

《国家重点基础研究发展规划》项目

我国生存环境演变及北方干旱化趋势预测研究(G1999043400)(二)

# 北方干旱化的



# 趋势分析和预测研究

钱维宏 马柱国 等编

气象出版社

## 内 容 提 要

本集是《国家重点基础研究发展规划》“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”项目论文集的第二集。它集中反映了本项目在我国北方地区近代干湿变化规律及预测方法研究等方面的研究内容。本集共收入有关论文 22 篇,主要包括了以下几部分的研究成果:

- (1) 基于多种气候环境要素,综合分析 10~100 年时间尺度上北方地区环境干湿演变规律和空间分布格局;
- (2) 我国北方极端干湿事件在不同气候背景和不同时间尺度下发生频率和强度的变化规律;
- (3) 发展和完善线性和非线性预测模型,开展未来 10~50 年时间尺度上我国北方干旱化发展趋势的预测试验。

本书可供从事大气科学、环境科学、生态保护、农业科学的有关科研、管理部门和有关院校师生参考,并可供防灾减灾部门和从事全球变化研究的科研人员参考。

Beifang Ganhanhua de Qushi Fenxi he Yuce Yanjiu

北方干旱化的趋势分析和预测研究

气象出版社出版

(北京海淀区中关村南大街 46 号 邮编: 100081)

总编室: 010-68407112 发行部: 010-62175925

<http://cmp.cma.gov.cn> E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

责任编辑: 李太宇 袁信轩 终审: 陈云峰

封面设计: 张建永 版式设计: 安红霞

\*

北京市北中印刷厂

气象出版社发行

\*

开本: 787×1092 1/16 印张: 15.75 字数: 403 千字

2004 年 10 月第一版 2004 年 10 月第一次印刷

印数: 1~610 定价: 42.00 元

统一书号: 135929-5343

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社

发行部联系调换



## 近代中国北方干湿变化趋势的多时间尺度特征\*

马柱国 黄 刚

中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室,中国科学院大气物理研究所东亚中心,北京 100029

**摘要** 利用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,对我国北方近 100 年(1901~1998 年)、50 年(1951~2002 年)、20 年(1981~2002 年)和近 10 年(1991~2002 年)时间尺度干湿变化趋势进行了系统的检测和分析,突出了在全球增暖背景下温度变化对干湿变化的重要影响,揭示了中国北方四个不同时间尺度干湿变化趋势的基本特征。结果表明:在增暖背景下,中国北方普遍干旱化是干湿演变的总体特征;在西北西部某些地区(如新疆北部)尽管降水量有所增加,但并未改变该地区干旱化的时空格局,也未发现显著的变湿趋势存在。特别值得注意的是,在有些地区干湿指标的变化趋势与降水的变化趋势完全相反。在 20 年和近 100 年尺度上,我国西部大部分地区仍处在一个干旱化的时段,而华北地区在 20 年和 50 年尺度上均表现为一个干旱化的趋势。

**关键词:** 降水和气温;增暖;干湿指标;变化趋势;中国北方;变湿

### 1 引言

在增暖背景下,全球和区域降水发生了重大调整,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。所以,利用传统的狭义的降水变化已经无法客观的表征一个地区在增暖背景下的干湿变化,特别是在干旱和半干旱地区。广义的湿的概念应是指一个地区水分状况良好,反之就是干,变湿是地表水分状况转好的趋势,变干是水分状况亏损的趋势。因此,在研究一个区域的干湿变化时,需要综合考虑降水(收入水分)和蒸发(支出水分)这两个重要的地表水分收支的变化。

数值模拟结果表明:随着未来人类活动的进一步加剧,温室气体的排放也在不断增加,由此引起的全球气候将进一步变暖,这将可能导致北半球中纬度地区的干旱化<sup>[1~4]</sup>。在中国北方,增暖背景下降水量的时空格局也发生了变化,部分地区持续干旱<sup>[5]</sup>,部分地区降水增多<sup>[6]</sup>,在华北和东北地区,干旱一直是困扰当地水资源供给的一个关键因素,而在西北西部最近十几年降水略有增加、径流量增大、冰雪融化加剧和湖泊面积扩大<sup>[6~9]</sup>;新疆北部极端降水的强度和频次也明显增加<sup>[10]</sup>,这些研究的意义在于为我们提供了这些地区降水呈增加趋势的重要证据,但是否因此而水分状况转好目前尚无令人信服的结论,还需进行深入的探究,这是因为我国西北西部是中国区域增暖显著的地区之一,地表的干湿变化同样受温度升高的影响,径流量增大和湖泊面积扩大只是一个表面现象,这些现象的形成是来自于冰雪融化还是来自

\* (资助项目:国家重点基础发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”(编号:G1999043405)和国家自然科学基金面上基金(40375028)共同资助。

于即时的降水目前尚不清楚。同时,增暖导致地表蒸发的增加将使地表水分减少,降水的增加量是否能补偿由增暖所引起的蒸发潜力变化?对这些问题的准确回答是客观评估区域干湿变化的前提。另外,对这些问题的客观认识首先将有助于当地的经济及社会的可持续发展,对国家宏观经济的调控具有很重要的指导意义;其次这里也蕴藏着诸多有关气候变化和地表水分过程相互作用的科学问题,所以从国家需求和科学前沿两个层面上考虑,迫切需要开展这方面的科学研究。

基于以上分析,我们通过计算最大潜在蒸发并结合降水定义了一个干湿指标,这个指标的意义在于既包括降水变化又考虑温度变化对水分收支的影响,以此为基础研究中国北方在全球增暖背景下 100 年、50 年、20 年及近 10 年四个尺度上的变化趋势,并对不同时间尺度的变化趋势进行比较分析,目的是揭示全球增暖背景下温度变化对我国北方干湿变化趋势影响的事实。

## 2 干湿指标定义、资料和分析方法

### 2.1 资料

文中所用资料为中国气象局整编的 160 站月降水和月平均气温资料,时间年限为 1951~2002 年;近 100 年(1901~1998 年)的降水资料来自于英国 East Anglia 大学所提供的月降水和月平均气温网格点资料,空间分辨率为  $0.5^{\circ}\text{E} \times 0.5^{\circ}\text{N}$ 。关于这个资料在文献<sup>[11]</sup>里已有详细的说明,这里不再赘述。为了进一步考察这套资料在中国区域的质量,我们用 160 观测站点的月降水和平均气温资料对我国区域的网格点资料进行了检验,结果表明:除青藏高原西部外,大部分地区格点资料都和实测资料吻合得很好。为了节约篇幅,详细的检验结果将另文介绍 1)。

### 2.2 分析方法

前面提到,传统的利用降水作为干湿转化的研究对象在全球增暖背景下是不完善的,必须考虑温度变化对地表水分收支的影响,只有这样才能较客观的反映地表的水分状况,进而正确认识干湿的演变规律。基于这些考虑,我们定义一个既考虑降水,又考虑温度变化对潜在蒸发影响的指标,以此代表地表水分状况的收支,通过分析来探究我国近百年来不同时间尺度的干湿演变趋势。

干湿指标的定义为:

$$H = P - \sum P_{ei} \quad (1)$$

其中  $H$  为干湿指标,  $P$  是年降水总量,  $\sum P_{ei}$  为年潜在蒸发总量,降水量为观测值,月潜在蒸发  $P_{ei}$  利用改进了的 Thornthwaite<sup>[12]</sup>(1948)计算方法,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,计算的潜在蒸发也较符合实际情况。改进后的  $P_{ei}$  的计算公式如下:

$$P_{ei} = \begin{cases} 0 & T_i \leq 1^\circ\text{C} \\ 1.6d(10T_i/I)^a \times 10 & 1^\circ\text{C} < T_i \leq 26.5^\circ\text{C} \\ a_1 + a_2T_i + a_3T_i^2 & T_i > 26.5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $d$  为每月的天数除以 30,  $T_i$  为月平均温度,  $a = 0.49239 + 1.792(10)^{-2} - 7.71(10)^{-5}I^2 + 6.75(10)^{-7}I^3$ ,  $I = \sum_{i=1}^{12} i$  为月总加热指数,  $i = (T_i/5)^{1.514}$  为月平均加热指数, 其中  $T_i$  为第  $i$  个月的月平均温度,  $a_1 = -415.8547$ ,  $a_2 = 32.2441$ ,  $a_3 = -0.4325$ 。根据以上公式和参数可近似计算潜在蒸发。年潜在蒸发总量  $P_e = \sum_{i=1}^{12} P_{ei}$ 。

趋势一般指在某一特定的时段内参量的变化倾向,所以在说明一个变量的趋势时,我们必须指明这个趋势所发生的时段,也就是趋势只在特定的时段有指示意义。为此,我们把中国北方为近百年(1901~1998 年)、近 50 年(1951~2002 年)、近 20 年(1981~2002 年)和近 10 年(1991~2002 年)四个时段来分别研究这个地区的干湿变化趋势,目的是为了揭示不同时段我国区域的干湿变化趋势,特别是北方。另外,为了能更好的反映北方不同区域的趋势特征,把我国北方共分为 6 个子区域,东北分为东西两个区,华北分为北南两个区,西北分为东西两个区,具体划分及 160 站点见图 1。

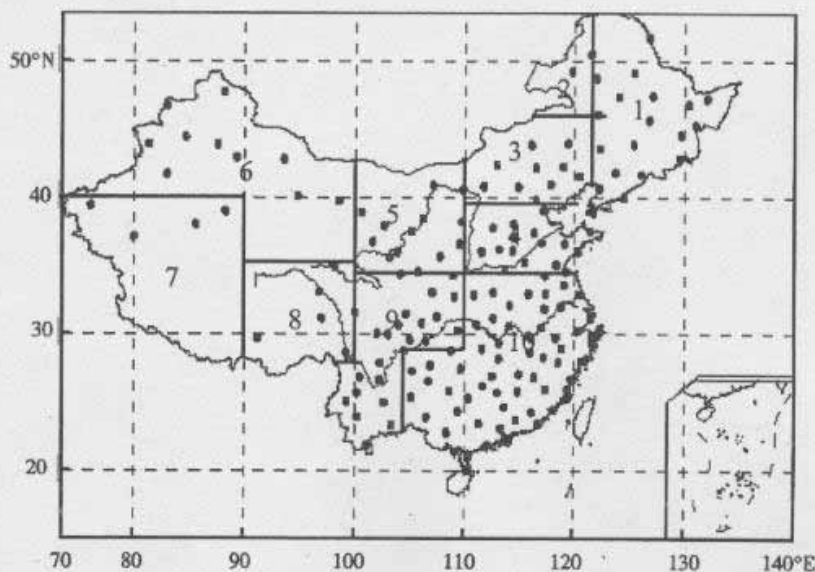


图 1 站点分布和区域划分示意图

为了进一步说明干湿指标的合理性,同样我们也分析不同时段不同区域降水的变化趋势,并与干湿的指标进行了比较。检验的方法为常用的 Mann-Kendall 方法<sup>[13]</sup>(简称 M-K 法),当检验值的绝对值大于 1.96 时,变化趋势可达到 95% 的信度检验因而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 100 年的干湿变化趋势

图 2 为利用 M-K 方法计算的 1901~1998 年我国降水、气温和干湿指数的变化趋势。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;图 2b 上,实线区域为增温区域,带有实线的阴影区为增温趋势显著的地区,虚线为降温区域,带有虚线的阴影区为降温显著的地区;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 发现,降水显著减少的地区分布在青藏高原南部和浙江、福建的小部分地区,降水显著增加的区域主要分布在东北的西北部和新疆的北部,其余地区有减少或增加的趋势,但变化均不显著,华北南部和江淮流域部分地区也存在显著增加的趋势。在近 100 年时间尺度,西部( $100^{\circ}\text{E}$  以西)降水主要为减少趋势(新疆北部除外),东部( $100^{\circ}\text{E}$  以东)为增加趋势。

从图 2b 分析可知(图 2b),  $95^{\circ}\text{E}$  以西地区是大范围显著的增暖趋势,增暖最显著的地区在塔里木盆地及其西部地区,和全国比较,无论从范围还是强度来说都是最强的,说明西部地区在近 100 年来增温显著;在  $95^{\circ}\text{E}$  以东地区,升温主要发生在东北,且大部分地区都达到了 95% 的显著性检验;另一个显著增温的地区在广西一带,但所涵盖的范围较小。东部其余大部分地区为显著的降温区,且显著降温发生在长江的中下游和江淮流域,其形成原因尚待探究。结合降水量变化趋势(图 2a)可知,华北南部和江淮流域是冷而降水增多的趋势,华北南部和江淮流域的降水增多区域对应的是一个变冷区,可以断定:这些区域近 100 年尺度存在一个显著的冷湿趋势;在新疆北部和东北的东北部是暖而降水增多的变化趋势,这两个地区我们无法从图 2a、b 上判断其干湿趋势,这是因为温度升高将导致蒸发量增大,蒸发增大将减小地表的水分,和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目的。

从图 2c 可以看出,尽管新疆北部降水量增加,但并不存在变湿趋势,一些地区甚至为干化趋势,和降水变化趋势相反;同样,东北的东北部由于受增暖的影响变湿的强度也明显弱于降水量增加的趋势。通过分析还可发现,中国西部的大部分区域明显变干,干化趋势最显著的地区在塔里木盆地及其周围地区,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 100 年,我国西北西部仍然处在干旱化的阶段,并没有因为降水增加而变湿。从降水量变化趋势图上无法得出如此的结论。然而,在东部,降温使得该区域的潜在蒸发力减弱,加上降水的增加趋势,导致该地区显著变湿,变湿的范围较降水增加的范围大,强度也强。东北西北部因温度的升高而变湿强度减弱,范围也小,而华北大部和江淮流域的变湿趋势在温度降低的背景下变得更湿(强度增大),且范围扩大。可以说东部地区(东北除外)的变湿趋势除因为降水增加的因素外,温度降低也是一个重要影响因素,而西北西部的部分地区,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,结果造成该区域在 100 年尺度上仍然表现为一个干旱化的趋势,由此可见温度变化在干湿变化趋势所起的重要作用。



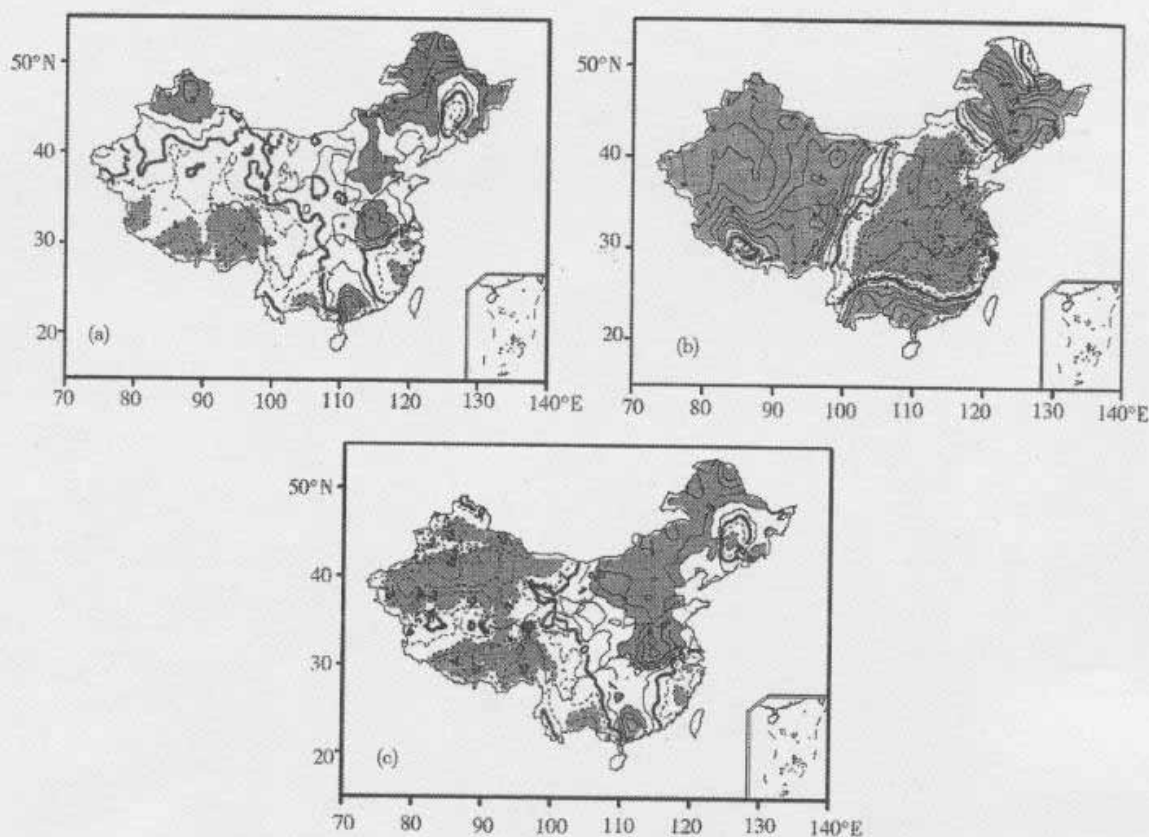


图2 1901~1998年降水、气温和干湿指数的变化趋势(M-K法)

a) 降水; b) 温度; c) 干湿指标, 阴影区为超过95%信度检验的地区

图3为北方6个区区域平均降水和干湿指标趋势检验(M-K法)。比较降水和干湿指标的变化趋势发现,在东北两个区,温度变化没有改变这个地区由降水量增加所引起的变湿趋势;在华北两个区,由于近100年这两个区域均为降温趋势,所以,尽管这两个区域的降水增加的趋势不显著(检验值小于1.96),范围也不大,但由于温度偏低而蒸发减小,所以留在地面的有效水分增加的更多,干湿指标的增大趋势是显著的(检验值大于1.96)。还可以看出,在西北、东西两个地区存在着完全相反的变化趋势,其中它的东部,干湿变化趋势的特征与华北地区类似,温度的降低加强了这个区域的湿化趋势,但在西部,近100年降水略有增加,但由于该地区的增暖幅度较大,降水的增加量无法弥补由于蒸发力的增大所导致的水分亏损,所以尽管降水量增加了,但仍然是一个显著的干化趋势,降水变化趋势与干湿指标变化趋势相反,这与以前研究所得出的结论不同<sup>[6]</sup>。

为了更充分的说明温度变化对干湿变化的影响,我们把西北西部作为一个典型个例进行探讨。图4给出了西北西部区域平均干湿指标  $H(P - P_e)$  和降水的年变化曲线并给出各自的线性趋势。可以看出,降水的线性趋势是增加的而干湿指标却为减少的趋势,两条曲线的线性趋势完全相反。这也充分说明温度变化在分析干湿变化中的重要性。

表1给出了全国10个区干湿指标、降水和温度的线性趋势,我们发现,在6区(西北西部),降水的增加趋势是9.75 mm/98 a,而干湿指标的趋势却是-18.62 mm/98 a,两者的变化

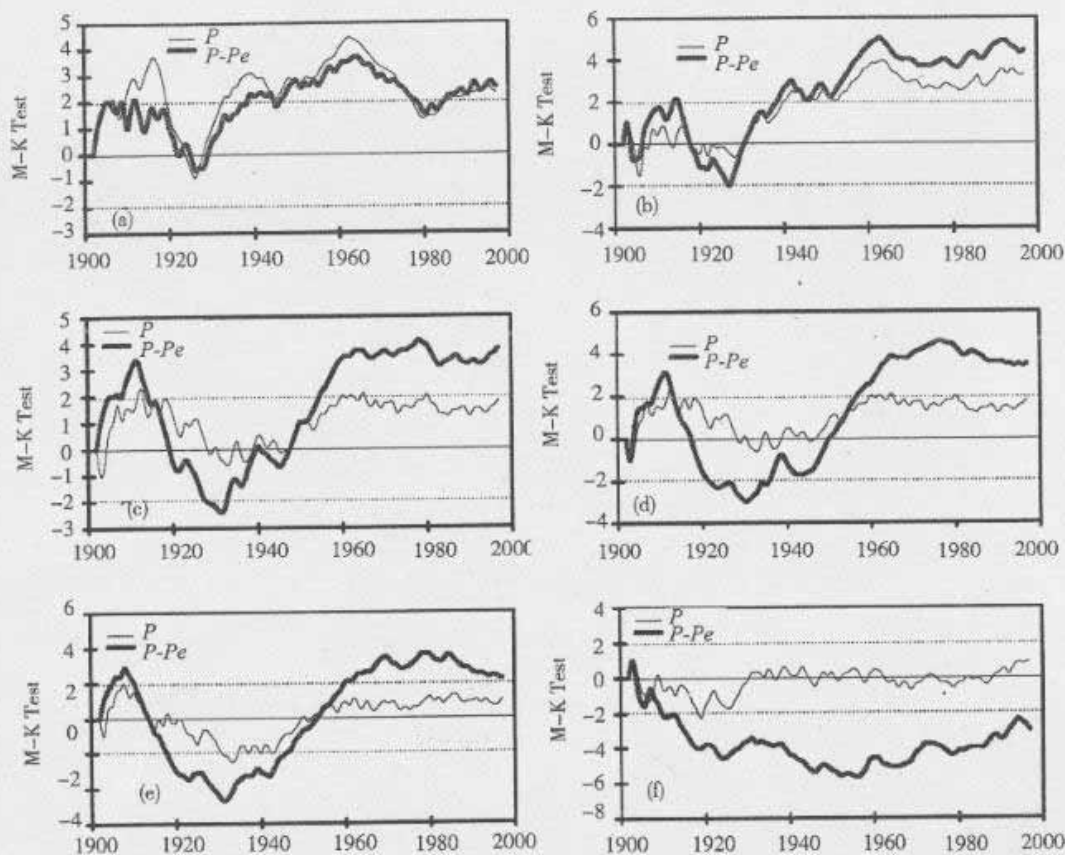


图3 1901~1998年降水、干湿指标的变化趋势(P为降水,P-Pe为干湿指标,M-K法)

a) 东北东部;b) 东北西部;c) 华北北部;d) 华北南部;e) 西北东部;f) 西北西部

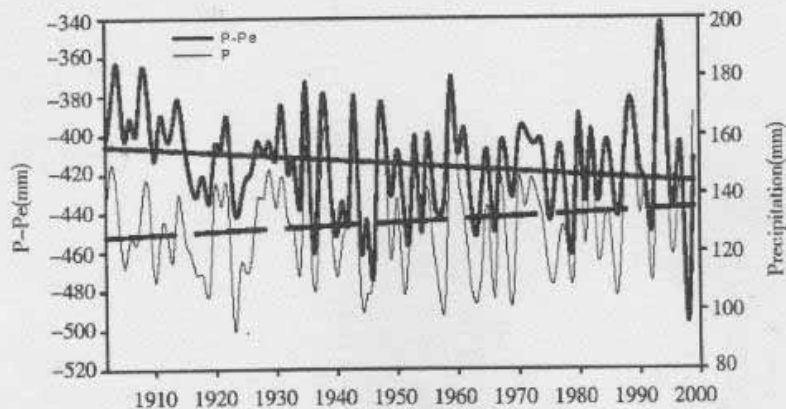


图4 西北西部区域平均降水(P)和干湿指标(P-Pe)线性变化趋势的比较

趋势是完全相反,另外还可发现,在温度升高的地区,降水的线性趋势大于干湿指标的线性趋势,而在温度降低的地方,干湿指标的趋势大于降水的趋势。所以,温度变化在干湿变化研究中必不可少,特别是对全球增暖背景下区域水分状况的演变特征研究。



综合以上分析,可以断定,在冷而降水增加或者温度升高而降水减少的气候背景下,降水的变化趋势基本和干湿变化的趋势一致,也就是说,降水变化可定性的表示干湿变化的特征;然而,在温度升高和降水增加或者温度降低降水减少的条件下,用降水无法表征干湿变化的特征,所以在这两种气候背景下,要慎用降水变化表征干湿变化。

表 1 1901~1998 年全国 10 个分区干湿指标、降水和温度的线性变化趋势(单位:1/98 a)

| 参数                    | 1 区   | 2 区   | 3 区   | 4 区   | 5 区   | 6 区    | 7 区    | 8 区    | 9 区   | 10 区  |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| $P - P_e(\text{mm})$  | 51.47 | 66.08 | 65.26 | 99.41 | 20.55 | -18.62 | -19.75 | -23.98 | -.65  | 47.33 |
| $P(\text{mm})$        | 60.83 | 70.99 | 37.01 | 51.64 | 8.87  | 9.75   | -17.64 | -21.22 | -6.38 | 35.83 |
| $T(^{\circ}\text{C})$ | 0.96  | 1.21  | -0.27 | -0.78 | -0.04 | 1.29   | 0.79   | 0.36   | -0.14 | -0.27 |

### 3.2 近 50 年的干湿变化趋势

类似于上面的分析,同样我们给出近 50 年的分析结果。

图 5 是近 50 年中国区域降水、气温和干湿指数的趋势分布结果,各要素图上颜色区所代表的意义与图 2 相同。比较图 5a 和图 5a 发现,在 1951~2002 年时段,我国西部塔里木盆地和天山山脉及其东缘有一个显著的降水增加区域,图 5a 东北中北部的少雨显著区消失,其西北部降水有增加的趋势但不显著,而东北南部出现了一个新的降水显著减小的区域;原黄河中

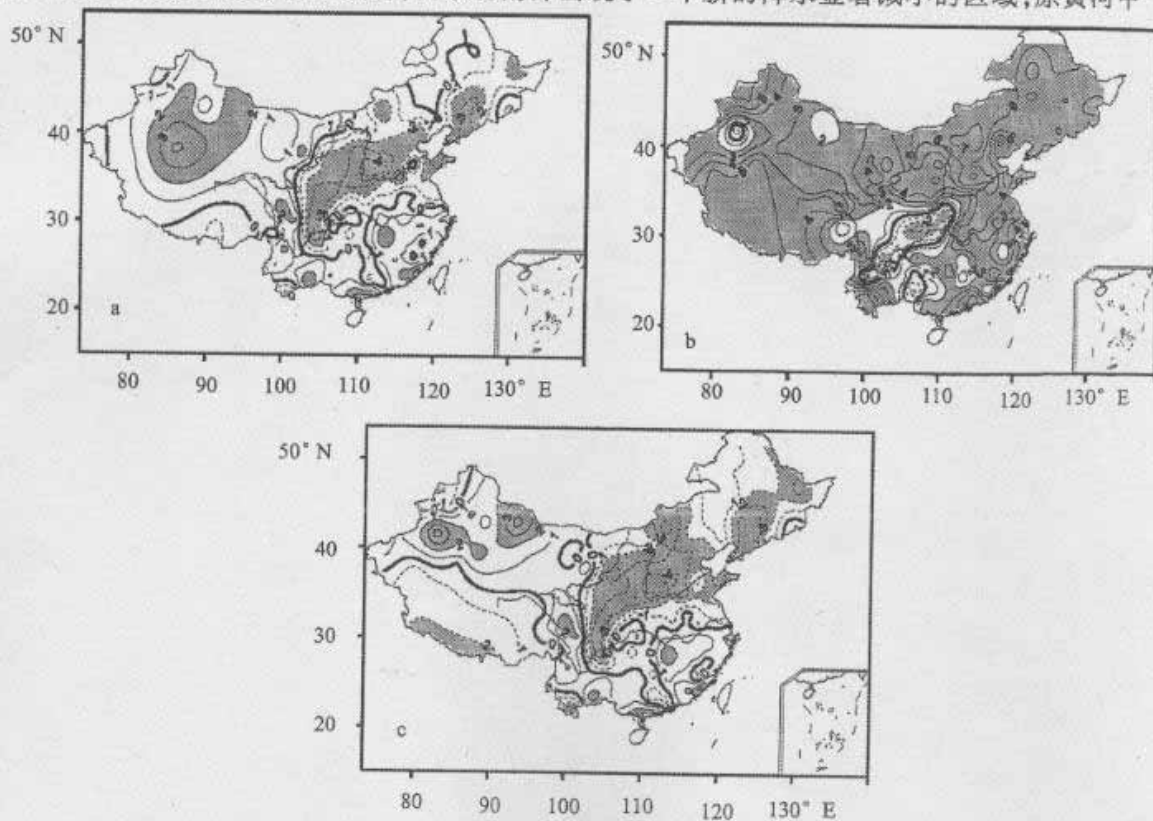


图 5 1951~2002 年年降水、气温和干湿指数的变化趋势(其它说明同图 2)

游的降水显著减小区的范围明显扩大,且强度加强,呈东北西南走向,向南扩展到江淮流域和西南地区。若以  $100^{\circ}\text{E}$  为界,把西北地区分为东西两个部分,在西北西部的广大地区均有降水增加的迹象,显著增加的区域在塔里木盆地和天山山脉的东缘,这与近 20 年降水量的增大有关<sup>[6,8]</sup>;而西北东部降水的趋势是明显减少,东西两部分存在相反的变化趋势。青藏高原的中南部降水量的变化趋势为正值,但变化趋势不显著。江南地区降水量增加的变化趋势也不显著。总体来看,降水量近 50 年来显著增加的地区主要集中在西北的西部地区,这对缺水的西北西部是一个令人鼓舞的信息,但由于还没有考虑温度变化的影响,是否变湿还需进一步检测。图 5b 是 1951~2002 年我国温度的变化趋势。结果说明,在这个时段,中国大部分地区温度以增暖为主,降温区主要产生在长江中游一线且趋势显著,其周围是增温趋势但不显著,在西北西部也有小部分增温不显著的区域。除此之外,其余地区均为显著的增温趋势,增温强度最大的地区集中在东北大部、华北、西北东部、青藏高原和新疆的西北部。在这种温度变化分布的背景下,对降水增多的地区需要考虑温度的影响方可客观认识这些地区的干湿变化。图 5c 给出了干湿指标 1951~2002 年的变化趋势。和降水量的变化趋势比较可知,在降水量显著减少的地区,由于受增暖的影响而变干的范围扩大,强度增强,说明温度升高加剧了这些地区的干旱化趋势,具有如此特征的地区还有华北、陕西大部分地区 and 东北南部地区。西北西部降水显著增加的区域所对应的湿趋势范围明显减小,显著性也减弱;在东北的西北部,尽管降水量有增加趋势,然而这个区域显著的增温引起该区域的蒸发增加,导致这个地区趋势仍然为干旱化趋势,降水的变化趋势和干湿指标的变化趋势在这个地区是相反的,所以在研究我国北方地区的水分状况时需要考虑全球温度升高这个大背景。总体来看,在  $100^{\circ}\text{E}$  以东、 $30^{\circ}\text{N}$  以北地区以干旱化趋势为主,且 50% 以上的地区达到 95% 的信度检验。最近的一些研究表明<sup>[6~9]</sup>,我国西北西部地区正在由暖干向暖湿转化,理由是这些地区温度升高、降水量增加、径流量增大、湖泊面积扩大和洪水灾害频发,但是否说明这个地区变湿还有待于进一步的深入研究,因为这些现象发生的原因还没有令人信服的解释,如河川径流量的增加在多大程度上受降水量变化的影响,冰川积雪融化对河川流量、湖泊面积扩大和洪水灾害频繁发生的贡献有多大、增暖对冰川积雪融化的影响,对这些问题的客观回答和各种因素的综合分析是估算西部水环境变化的基本前提,仅从以上事实还难以断定该区域为转湿的趋势。

图 6 是中国北方 6 个区域 1951~2002 年区域平均降水和干湿指标的趋势的检测曲线。可以看出,在东北东部,降水的减小趋势未通过显著性检验(检验值大于  $-1.96$ ),但干湿指标的减小趋势却是显著的,说明在增暖背景下,少量的减小趋势也能造成显著的干旱化趋势,华北北部也存在类似特征;在西北西部,干湿指标的检验值是负的,降水的检验值为正的,两者变化趋势相反,降水为增加趋势,而干湿指标却是干化特征。在华北南部和西北东部,降水减少和干湿指标减小趋势都非常显著,降水和干湿指标所表征的特征一致。值得关注的是,在西北西部,降水量的增加趋势是显著的(检验值大于  $1.96$ ),然而干湿指标增加的趋势却不显著,说明在考虑温度升高条件下,西北西部的降水增加还不能改变当前的干湿趋势。以上结果说明,在我国北方,大多数区域降水和干湿指标的变化趋势不同,说明温度变化对干湿演变有重要的影响。仔细分析可以发现,在东北和华北地区,1980's 中期以前,降水和干湿指标的趋势检验曲线基本重合,而在 1980's 以后,两条趋势线就有明显的差异。大家知道,1980's 中期以后正是我国北方升温最显著的时段,随着温度的不断升高,两线相距越来越大,干湿指标的变化趋

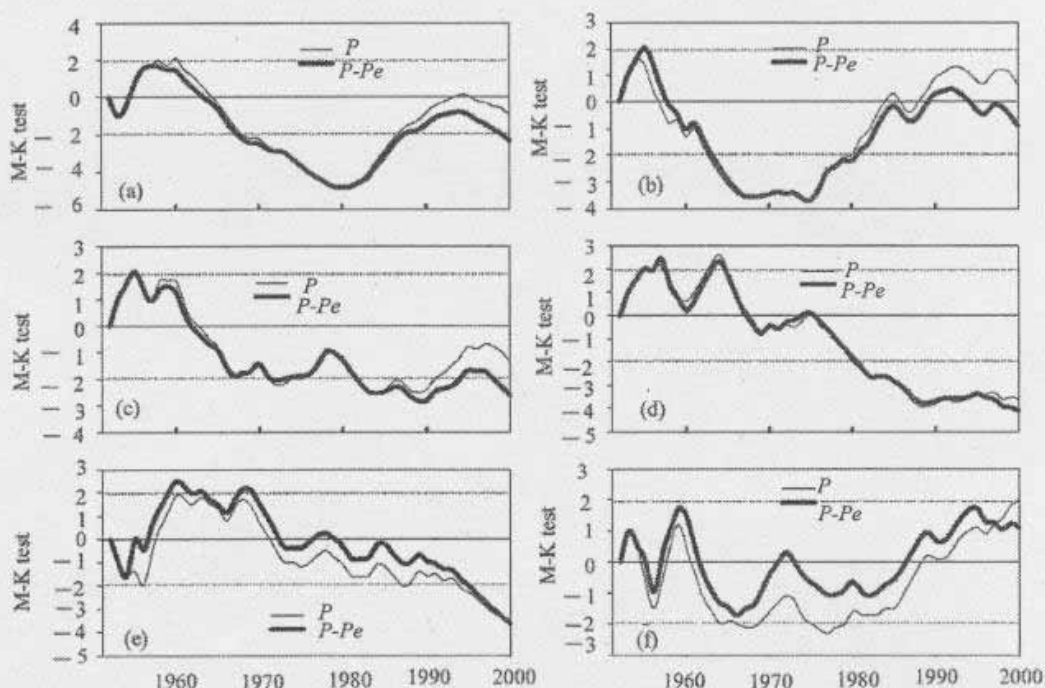


图6 1951~2002年降水、干湿指标的变化趋势

a)东北东部;b)东北西部;c)华北北部;d)华北南部;e)西北东部;f)西北西部(P为降水,P-Pe为干湿指标,M-K法,其它说明同图3)

势明显受到增暖的影响,这也正是干湿指标的指示干湿特征时的优点之一。近20年西北西部降水量的增加引起广泛关注,特别是在1995年以后,降水有一个明显的上升趋势,而干湿指标却在下降,这种下降趋势显然是温度升高所致,所以,仅从降水量来看,我们容易得到一个西北西部地区变湿的假象,但从区域平均干湿指标的变化结果分析来看,西北西部还没有显示出显著变湿的趋势特征。

### 3.3 近20年的干湿变化趋势

图7为1981~2002年我国区域降水、气温和干湿指数的变化趋势。阴影部分为变化趋势通过95%显著性检验的地区(其它说明同图2),其中虚线区域为降水显著减少的地区,实线区域为降水显著增加区域。由图7a可以看出,在近20年,除江南内蒙以外,我国东部大部分地区为降水减少趋势,江南地区沿长江中下游一带存在显著的降水增加趋势。降水减少显著的地区有集中在两个地区,一个在东北的中北部地区,另一个位于黄河中游及陕西的中南部地区,而华北北部降水趋势为正值,但不能通过95%的显著性检验。在西部,青藏高原和新疆北部趋势都为正值,说明这些地区的降水在近20年有增加的迹象,但能通过显著性检验的地区仅有新疆北部的小部区域和青藏高原东南部,所以,现在还不能断定在近20年来我国西北西部的降水是增加趋势。总体上,降水减少趋势仍占据全国大部分区域。

图7b给出近20年来我国温度的变化趋势。可以看出,全国大部分地区的升温都是显著的,新疆北部部分地区、甘肃南部和西南部分地区、广西大部地区增温不显著,个别站点有降温趋势。比较降水和温度变化趋势发现,一些区域温度升高对应降水减少,而另外一些区域,温



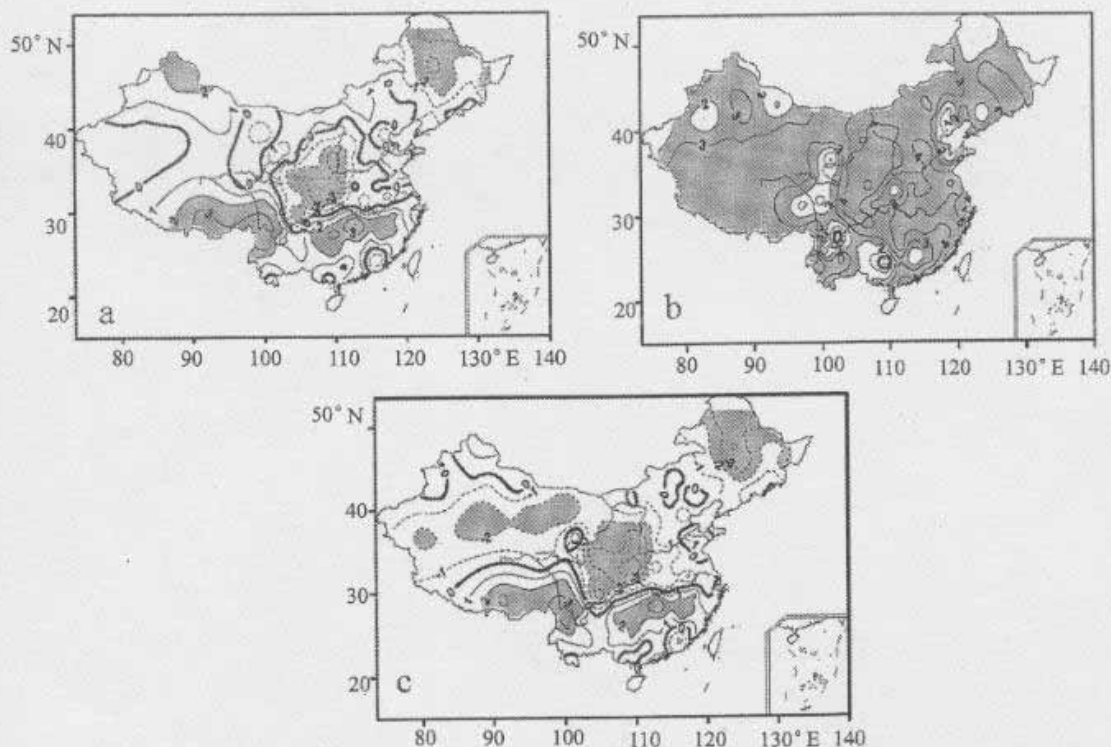


图7 1981~2002年中国区域降水、气温和干湿指数的变化趋势  
(其它说明同图2)

度升高伴随着降水量增加,前者温度的升高使得该地区变得更加干旱少水,后者温度升高削弱了因降水量的增加所引起的地表变湿趋势,在这种暖而降水增加的情景下,地表是否会变湿取决于降水的增加量和由温度升高所导致的蒸发增加量之间的平衡。

图7c是利用(1)式所计算的干湿指标近20年的变化趋势。和降水趋势(图7a)比较可以发现,在降水量减少的区域,由于温度的升高而干旱的趋势更加显著,表现为干旱的范围较降水显著减少的范围大,且强度加强,如在黄河中上游的地区,干旱化显著的范围较降水显著减少区的范围由于温度的影响而扩大,类似的地区还有东北的中北部。特别值得注意的是,西北西部(100°E以西,35°N以北)的变干趋势的范围明显较降水的减小范围大,并且出现两个明显的显著变干区,而新疆北部降水量显著增加的区域并未发现显著变湿趋势,且原有的显著增加区域消失。同时,在西北西部降水增加的大部分地区图7c上代之以变干的趋势,降水趋势和干湿变化趋势完全相反;青藏高原东南部、长江中下游的显著变湿范围也较图2上降水量显著增加的范围小。这些结果也说明温度对干湿变化的重要影响,特别在区域温度升高的背景下,少雨的地方更加干旱,而降水增多的地方未必就能变湿,如我国西北西部许多地区,降水尽管增多了,但仍然有变干的趋势,这些干化事实验证了数值模拟结果<sup>[4]</sup>。

### 3.4 1991~2002年的干湿变化趋势

图8给出了由M-K法所计算出近1991~2002年降水、气温和干湿指数的变化趋势。阴

影区为通过 95% 显著性检验的区域。由图 8a 可以看出,在我国北方大部分地区,降水是一个弱的减小趋势。减弱趋势显著的地区在东北的中北部和华北的东部地区(通过了 95% 的显著检验),唯一不同的地区是新疆的北部,趋势值均为正值,但都没有达到 95% 信度的临界值。和图 8a 比较发现,新疆北部的降水增多趋势在图 8c 上为负值,两者的变化趋势相反,这说明降水的增多并未引起该地区的变湿趋势。在温度变化趋势图上(图 8b),东部季风区和西北地区均为显著的增暖趋势,其它地区也有增暖迹象,说明在近 12 年,中国大部分地区增暖明显。图 8c 为干湿指数变化趋势的地理分布。可以看出,在  $30^{\circ}\text{N}$  以北地区, M-K 的检验值均为负值,说明北方地区存在变干的趋势,显著变干的地区有西北西部大部分地区、东北的中北部和华北的北部地区。比较两图还可发现,图 8c 上的干旱范围明显大于图 8a 上降水减少的范围,面积占据了北方的大部分地区。结合温度变化趋势我们认为,北方地区普遍干旱的原因是降水的减少,而温度变化加剧了干旱化的严重程度,特别在中国西部地区,增暖导致干旱化趋势的加剧,少量的降水增加还难以改变由增暖所引起的干旱化趋势分布格局。

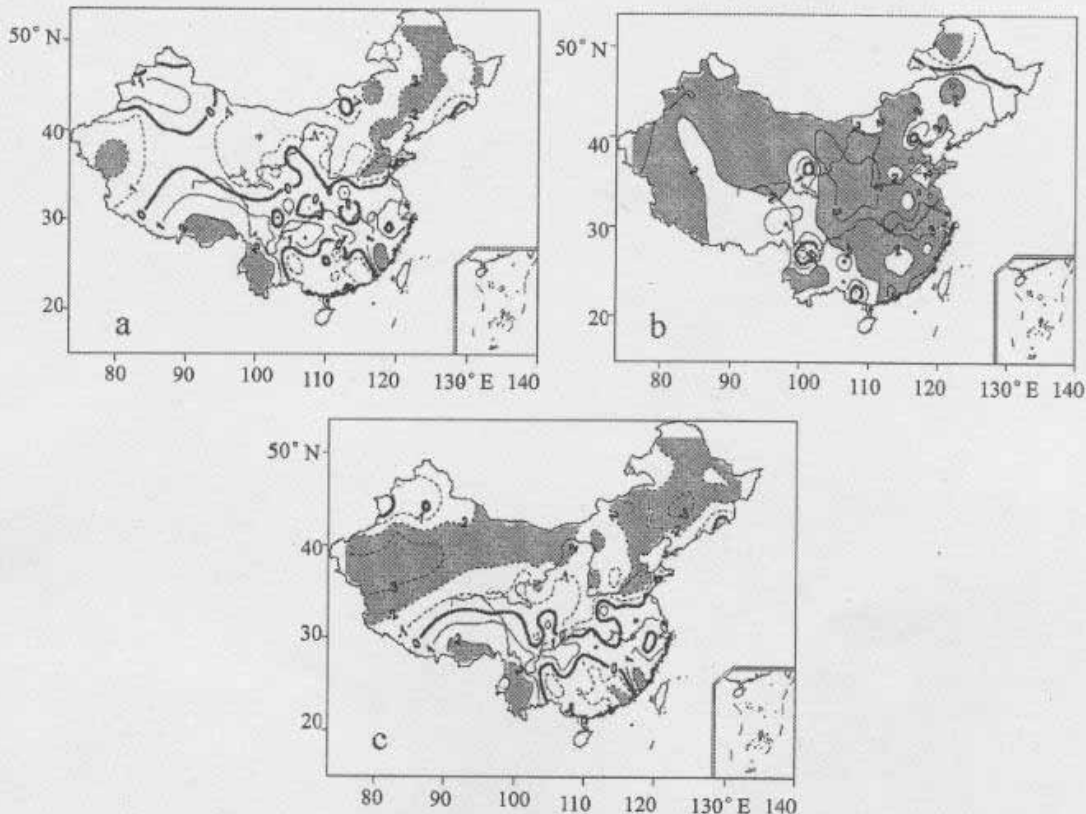


图 8 1991~2002 年降水、气温和干湿指数的变化趋势  
(其它说明同图 2)

## 4 讨论与结论

本文利用考虑了温度变化及降水的干湿指标对我国近 100 年内不同时间尺度干湿指标的变化趋势进行了分析,特别是对我国北方地区进行了详尽的研究。发现干湿指标能够揭示与降水完全不同的变化趋势,它更能客观的诠释在全球增暖背景下区域的干湿演变特征及变化趋势。另外,通过分析还发现,不同时间尺度的变化趋势是显著不同的,所以在进行趋势分析时应针对具体的时间尺度,也就是说,趋势是指某一特定尺度上的特征。

通过分析不同时间尺度我国北方地区的空间及区域平均的干湿指标变化可归纳为以下几条结论:

1) 干湿指标分析的结果表明,由于受温度升高的影响,近 100 年我国西部地区降水尽管增加但并不存在变湿趋势。而东部地区降水显著增加的地区明显呈现出变湿趋势,范围较降水显著增加的大,且强度明显增强,这与这个地区温度的降低有关。

2) 同样,在近 50 年,西北西部显著变湿的范围较降水显著增加的范围为小,而东部的干化区域的范围较降水显著减少的区域大。这充分说明了增暖能够减弱降水增加对地表水分收支的贡献,也能加剧降水减少的干旱化程度。

3) 在近 20 年尺度上,我国北方主要以干旱为主,尽管新疆北部降水量有显著的增加趋势,但由于受区域增暖的影响,降水显著增多的地区并没有明显的变湿趋势。干化的地区主要分布在陕西中南部、四川北部和东北的中北部。在降水显著减少的背景下,温度升高的趋势加剧了这些地区的干化程度。近 10 年也有类似的干湿变化趋势。

土壤湿度是表征地表干湿变化的客观指标,但由于缺乏长时间大范围尺度的观测数据,用土壤湿度进行干湿变化的分析具有局限性<sup>[14]</sup>,所以,目前还无法用土壤湿度来分析区域或全球尺度干湿变化的特征。建立干湿指标不失为一种理想的途径。但由于本文所建立的干湿指标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,但从本文的分析结果来看,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,特别是在增暖背景下干旱和半干旱区干湿趋势的变化。

### 参考文献

- [1] Manabe, S., R.T. Wetherald, and R.J. Stouffer, 1981, Summer dryness due to an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, *Climate Change*, 3(4), 336-376.
- [2] Manabe, S., and R. Wetherald, 1987, Large scale Changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44, 1211-1235.
- [3] Wetherald, R. T., and S. Manabe, 1999, Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming, *Climatic Change*, 43, 495-511.
- [4] Wetherald, R. T., and S. Manabe, 2002, Simulation of hydrologic changes associated with global warming, *Journal of Geophysical Research*, 107(D19), 4379-4702.
- [5] Ma Zhuguo, Fu Congbin, 2003, Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China, *Global and Planetary Change*, 37, 189-200.
- [6] 施雅风主编,中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估,北京:气象出版社,2003, 124pp.



- [7] 姜逢清、胡汝骥、马虹, 1988, 新疆气候与环境的过去、现在及未来情景, 干旱区地理, 21(1), 1~9.
- [8] 施雅风、沈永平、胡汝骥, 2002, 西北前后由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨, 冰川冻土, 24(3), 219~226.
- [9] 马道典、张莉萍、王前进等, 2003, 暖湿气候对赛里木湖的影响, 冰川冻土, 25(2), 219~223.
- [10] 杨莲梅, 2003, 新疆极端降水的气候变化, 地理学报, 58(4), 577~583.
- [11] New M., M. Hulme, and P. Jones, 2000, Representing twentieth-century space-time climate variability, Part II: development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate, *J. of Climate*, 13, 2217-2238.
- [12] Snyers, R., On the statistical analysis of series of observations, Technical Note, 143, WMO, Geneva, 1990, 11.
- [13] Thomthwaite, C. W., 1948, An approach toward a rational classification of climate, *Geog. Rev.* 38, 55-94.
- [14] 马柱国、魏和林、符淙斌, 2000, 中国东部区域土壤湿度的变化和强化变率的关系, 气象学报, 58(3), 278~287.

## Multi-scale Temporal Characteristics of the Drought/Wetness over Northern China in Last Century

MA Zhuguo and HUANG Gang

Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, START Regional Center for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** In this paper, a humid index, which includes both the impact of surface air temperature change and precipitation variation on potential evaporation, has been set up using monthly mean temperature and monthly precipitation. And then the different time scale characteristics of trend of drought/wetness over northern China in last century have been detected and analyzed, some evidences of the influence of warming on surface drought/wetness state were found. There are different trends of drought/wetness variation in the four periods from 1901 to 1998, 1951-2002, 1981-2002, and 1991-2002. The results show that there are widely dry trends over northern China under regional warming in last 50 years. In west part of northwest China, the situation of drought in the region has not changed though precipitation is increasing. The reason is that warming results in the increase of potential evaporation, and the increasing precipitation can't compensate the loss of water in surface due to the increasing potential evaporation. And there are not significant wetting trends in this region. It is noted that the precipitation and the index in some areas of northern China show the opposite trends. For the scales in last 100 years and in 20 years, there is a drying period in most regions of west China. But in the central part of northern China, there is a significant trend of drought at temporal scales of last 50 years scale and last 20 years.