

中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析^①

马柱国 符淙斌

(中国科学院大气物理研究所全球变化东亚研究中心, 北京, 100029)

摘 要

利用 1951~1997 年中国 160 站月降水和平均气温资料, 通过计算的地表湿润指数 $H_i = \frac{P}{P_e}$ (P 为观测的月降水总量, P_e 为月最大潜在蒸发), 对比分析了中国华北、西北两个典型干旱区区域平均地表湿润指数的年代年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。最后, 给出了地表湿润指数年及各季节变化趋势的地理分布。研究表明: 西北西部和华北地区的年际及年代际变化趋势基本相反, 前者地表为变湿趋势, 后者为变干趋势。华北地区的干化趋势主要发生在夏秋季节, 而西北除东部的秋季和西部的夏季外, 其它季节均存在变湿趋势。

关键词: 干旱, 地表湿润指数, 气候变化。

1 引 言

当前, 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、沙漠化的加剧是干旱化发展的具体表现。气象学的传统观念认为, 干旱化的典型特征应是降水减少。实际上, 降水减少仅是干旱化可能发生的一个方面, 从干旱化的具体表现可以发现, 干旱化的指标应是能够衡量地表水分收支大小, 并渗透了多学科研究的综合参量。最近部分研究的结果在表示这种干旱化的整体特征方面进行了尝试^[1]。在本文研究中, 我们定义了一个能够表征地表干湿状况的物理量——地表湿润指数, 据此分析了中国两个典型干旱区湿润指数的年际和年代际变化特征及季节差异。

中国北方干旱化问题一直是气象界和其它学科的一个重要研究课题, 特别是对华北、西北两个典型干旱区的研究更加关注。有关的研究集中在两个方面, 一个方面是对干旱区气候要素时空变化规律的分析^[2~4], 这些研究指出华北旱涝变化的规律、干旱异常的地域特征及华北降水年代际振荡及其与全球温度变化的联系; 另一个方面就是最近有关华北干旱化趋势及其对水资源影响的研究^[5]。这些工作的特色是考虑了蒸发及其它地表水分收支变化特征, 揭示了华北干旱化的特征及对水资源影响的一些事实。本文在以上研究的

① 初稿时间: 2000 年 3 月 24 日; 修改稿时间: 2000 年 12 月 11 日。

资助课题: 国家重点基础研究专项经费资助项目(G19990433400) 和中国科学院创新重大项目“西部生态环境变化规律与水土资源可持续利用研究(KZCX1-10-07)”

基础上,提出了地表湿润指数的概念,据此对两个典型干旱区地表干湿状况年际、年代际变化特征的差异、发生的季节性、及干旱化发展趋势展开研究。

2 资料及地表湿润指数的定义

采用中国气象局整编的 1951~1997 年中国 160 站的月降水和月平均气温资料。根据文献[6],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, 它的计算可表示如下^[6]:

$$P_e = \begin{cases} 0 & T \leq 0 \\ 1.6d(10T/I)^a & 0 < T < 26.5 \\ a_1 + a_2T + a_3T^2 & T \geq 26.5 \end{cases} \quad (2)$$

其中: P_e 为最大潜在蒸发(cm), T 为月平均温度(°C), d 为每月天数除以 30, $a = 0.49239 + 1.792 \times 10^{-2}I - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 6.75 \times 10^{-7}I^3$, $I = \sum_{i=1}^{12} i$ 年总加热指数, $i = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1.514}$ 为月平均加热指数。从式(2)可以计算月最大潜在蒸发。可以看出:当温度在零度以下时,最大潜在蒸发为零。在这种条件下,可以近似地用降水表示北方冬季地表的湿润状况。

本文华北区的界定范围为 35~42°N, 110°E 以东的中国地区;依据西北地区特殊的地域特征及气候变化特征的区域性,把西北地区可分为两个分区,一个为 35°N 以北、95°E 以西中国境内地区;另一个为 35°N, 95~105°E 之间的中国境内地区。为了方便,前者在下文称为西北 1 区,后者称为西北 2 区。在研究区域内,华北共包含 24 个测站,西北 1 区为 13 个测站,西北 2 区共有 6 个测站,图 1 给出了研究区域的范围和站点的分布。

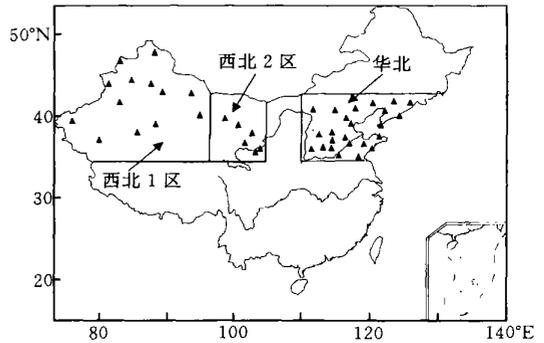


图 1 分区和站点分布

3 干旱区年际及年代际特征及差异

为了比较区域之间的特征差异,对不同区域站点分别进行区域平均,分析的重点放在对区域总体特征的认识上。

3.1 汛期地表湿润指数的年际特征

北方地区的降水绝大部分产生在汛期(本文指 4~9 月),汛期基本能代表年地表干湿状况。因此,首先从汛期时段的特征认识不同干旱区干、湿变化趋势的某些事实及区域差异。图 2 为不同区域的区域平均地表湿润指数的 10 a 滑动平均曲线及 Mann-Kendall 法^[7](简称 M-K 法)对地表湿润指数和气温 10 a 滑动平均变化的趋势分析。由图可以看出,华北地区地表湿润指数从 20 世纪 50 年代开始总趋势为减小(地表变干),70 年代初期到中期湿润指数有一个增加的时段,70 年代以后湿润指数呈现显著的减小趋势且达到

95% 的显著性检验(图中的曲线的纵轴的绝对值大于 2); 对应气温在 70 年代末以后显著增温, 增温趋势达到 95% 的信度检验。对比分析地表湿润指数和气温的关系可发现, 两者基本为反位相关系, 降水在 70 年代中期以后为负的距平。由此看来, 当前华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。西北 1 区在 20 世纪 80 年代以后尽管湿润指数有增加的趋势, 但这种增加趋势并不显著(未通过 95% 的信度检验), 西北 2 区 70 年代与 80 年代之间为一增湿的时段, 80 年代以后湿润指数明显减小; 西北两区的气温基本都处在一个低温时段, 但西北 2 区的温度在 80 年代以后有所回升。可以说, 西北 1 区当前正处在一个冷湿时段, 而西北 2 区处在一个可能暖干的时段。归纳以上结果认为, 最近华北地区干旱化的趋势与华北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。

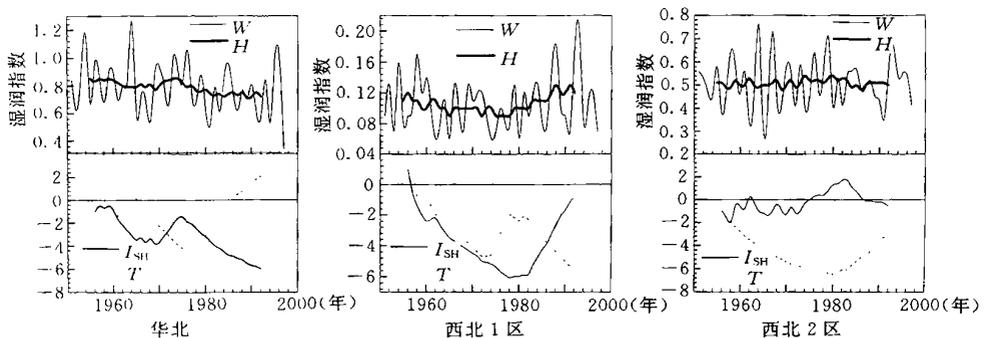


图 2 汛期各地区区域平均地表湿润指数、气温的变化及趋势检验

(a. 华北, b. 西北 1 区, c. 西北 2 区; W 表示未滑动, H 表示 10 年滑动, I_{SH} 为地表湿润指数, T 为气温)

3.2 年际变化趋势的季节特征

汛期地表湿润指数基本反映了干旱区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 3 给出了 3 个地区区域平均地表湿润指数及气温 10 a 滑动平均的距平分布, 由图可得以下事实:

冬季, 北方地区月平均温度一般都在 0 以下, 因此可以认为, 这个时期地表的蒸发近似为 0。在这种假设条件下, 冬季降水的多少可以代表地表的干湿状况。分析发现, 在西北两个分区, 冬季降水为明显的增加趋势, 但西北 1 区降水增加的趋势上叠加了一个显著的周期变化。在华北地区, 15 a 左右的周期变化比较清楚。另外, 从 20 世纪 70 年代开始的显著增温现象是 3 个区域冬季的共同特征。

春季, 无论是华北、西北 1 区还是西北 2 区, 地表基本上处于湿润时段, 特别是在西北 1 区, 20 世纪 80 年代以后地表湿润指数急剧增加。分析降水和气温发现, 西北 1 区地表变湿的原因是由于气温降低而降水增加, 西北 2 区和华北区的变湿则仅与降水的增加有关, 气温的增加对地表变湿的削弱不足以抵消降水的增加。因此, 作为地表湿润状况的表征量——地表湿润指数呈现增加趋势。从气候态来讲, 一个是冷湿, 一个为暖湿。还可发现, 在西北 1 区, 20 世纪 50 年代中期至 70 年代初, 降水和气温的长期变化趋势基本为同位相,

而 70 年代以后,两者之间呈现显著的反位相关关系;西北 2 区尽管也存在反位相关关系,但所出现的时段在 60 年代以前,90 年代以后也有重新出现反位相的迹象。华北地区这种反位相关关系也存在但不显著,原因是降水的年际变率远远大于气温的年际变率。在 1951 ~ 1997 年时段出现两个湿润阶段,一个在 70 年代初和 50 年代中期,另一个是最近 20 a 的湿润时段。西北两个分区近期的变湿比第一个湿润期强,而华北区的第二个湿润期却不及第一个湿润期强度大。

夏季,西北的两个分区的地表湿润指数从 60 年代以后增大,和降水气温的年代际比较可知,湿润指数的增大与气温的降低、降水的增加有关。因此,60 年代中期以后西北地区的夏季以冷湿为其主要的年际变化特征,60 年代以前主要以冷干为主。华北地区从 50 年代开始地表湿润指数持续下降,但在 60 年代中期至 70 年代中期,地表湿润指数趋势不明显,其变化有一个相对平缓的时段,该时段以后,湿润指数显著减小。比较分析降水和气温的变化可知,该时段的地表剧烈干化除与降水的减少有关外,该地区从 70 年代以后的升温应是地表湿润指数急剧下降的另一个原因。从图上还可以看出,从 1984 年以后,华北夏季的降水具有上升的趋势,但由于持续的升温使得地表湿润指数并没有显著的增加,这也是地表湿润指数在分析干旱化时的优势之一。

秋季,西北 1 区 70 年代初期地表湿润指数有一陡升的趋势,这个时段的气温和降水变化同样都有一个急剧增加的趋势且位相一致,说明地表湿润指数这个陡升是降水量的急剧增加所致;西北 2 区从 80 年代以后,地表湿润指数降到 50 年代的最低值,这种低地表湿润指数一直持续到现在,说明这个区域的干旱化主要发生在秋季。比较降水和气温的变化曲线可知,近期该地区的低地表湿润指数是降水减少和区域增暖共同作用的结果,而在 80 年代以前,该区域处于高湿阶段,原因是低温多雨。

从以上分析可知,中国西部两个区的大部分季节的地表处于一个湿润的阶段,而西北西部地区的干旱化主要发生在秋季,发生的原因是降水的减少和区域增暖。可以断定:区域气温的升高加剧了干旱化的发展。华北干旱化的发生尤以夏季最为显著,秋季次之。其中表面气温的上升是干旱化发生发展的一个重要原因,这可以通过计算升温对地表蒸发的影响作进一步的分析。Manabe^[8] 曾用模式证明,CO₂ 加倍将导致中高纬度夏季土壤水分减少,原因是在 CO₂ 倍增条件下,中纬度的夏季降水减少而气温升高。那么,中国西北东部和华北干旱化是否与 CO₂ 浓度的增加有关?与全球的中纬度干旱的联系怎样?需要作进一步的研究。

3.3 年代际变化趋势

把 1951 ~ 1990 年的年均值或年总量每 10 a 进行算术平均,每个值就代表它所在的年代,20 世纪 90 年代用 1991 年到 1997 年的算术平均表示,多年平均值用国际惯用的 1961 ~ 1990 年的平均值。表 1 为 3 个地区不同年代的值与平均值的差值,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,在华北地区,20 世纪 50 年代的地表湿润指数均为正的距平,是近 50 a 来最湿润的年代。而 50 年代以后,该地区地表湿润指数转为负的距平,说明地表逐渐变干,原因是温度升高。西北 1 区的地表干湿状况却明显不同,50 年代地表湿润指数为正的距平,60 和 70 年代为负的距平,80 年代和 90 年代转为正的距平,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。和上述两地区不同, 西北 2 区的干湿表现为相互交替的周期变化, 该地区 20 世纪 90 年代正处在一个湿润阶段。

表 1 20 世纪各年代地表湿润指数、降水和气温的距平

年代	华 北			西北 1 区			西北 2 区		
	湿润 指数	降水 (mm)	气温 ()	湿润 指数	降水 (mm)	气温 ()	湿润 指数	降水 (mm)	气温 ()
50	0.03	12.64	- 0.03	0.01	7.95	- 0.04	0.00	2.01	0.22
60	- 0.03	8.88	0.10	- 0.01	- 4.84	0.01	- 0.01	- 1.42	- 0.04
70	0.00	- 21.53	- 0.08	- 0.01	- 3.12	0.04	0.01	- 0.58	- 0.19
80	- 0.08	- 59.79	0.36	0.01	8.47	- 0.11	- 0.01	- 3.50	- 0.01
90	- 0.12	- 43.93	0.44	0.02	5.97	- 0.14	0.01	1.94	0.12

从图 3 中还可发现, 一般情况下, 地表的变干与降水的减少和气温的升高相关, 变湿与降水的增加和气温的降低有关。但是, 在有些情况下, 降水的减少并不能代表地表变干, 如华北地区 20 世纪 70 年代, 降水减少而温度降低, 对应地表湿润指数的距平为 0, 无变干趋势; 20 世纪 90 年代降水减小的强度弱于 80 年代, 但温度增加的幅度大于 80 年代, 造成 90 年代地表的干旱强于 80 年代, 是增温加强了地表的干旱。同样, 在西北 2 区, 20 世纪 70 年代温度的降低是地表变湿的主要原因。这些结果表明, 地表湿润指数能很好的表示这种复杂关系。

4 地表湿润指数变化趋势的检验

以上对 3 个区域地表湿润指数的变化趋势及与气温的关系进行了分析, 为进一步验证以上事实的可靠性, 利用常用的趋势检验法 M-K 法对区域平均的参量进行检验。图 4 给出了由 M-K 法^[7]给出的 3 个区域不同季节地表湿润指数和气温的趋势检验曲线。可以看出: 冬季, 3 个区域的增温趋势是非常显著的, 通过了显著性检验, 而在前面提到的西北 2 区正的降水距平不能通过显著性检验; 春季, 华北地区地表变湿并不显著, 不能通过 95% 的显著性检验, 而西北两个区的变湿却是显著的, 华北地区的气温为显著的增温趋势, 西北两个区均为显著的降温趋势。3 个区春季的变化特征可归纳为: 华北暖, 西北冷湿; 夏季, 华北地表湿润指数减小的趋势可通过显著性检验, 气温的变化不显著, 西北 2 区为变湿、变冷的趋势, 1 区降温仍然显著, 而变湿的趋势并未维持。秋季, 华北与西北 2 区暖干的趋势是显著的, 暖湿趋势则是西北 1 区的显著特征。

5 地表湿润指数变化的空间分布

以上给出了区域平均地表湿润指数的时间演变趋势及区域差异。除此之外, 对地表湿润状况地理分布的分析有助于了解地表湿润状况的地域特征。前面指出: 在北方, 汛期地表湿润指数基本代表地表的年湿润状况。因此, 我们通过分析汛期地表湿润指数的地理分布来研究它的年变化趋势。

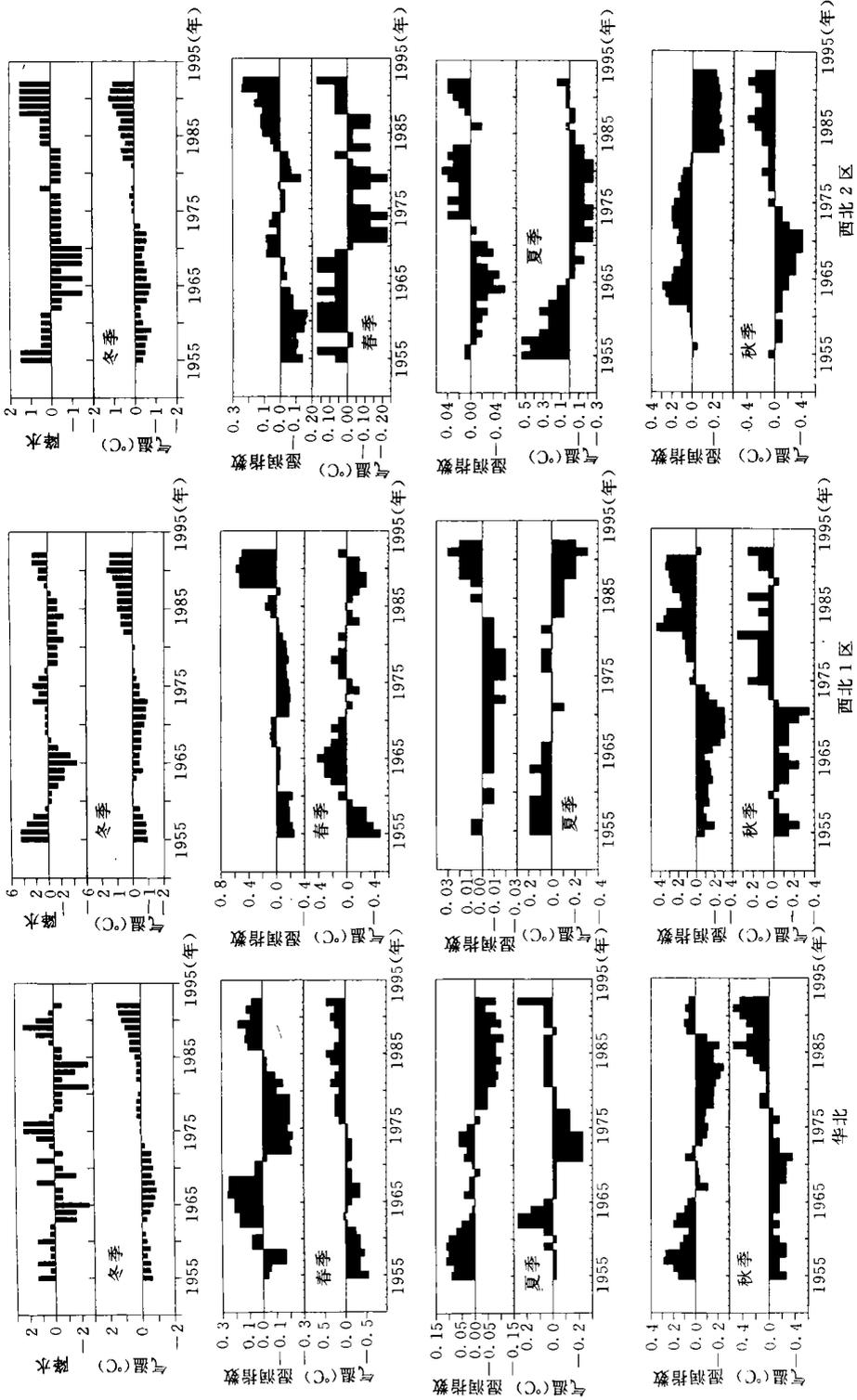


图3 不同区域各季地表湿润指数、气温的距平

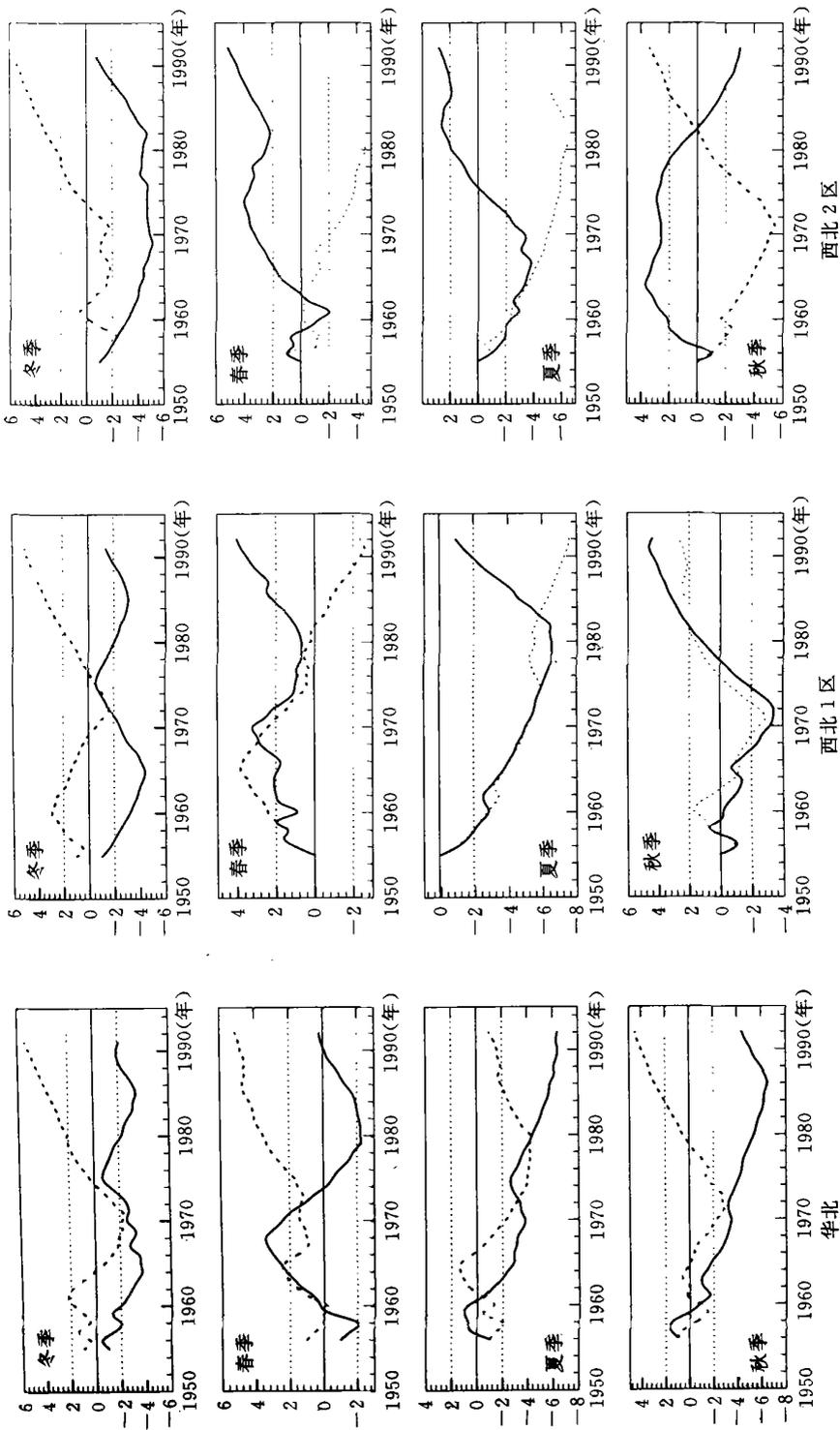


图 4 4个季节不同地区地表湿润指数和气温的逐年变化 (M-K法, 实线为地表湿润指数, 虚线为气温)

图5是由M-K法计算的汛期地表湿润状况的变化趋势。为了突出年际趋势,对资料进行了9_a滑动平均(下面逐季的年际变化趋势类同)。通过分析发现,在100°E以东,35°N以北,大部分地区的湿润指数在减小,说明这些地区地表在逐渐干化,另外,还可发现大部分干化区均可达到95%的信度(图中数字的绝对值大于等于2)。在35°N以北,以100°E为界,东部和西部地区呈相反的变化趋势,西部地区为显著的变湿趋势;西北东部、东北东部和华北为显著的干化趋势,西北的中部为显著的变湿趋势。还可以看出,100°E以东地区为中部地区变湿而两边变干的带状分布。

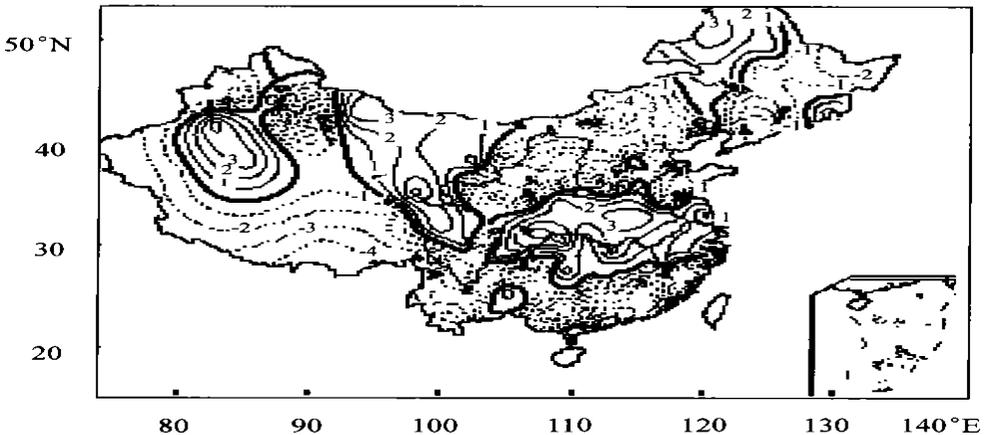


图5 1951~1997年地表湿润指数的趋势
(M-K法,虚线为变干趋势,实线为变湿趋势;
绝对值大于2的区域可达到95%的信度)

同样,地表湿润状况趋势的地理分布也存在季节性差异。前面提到,冬季降水基本能代表该季节的地表湿润状况,与此有关的分析已经不少,在此不再赘述,这里重点分析在春、夏、秋3个季节。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。可以看出:春季,北方干化的范围较小且偏北,东北北部大部分地区的地表干化较严重,华北的东部也存在干化趋势;夏季,北方地区地表湿润状况的地理分布与汛期的分布形势基本一致,西北东部和华北、东北南部及新疆北部存在显著的干化趋势,西北中部和东北北部地表变湿;秋季,除西北西部和青藏高原的东部外,其余大部分地区均为明显的变干趋势,其中干化的中心在渭水流域和黄河下游流域。可以说,北方的干化趋势存在显著的季节和地域差异。

6 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^[8]。本文的主要结果可归纳为以下几点。

(1) 西北、华北地区的地表湿润状况有显著的年代际变化且存在明显的地域差异。西北1、2区与华北地区的年际变化的位相特征基本相反,西北1区近20_a来(80年代以后)为变湿的趋势,而西北2区与华北地区基本正处在变干的时期。这种干化趋势是与降水减

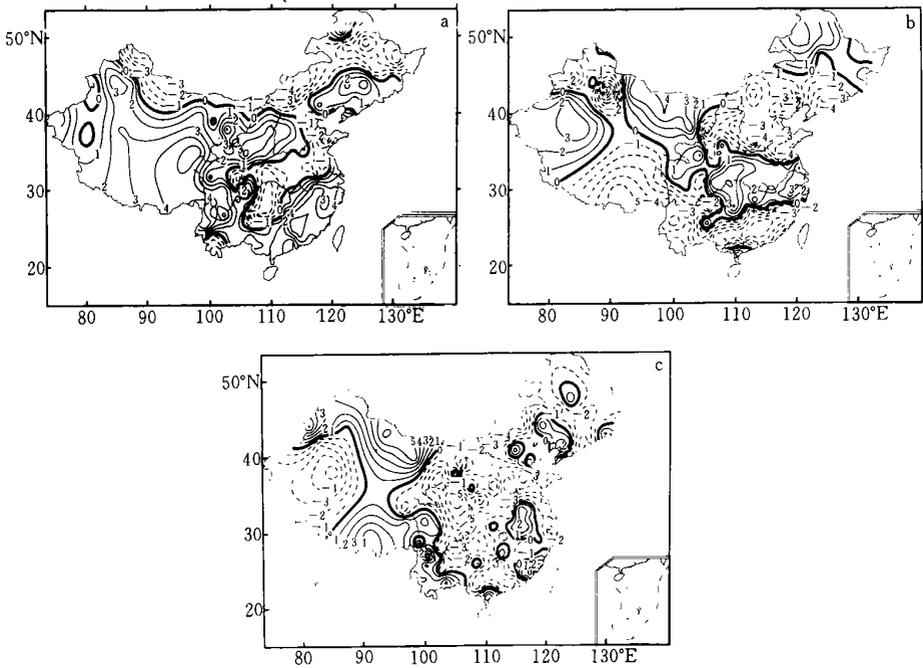


图 6 1951~1997 年地表湿润指数的逐季年变化趋势

(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, M-K 法,

虚线为变干趋势, 实线为变湿趋势; 绝对值大于 2 的区域可达到 95% 的信度)

少和区域增暖密切相关;

(2) 不同地区地表湿润指数同样存在年代际变化的季节性差异。华北地区的干化趋势主要发生在夏秋季节; 西北 2 区的干化仅发生在秋季。西北 1 区除夏季外, 春秋两季均为变湿, 但与气温的关系却是反向的, 春季为冷湿, 秋季为暖湿; 西北 2 区春夏均为显著的冷湿趋势;

(3) 地表湿润指数的年变化趋势的地理分布分析指出, 25°N 以北、100°E 以东的大部分地区在近 50 a 来存在一个变干的趋势, 西部除西藏外, 地表均存在变湿趋势。北方地区在春、夏、秋季都存在不同程度的地表变干趋势, 且有明显的地域差异。

参考文献

- 1 Fu Congbin. An aridity trend in China in association with global warming. In *Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change*. Edited by Richard GZepp, 1994. 1~17
- 2 严中伟. 华北旱涝变化的混沌性质分析. *气象学报*, 1995, 53(2): 232~237
- 3 严中伟. 华北降水年代际振荡及其与全球温度变化的关系. *应用气象学报*, 1999, 10(增刊): 16~22
- 4 魏凤英, 曹鸿兴. 华北干旱异常的地区特征. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 205~211
- 5 张庆云. 1880 年以来华北降水及水资源的变化. *高原气象*, 1999, 18(4): 486~495
- 6 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
- 7 Snyers R. On the statistical analysis of series of observations, Technical Note, 143, WMO, Geneva, 11, 1990
- 8 Manabe S. Summer dryness due to an increase of atmospheric CO₂ concentration. *Climatic Change*. 1981, 3: 347~386

TREND OF SURFACE HUMID INDEX IN THE ARID AREA OF NORTHERN CHINA

Ma Zhuguo Fu Congbin

(*START Regional Center for Temperate East Asia*

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

Based on the 160 observational stations' data of monthly precipitation and mean monthly temperature over China from 1951 to 1997, by use of the surface humid index computed from the data, $H_i = \frac{P}{P_e}$ (P is the monthly total of precipitation, P_e the potential evaporation from air temperature), the interannual variation, decadal variation and the seasonal differences of the surface humid index, precipitation and temperature over two typical drought regions, the northwestern and northern China, have been analyzed. The geographical distributions and trends of surface humid index have been given in the areas. The results indicated that the interannual and decadal variation of surface humid index over northern China is contrary to that of the west region of northwestern China, the former showed the wetting trend, and the latter drying trend. Also, the results showed that the drying trend of northern China generally occurred in summer and autumn, and that the wetting trend occurred in various seasons in northwestern China except for autumn of the east region of northwestern China, and summer of west region of northwestern China.

Key words: Drought, Surface humid index, Climatic change.