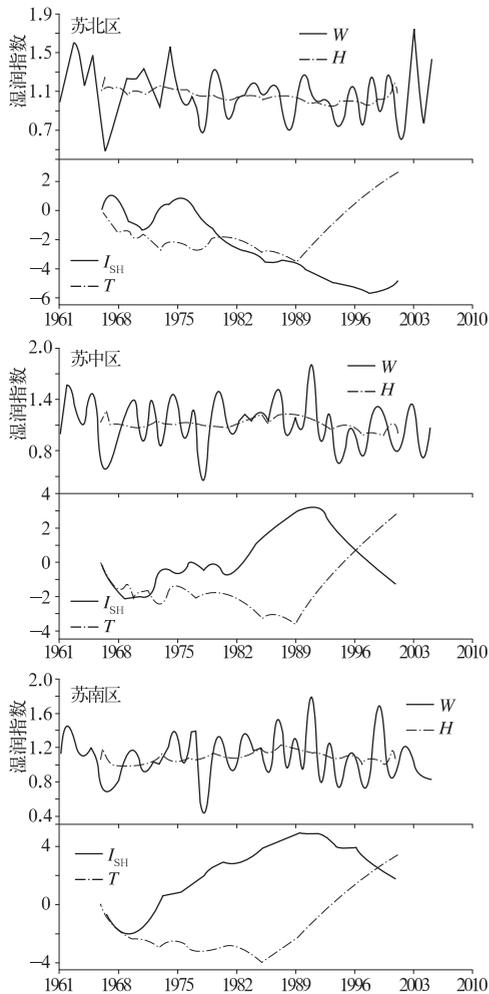


图 4 各地区区域平均地表湿润指数、气温的变化趋势及趋势检验  
( $W$  表示未滑动,  $H$  表示 10 年滑动,  $I_{SH}$  为地表湿润指数 10 年滑动后趋势检验,  $T$  为温度 10 年滑动后趋势检验)

由图 4 可以看出苏北地区地表湿润指数从 20 世纪 60 年代以后总趋势为减小(地表变干),一直到 1980 年代初以后湿润指数呈现显著的减少趋势且达到 95% 的显著性检

验(对应于 M-K 法检验结果图中曲线的纵轴的绝对值大于 2);对应气温在 1980 年代末以后显著增温,增温趋势达到 95% 的显著性检验,且苏北降水近 45 年来呈下降趋势。由此看来,当前苏北干旱化的趋势具有暖干的特征,降水减少,区域增温是干旱化的主要原因。苏中地区在 1960 年代到 1990 年代初湿润指数是一个增加的时段(地表变湿),之后显著减少趋势且达到 90% 的显著性检验,与苏南地区相比较苏中地区的地表湿润指数变化趋势较快,而苏南地区的变化平缓;苏南地区湿润指数总体呈现上升趋势且达到 90% 的显著性检验,但是在 1990 年代后呈现下降趋势这与 1990 年代后苏南地区降水显著减少以及显著增温的趋势相对应,苏南地区正处于一个暖湿的时段。归纳以上结果认为,苏北和苏南地区的年际变化趋势基本相反,前者为变干趋势,后者为变湿趋势。1990 年代后苏南地区干旱化的趋势与苏南地区的区域增暖有关,而干旱化将进一步使得气温上升,不断加剧干旱化的发展。

### 3.3 年代际变化趋势

把 1961—2000 年的年均值或年总量每 10 年进行算数平均,每个值就代表它所在的年代,由于资料的时间限制用 2001—2005 年的算术平均表示 2010 年代。多年平均值用 1961—2005 年的气候平均值。表 1 中距平为三个地区不同年代的平均值与各地区多年气候平均值的差值,借此来研究地表湿润状况的年代变化及其与降水、气温的可能联系。

由表 1 可知,苏北地区 1960、1970 年代的地表湿润指数均为正的距平,是近 45 年来最湿润的年代。而 1980、1990 年代后该地区地表示湿润指数转为负距平,说明地表逐渐变干,原因是温度的升高,降水也减少了。苏中和苏南地区的地表干湿状况却明显不同,1960、1970 年代地表湿润指数为负,而

表 1 1961—2005 年各年代地表湿润指数、降水和温度的距平(降水/mm 气温/°C)

年代	苏北			苏中			苏南		
	湿润指数	降水	气温	湿润指数	降水	气温	湿润指数	降水	气温
1960	0.02	19.9	-0.25	-0.01	-2.38	-0.25	-0.05	-38.98	-0.2
1970	0.04	12.1	-0.24	-0.01	-38.25	-0.29	-0.03	-51.84	-0.34
1980	-0.03	-44.09	-0.23	0.06	29.95	-0.27	0.06	30.76	-0.3
1990	-0.04	-9	0.37	0.01	24.42	0.38	0.06	59.75	-0.36
2001—2005	0.02	42.16	0.70	-0.1	-33.73	0.83	-0.08	-1.29	0.96

1980、1990 年代转为正距平,说明地表转为一个相对湿润的时期,地表的湿润趋势(正距平)对应着降水的增加和气温的降低,苏中和苏南在 1980、1990 年代正处在一个湿润阶段。2010 年代期间由于受温度升高影响,苏南苏中地区湿润指数明显降低。这些结果表明,地表湿润指数能很好地表示这种复杂关系。

### 3.4 年代际变化趋势的季节特征

地表湿润指数基本反映了江苏省年地表湿润状况的变化特征。但是地表湿润指数是否存在年际特征的季节性差异有必要进一步研究。

图 5 给出了四季江苏区域平均地表湿润指数及气温 10 年滑动平均的距平分布,由图

可得以下事实:气温,江苏省四季温度从 1990 年代以后呈现明显的上升趋势,并且都表现出 15 年的周期性变化,其中秋季气温周期变化比较明显。

湿润指数,冬季的温度一般都在 0°C 左右,这个时期地表的蒸发量相对来说比较少,地表处于一个相对比较湿润的状况。分析降水和温度发现,虽然冬季降水处于增加趋势,但是由于气温在 1990 年代后出现了增加趋势,地表湿润指数也急剧下降。春季地表湿润指数出现了 10 年的周期变化,夏季地表湿润指数出现了 20 年左右周期变化,并且近 20 年来出现正距平,这与江苏地区夏季降水多,有很大关系。秋季,1990 年代后地表湿润指数下降,与温度的升高对应。

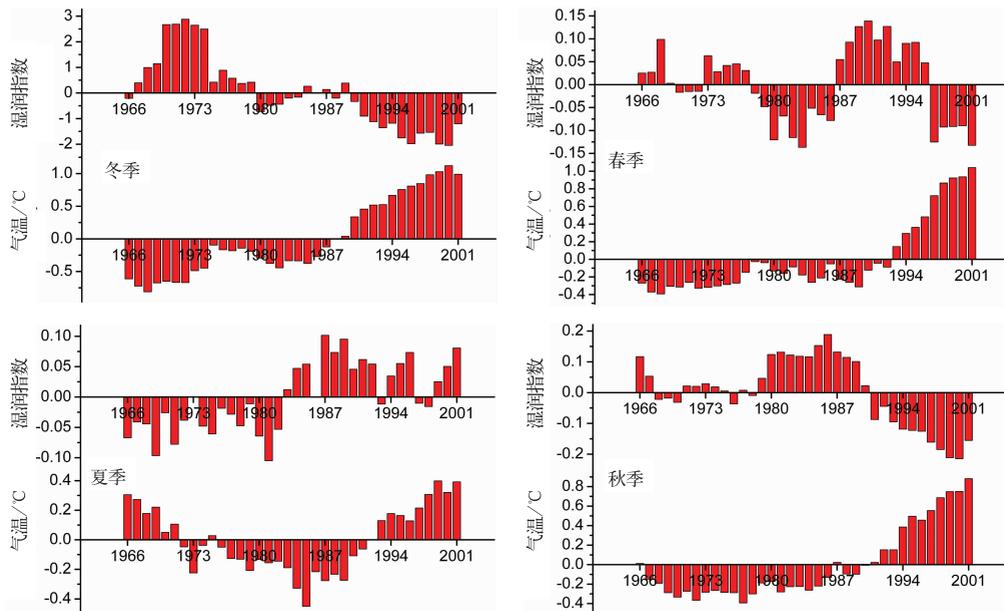


图 5 江苏省各季地表湿润指数、气温的距平

地表湿润状况趋势的地理分布也存在着季节性差异。图 6 是利用 M-K 法所分析的不同季节地表湿润指数的变化趋势,实线是变湿趋势,虚线是变干趋势,其中阴影部分表

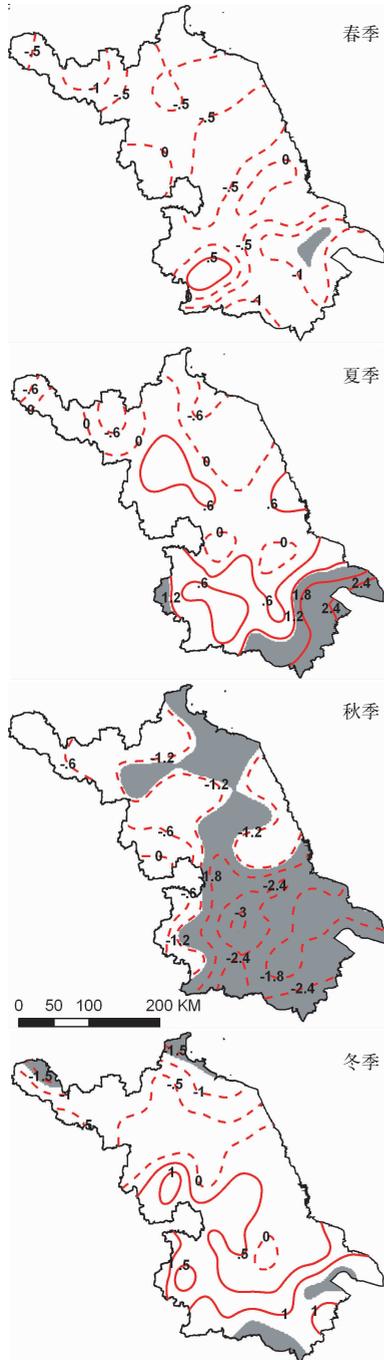


图 6 江苏省四季干湿指标的变化趋势分析图

示显著趋势(置信度超过 90% 检验)。由图 6 可以看出春季和秋季绝大部分地区干湿趋势减少,且秋季大部分地区都有显著性减少趋势,夏季苏南大部分地区呈现显著变湿趋势。可以说,江苏省的干旱化趋势存在着季节和地域上的差异,江苏省的干化趋势主要发生在春秋季节。

#### 4 结语

以上分析表明,地表湿润指数是一个理想的能够表征地表干湿状况的物理量,它的物理基础在于体现了两个最重要的地表水分收支分量:大气的降水和最大潜在蒸发,而这两个量正是地表热能和水分变化的关键参量<sup>[19]</sup>。通过分析近 45 年来江苏省的区域平均及四季的干湿指标变化,可以得出以下几条结论:

(1) 地表湿润指数的结果分析表明,近 45 年来苏北、苏中和苏南的地表湿润状况的年代际变化存在着差异。苏北和苏中地区降水趋势减少,苏南地区降水趋势增多,只有部分地区存在显著趋势。由于受温度升高的影响,苏北地区显著变干的范围扩大,苏南地区则没有显著变湿区域。这说明了温度变化在干湿变化趋势所起的重要作用。

(2) 地表湿润指数的四季变化趋势的空间分布表明,江苏省的干化趋势存在季节和地域差异。江苏省的干化趋势主要发生在春秋季节,且苏南地区表现出向干旱化发展的趋势。

土壤湿度是表征地表干湿变化的客观指标,但是由于缺乏长时间大范围的观测数据,用土壤湿度进行干湿变化的分析具有局限性<sup>[20]</sup>。所以建立干湿指标不失为一种理想的途径。由于所建立的地表湿润指数是从地表水分收支平衡出发,所以对潜在蒸发的计算还需要进一步的验证,但从分析结果来看,

该指标的建立对单纯用降水量变化分析干湿变化有较大的改善。如果能考虑地表径流的影响,综合用(降水量—地表径流量)替代单纯降水量作为水份收入项,效果可能更好,因为地表径流量对水份收入的影响很大。由于地表径流量资料不易取得,将有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] 翟盘茂,任福民,张强. 中国降水极值变化趋势检测[J]. 气象学报,1999,57(2):208-206.
- [2] 秦大河. 中国西部环境演变评估[M]. 北京:科学出版社,2002,(55):29-70.
- [3] 马柱国,符淙斌. 中国北方干旱区地表示润状况的趋势分析[J]. 气象学报,2001,59(6):737-746.
- [4] 李庆祥,刘小宁,李小泉. 近半世纪华北干旱化趋势研究[J]. 自然灾害学报,2002,11(3):50-56.
- [5] 王位泰. 陇东黄土高原春末夏初旱的气候特征及预测模型[J]. 气象,2003,29(9):34-36.
- [6] 高歌,李维京,张强. 华北地区气候变化对水资源的影响及2003年水资源评估[J]. 气象,2003,29(8):26-30.
- [7] Nicholson S E. Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries[J]. Clim Res, 2001,17:123-144.
- [8] Dai A G, Trenberth K T, Qian T T. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. J Hydrometeorol, 2004,5:1117-1130.
- [9] 张庆云,卫捷,陶诗言. 近50年中国气候的干湿变化[J]. 大气科学,1991,15(5):72-81.
- [10] 马柱国,黄刚,甘文强,等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学,2005,29(5):671-681.
- [11] 秦大河,丁一汇,王绍武,等. 中国西部环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展,2002,17(3):314-319.
- [12] Ma Z G, Fu C B. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China[J]. Global and Planetary Change,2003,37:189-200.
- [13] 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J]. 地球物理学报,2005,48(5):1011-1018.
- [14] 郭维栋,马柱国,姚永红. 近50年中国北方土壤湿度的区域演变特征[J]. 地理学报,2003,58(增刊):83-90.
- [15] 郑广芬,陈晓光,赵光平,等. 宁夏地表湿润状况及极端干湿事件演变规律[J]. 中国沙漠,2007,27(2):326-330.
- [16] 马柱国. 中国东部土壤湿度和区域气候变化的关系及一个土壤湿度反演模式的建立[学位论文]. 北京:中国科学院大气物理研究所,1999.
- [17] 傅志伟. E601型蒸发量大于小型蒸发量原因之浅析[J]. 气象,2001,27(11),55-56.
- [18] Thomthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geogr. Rev,1948,38:55-94.
- [19] Manabe S. Summer. Dryness due to an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration[J]. Climate Change, 1981,3:347-386.
- [20] 马柱国,魏和林,符淙斌. 中国东北部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J]. 气象学报,2000,58(3):278-287.