

## 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征

马柱国<sup>1</sup> 黄 刚<sup>1</sup> 甘文强<sup>2</sup> 陈明林<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

2 贵州省安顺市气象局, 安顺 516000

**摘 要** 利用 CRU(Climat Research Unit)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)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段干湿变化趋势的基本特征。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, 显著变湿的范围较降水增加的范围大, 且强度明显增强, 这与这个地区温度的降低有关。在近 50 年, 100°E 以东的北方地区是明显的干旱化趋势; 西北西部显著变湿的范围较降水显著增加的范围为小, 而东部干旱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, 也就是加剧降水减少的干旱化程度。在近 20 年, 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, 这个时段北方大部分地区仍然以干旱化趋势为主。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 年时段上, 我国西部大部分地区仍处在一个干旱化的进程中, 而华北地区在 20 年和 50 年时段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**文章编号** 1006-9895(2005)05-0671-11**中图分类号** P462**文献标识码** A**Multi-Scale Temporal Characteristics of the Dryness/Wetness over Northern China During the Last Century**MA Zhu-Guo<sup>1</sup>, HUANG Gang<sup>1</sup>, GAN Wen-Qiang<sup>2</sup>, and CHEN Ming-Lin<sup>2</sup>1 *START Regional Center for Temperate East Asia Key Laboratory of Regional Climate - Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*2 *Anshun Meteorological Bureau of Guizhou Province, Anshun 516000*

**Abstract** 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 from Climate Research Unit (CRU). The CRU air temperature and precipitation data in China are compared with the observations from China 160 stations, and the gridded data agree well the observations in general. Based on the index, the dryness/wetness trends over northern China during the last century at different time scales (1901-1998, 1951-2002, 1981-2002, and 1991-2002) are detected and analyzed systematically, and the warming impact on the surface dryness/wetness state is studied. The characteristics of the dryness/wetness trends in four periods in northern China are presented.

**收稿日期** 2004-04-22, 2005-03-23 收修定稿**资助项目** 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-229 和国家自然科学基金资助项目 40375028**作者简介** 马柱国, 男, 1963 年出生, 研究员, 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, 主要从事气候变化研究。  
E-mail: mazg@tea.ac.cn

The results show that there are different variation trends of dryness/wetness during four periods 1901 - 1998, 1951 - 2002, 1981 - 2002, and 1991 - 2002, respectively. Over the last 100 years, there exists no wetting trend in western China due to the warming impact in spite of the precipitation increase. The reason is that warming results in the increase of potential evaporation, and the increasing precipitation cannot compensate the loss of water at surface due to the increasing potential evaporation. As a result, although the precipitation may become more in some regions, the warming effect will offset the wetting impact of precipitation increase and the wetting trend cannot occur in these regions. However the obvious wetting trend is located in the eastern regions where the precipitation increases, and the wetting range is wider than the range of the precipitation increase, even with more enhanced amplitude for the wetting trend. This phenomenon can be attributed to the local temperature decrease, which leads to the reduced potential evaporation and enhances the wetting trend.

Over the last 50 years, there is the obvious aridification in northern China to east of  $100^{\circ}\text{E}$ , and the marked wetting range in the western part of Northwest China is smaller than the range of precipitation increasing. And the drying range in the eastern part of Northwest China is larger than the range of precipitation decreasing. This shows that warming can weaken the effect of precipitation increase on the surface water budget, in other words, it enhances the drought resulting from the reduced precipitation. Over recent 20 years, although the precipitation increases in the northern part of Xinjiang Uygur Autonomous Region, it has not changed the spatial pattern of aridity, and the arid trend still exists in most regions of the northern part under regional warming. It should be noticed that the precipitation and the index in some areas of northern China show the opposite trends for wetting or drying variation, which reflects that the impact of air temperature on surface dryness or wetness should be considered when the drying or wetting trend is analyzed. At the temporal scales over the last 100 years and 20 years, the aridification in most regions of western China is still in progress. And the arid trends occur in North China at the scales of latest 20 and 50 years.

**Key words** precipitation and surface air temperature, warming, dry-wet index, variation trend, northern China, wetting

## 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,利用传统狭义的降水变化已经无法客观地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?准确回答这些问题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, 并对不同时段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

本文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  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (经度  $\times$  纬度)。关于这个资料在文献[11]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<sup>①</sup>。

### 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地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期的干湿演变趋势。

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, 月潜在蒸发量  $P_{ei}$  利用改进的计算方法<sup>[12]</sup>, 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。改进后的  $P_{ei}$  计算公式如下:

$$P_{ei} = \begin{cases} 0 & T_i \leq 1^\circ\text{C} \\ 1.6d(10T_i/I)^a \times 10 & 1^\circ\text{C} < T_i \leq 26.5^\circ\text{C} \\ a_1 + a_2 T_i + a_3 T_i^2 & T_i > 26.5^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d$  为每月的天数除以 30(12 个月均除以 30), 这是除加热指数以外另一个确定潜在蒸发力的经验常数, 当为 28 或 29 天时,  $d$  的值是小于 1 的, 当月天数为 31 时,  $d$  大于 1。  $T_i$  为月平均温度,  $a = 0.49239 + 1.792 \times 10^{-2} I - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 6.75 \times 10^{-7} I^3$ ,  $I = \sum_1^{12} i$  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就可近似计算潜在蒸发量。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时段内参量的变化倾向, 所以在说明一个变量的趋势时, 必须指明这个趋势所发生的时段, 即趋势只在特定的时段有指示意义。为此, 我们把近百年分为近百年(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, 为了能更好地反映北方不同区域的趋势特征, 依据朱亚芬<sup>[13]</sup>和马柱国<sup>[14]</sup>的研究, 把我国北方共分为 5 个子区域, 东北一个区, 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。

为了进一步说明干湿指标的合理性, 同样, 我

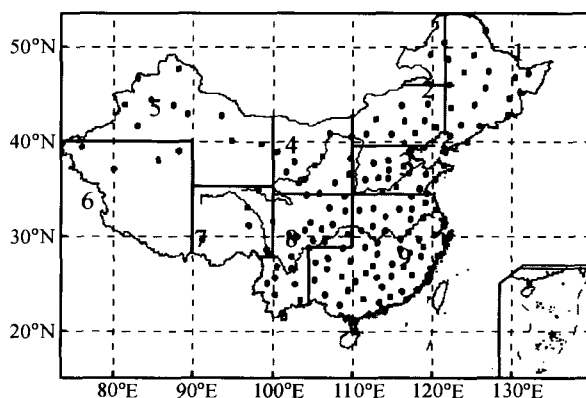


图 1 站点分布和区域划分示意图

Fig. 1 The diagram of observational sites and subregions

① 马柱国, 在中国区域 CRU (Climate Research Unit) 网格点资料和站点资料的对比, 2005, 待发表。

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>[15]</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 100 年的干湿变化趋势

图 2 为利用 M-K 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,实线阴影区为增温趋势显著的地区,虚线为增温区域,虚线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 可以发现,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 年时段上,西部(100°E 以西)降水主要为减少趋势(新疆北部除外),东部(100°E 以东)为增加趋势。

从图 2b 分析可知,95°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°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,我们无法从图 2a、b 上判断这两个地区的干湿趋势,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(与降水量对地表

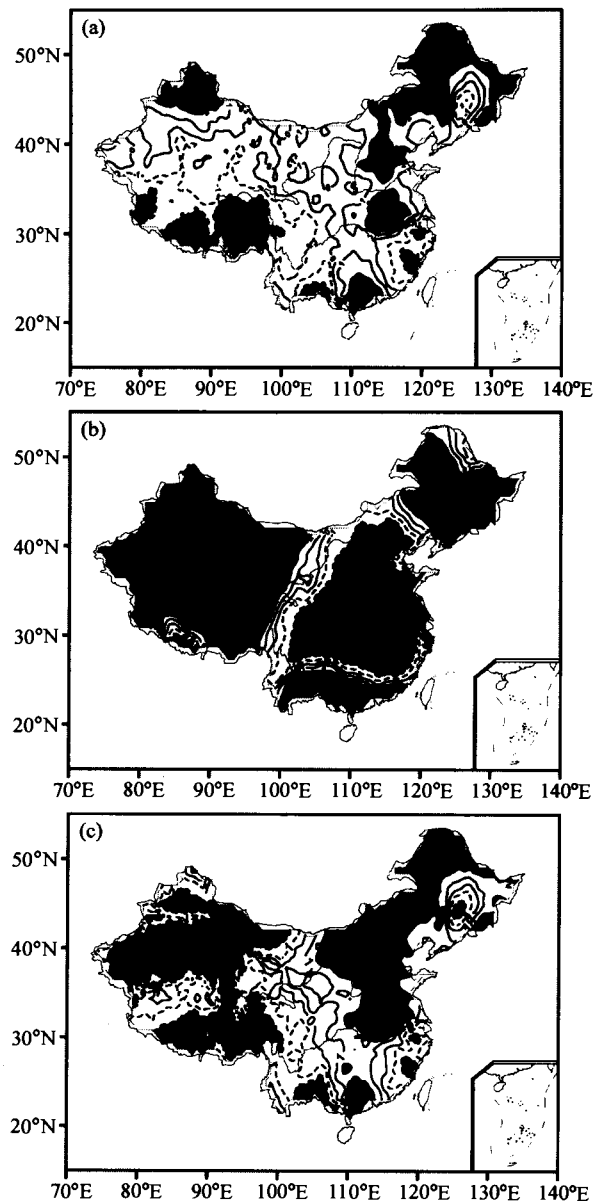


图 2 1901~1998 年中国降水(a)、气温(b)和干湿指标(c)的变化趋势(M-K 法)分布。阴影区为超过 95% 信度检验的地区

Fig. 2 The distributions of the trend of (a) precipitation, (b) surface air temperature and (c) dry-wet index over China from 1901 to 1998 (by M-K method, areas with the significance of 95% are shaded)

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,由于受增暖的影响,东北的东北部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 3 为北方 5 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, 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得更多, 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>。

为了更充分地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( $P-P_e$ )和降水  $P$  的年变化曲线及其各自的线性趋势。可以看出, 降水的线性趋势是增加的, 而干湿指标却为

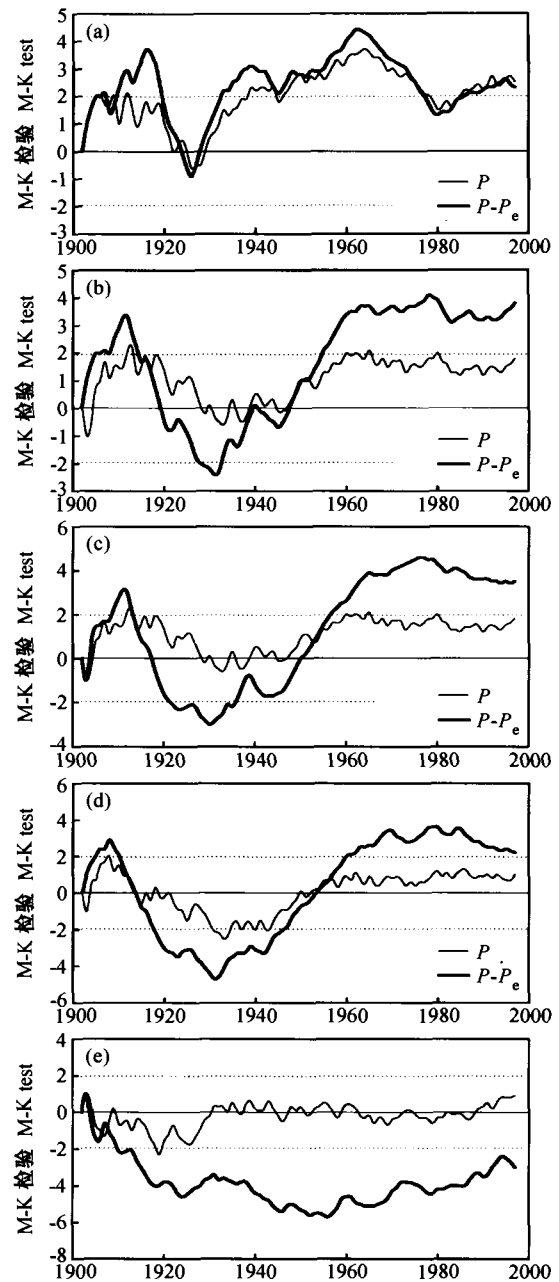


图 3 1901~1998 年降水( $P$ )、干湿指标( $P-P_e$ )的变化趋势(M-K 法): (a) 东北; (b) 华北北部; (c) 华北南部; (d) 西北东部; (e) 西北西部

Fig. 3 The trend of regional mean annual precipitation ( $P$ ) and dry-wet index ( $P-P_e$ ) in (a) Northeast China, (b) the northern part of North China, (c) the southern part of North China, (d) the eastern part of Northwest China and (e) the western part of Northwest China from 1901 to 1998 (by M-K method)

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。

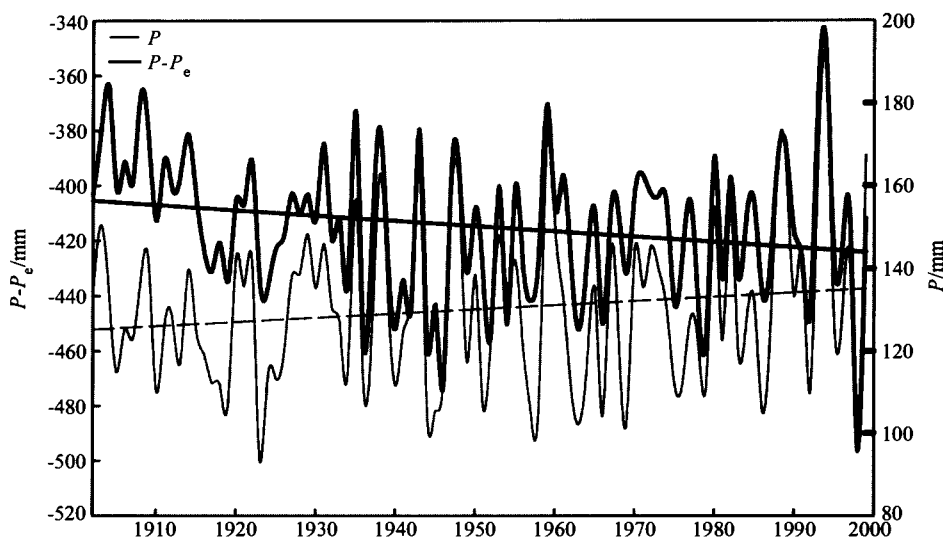


图4 西北西部地区平均降水和干湿指标线性变化趋势的比较

Fig. 4 The comparison of the trends of regional mean annual precipitation and dry - wet index in the western part of Northwest China from 1901 to 1998

表1 1901~1998年全国9个分区干湿指标、降水和温度的线性变化趋势

Table 1 The linear trend of precipitation, surface air temperature and dry - wet index in the nine subregions of China from 1901 to 1998

| 参数<br>Parameters   | 分区 Subregions |       |       |       |        |        |        |       |       |
|--------------------|---------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
|                    | 1             | 2     | 3     | 4     | 5      | 6      | 7      | 8     | 9     |
| $P-P_e/\text{mm}$  | 51.47         | 65.26 | 99.41 | 20.55 | -18.62 | -19.75 | -23.98 | -0.65 | 47.33 |
| $P/\text{mm}$      | 60.83         | 37.01 | 51.64 | 8.87  | 9.75   | -17.64 | -21.22 | -6.38 | 35.83 |
| $T/^\circ\text{C}$ | 0.96          | -0.27 | -0.78 | -0.04 | 1.29   | 0.79   | 0.36   | -0.14 | -0.27 |

表1给出了全国9个区干湿指标、降水和温度的线性趋势,我们发现,在5区(西北西部),降水的增加趋势是 $9.75 \text{ mm} \cdot (98 \text{ a})^{-1}$ ,而干湿指标的趋势却是 $-18.62 \text{ mm} \cdot (98 \text{ a})^{-1}$ ,两者的变化趋势是完全相反,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,降水变化可定性地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。

### 3.2 近50年的干湿变化趋势

同样,用类似于上面的分析,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,阴影区所代表的意义与图2相同。比较图5a和图2a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2a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,近50年来降水量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°E 以东、30°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。但这些现象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 5 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, 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

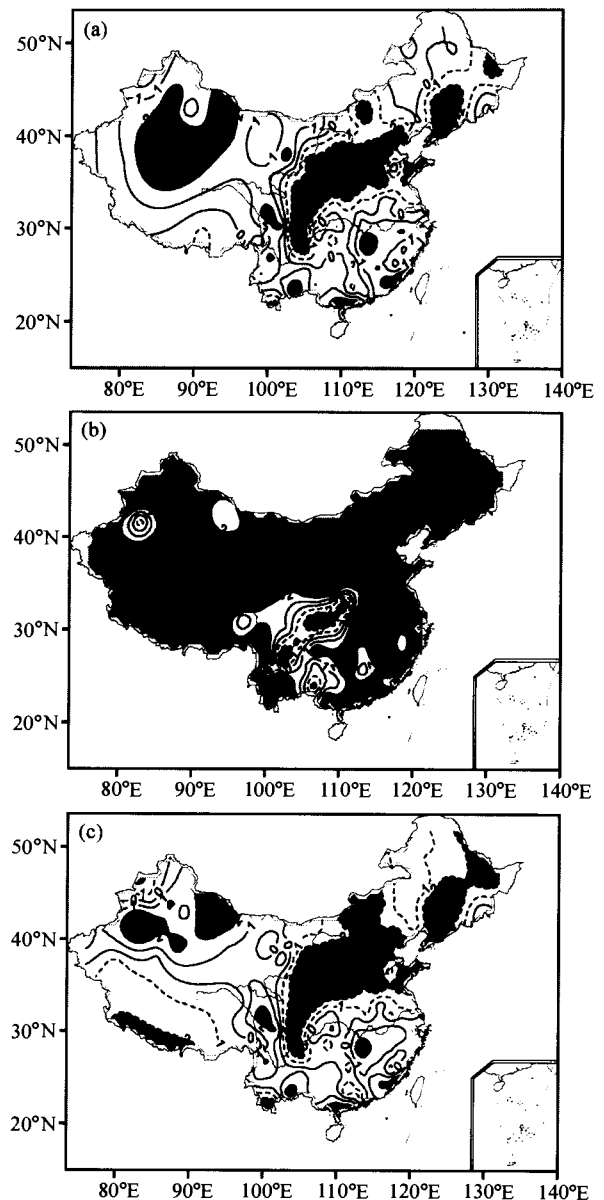


图 5 1951~2002 年年降水、气温和干湿指数的变化趋势(其他说明同图 2)

Fig. 5 The trend of annual precipitation, mean surface air temperature and dry - wet index over China from 1951 to 2002 (others are the same as Fig. 2)

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

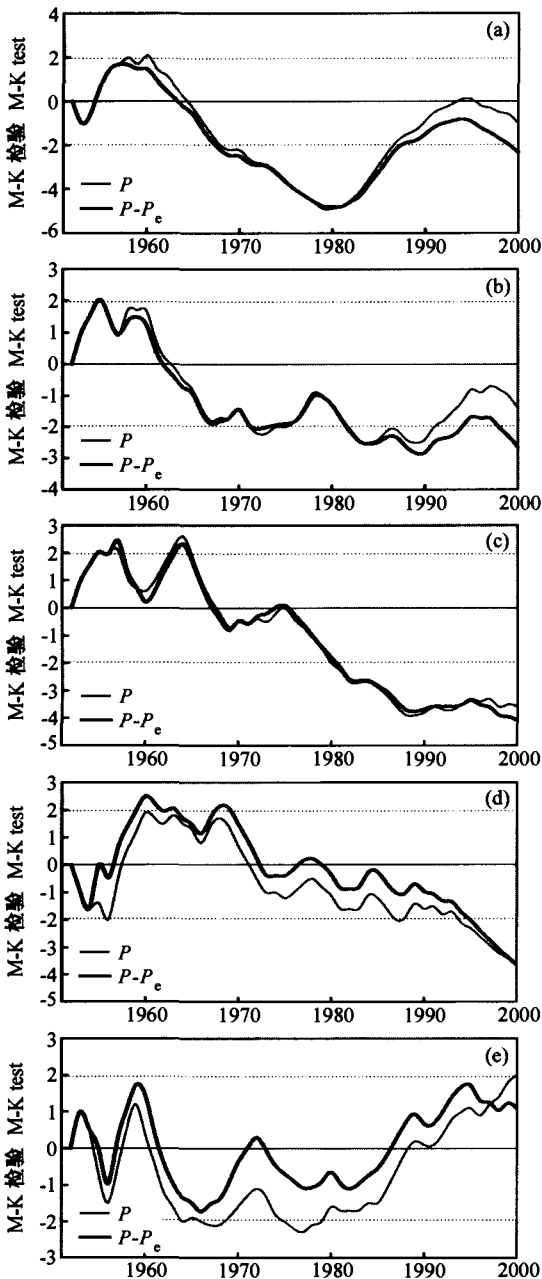


图6 1951~2002年降水、干湿指标的变化趋势(M-K法): (a) 东北; (b) 华北北部; (c) 华北南部; (d) 西北东部; (e) 西北西部

Fig. 6 The trend of regional mean annual precipitation and dry-wet index in (a) Northeast China, (b) the northern part of North China, (c) the southern part of North China, (d) the eastern part of Northwest China and (e) the western part of Northwest China from 1951 to 1998 (by M-K method)

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。仔细分析还可以发现,在东北和华北地区,20世纪80年代中期以前,降水和干湿指标的趋势检验曲线基本重合,而在20世纪80年代以后,两条趋势线就有明显的差异。大家知道,20世纪80年代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,干湿指标的变化趋势明显受到增暖的影响,这也正是干湿指标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(其他说明同图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、内蒙古以外,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分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

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



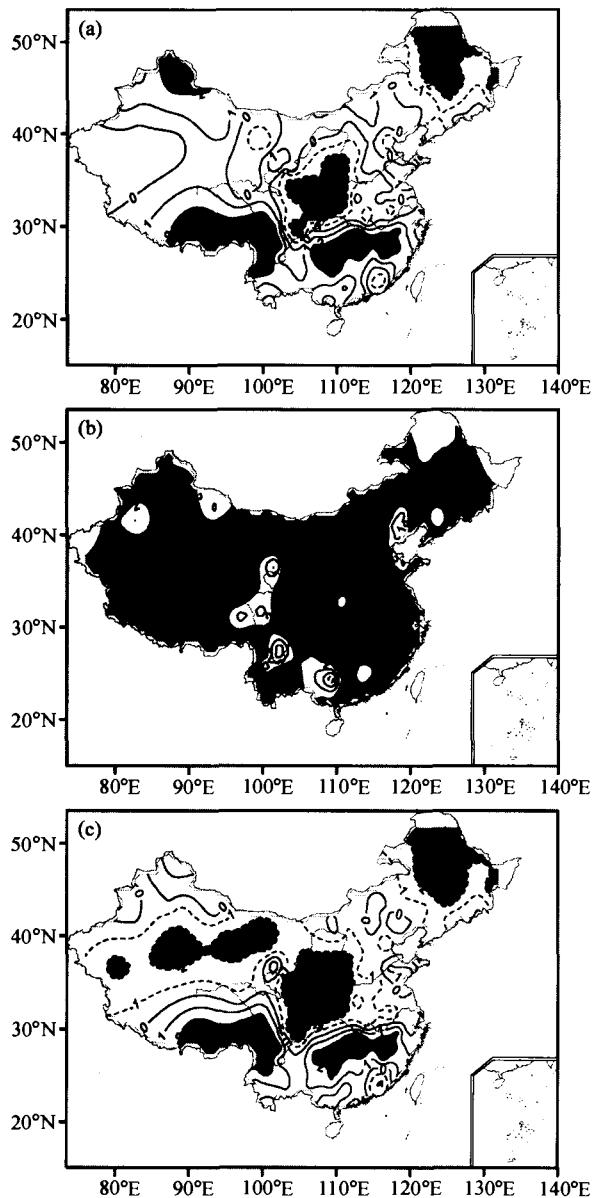


图 7 1981~2002 年中国区域降水(a)、气温(b)和干湿指数(c)的变化趋势(其他说明同图 2)

Fig. 7 The trend of (a) annual precipitation, (b) surface air temperature and (c) dry - wet index over China from 1981 to 2002 (others are the same as Fig. 2)

水减少, 而另外一些区域, 温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)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, 西北西部降水增加的大部分地区在图 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 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。在温度变化趋势上(图 8b), 东部季风区和西北地区均为显著的增暖趋势, 其他地区也有增暖迹象, 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°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。通过比较还可发现, 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

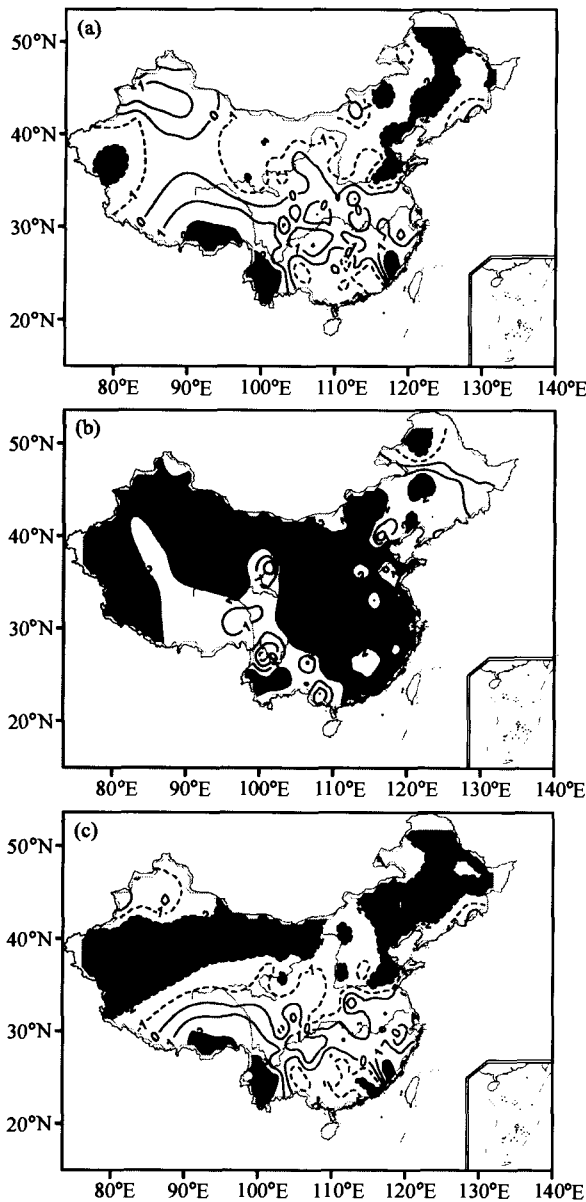


图8 1991~2002年降水(a)、气温(b)和干湿指数(c)的变化趋势(其他说明同图2)

Fig. 8 The trend of (a) annual precipitation, (b) surface air temperature and (c) dry - wet index over China from 1991 to 2002 (others are the same as Fig. 2)

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。

#### 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年内不同时段干湿指标的变化趋势进行了分析,尤其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,它更能客观地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,不同时段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段,也就是说,趋势是指某一特定时段上的特征。

通过分析不同时段我国北方地区的空间及区域平均的干湿指标变化,可得出以下几条结论:

(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,显著变湿的范围较降水显著增加的范围大,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,也就是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>[16]</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,但建立干湿指标不失为一种理想的途径。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 (References)

- [1] Manabe S, Wetherald R T, Stouffer R J. Summer dryness due to an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Climatic Change*, 1981, 3(4): 347~386

- [2] Manabe S, Wetherald R. Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, **44**: 1211~1236
- [3] Wetherald R T, Manabe S. Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming. *Climatic Change*, 1999, **43**: 495~511
- [4] Wetherald R T, Manabe S. Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D19): 4379, doi: 10. 1029/2001JD001195
- [5] Ma Zhuguo, Fu Congbin. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China. *Global and Planetary Change*, 2003, **37**: 189~200.
- [6] 施雅凤主编. 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  
Shi Yafeng (Editor in Chief). *Assessment of Climate Shift from Warm-Dry to Warm-Wet in Northwest China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 124pp.
- [7] 姜逢清, 胡汝骥, 马虹. 新疆气候与环境的过去、现在及未来情景. 干旱区地理, 1988, **21**(1): 1~9  
Jiang Fengqing, Hu Ruji, Ma Hong. Studies in past climate and its possible trend in Xinjiang. *Arid Land Geography* (in Chinese), 1988, **21**(1): 1~9
- [8] 施雅凤, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, **24**(3): 219~226  
Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2002, **24**(3): 219~226
- [9] 马道典, 张莉萍, 王前进, 等. 暖湿气候对赛里木湖的影响. 冰川冻土, 2003, **25**(2): 219~223  
Ma Daodian, Zhang Liping, Wang Qianjin, et al. Influence of warm-wet climate on Sailimu lake. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2003, **25**(2): 219~223
- [10] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化. 地理学报, 2003, **58**(4): 577~583  
Yang Lianmei. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58**(4): 577~583
- [11] New M, Hulme M, Jones P D. Representing twentieth-century space-time climate variability, Part II: Development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate*, 2000, **13**: 2217~2238
- [12] Sneyers R. On the Statistical Analysis of Series of Observations. Technical Note, 143, WMO, Geneva, 1990, 11
- [13] 朱亚芬. 530年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变. 地理学报, 2003, **58**(增刊): 100~107  
Zhu Yafen. The regional division of dryness/wetness over eastern China and variations of dryness/wetness in northern China during the last 530 years. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58**(Suppl. ): 100~107
- [14] Ma Zhuguo, Dan Li. The extreme dry/wet events in northern China during recent 100 years. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, **14**(3), 275~281
- [15] Thomthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 1948, **38**: 55~94
- [16] 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. 气象学报, 2000, **58**(3): 278~287  
Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, **58**(3): 278~287