

近 46 年青藏高原干湿气候区动态变化研究

毛飞^{1, 2} 唐世浩³ 孙涵⁴ 张佳华²

1 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 国家卫星气象中心, 北京 100081

4 国家卫星气象中心遥感应用试验基地, 南宁 530022

摘 要 利用青藏高原 62 个气象站 1961~2006 年逐日气象资料, 用世界粮农组织 (FAO) 在 1998 年推荐的、并唯一承认的 Penman-Monteith 模式计算潜在蒸散量; 比较了降水量、积雪降水比、气温降水比、蒸散降水比和降水蒸散比 5 种湿润度指标在青藏高原的适用性, 用常规统计方法和墨西哥帽小波变换分析青藏高原各气候区干湿状况及其界线的动态变化。结果表明: 5 种指标中, 用降水蒸散比得到的青藏高原湿润、半湿润、半干旱、干旱和极端干旱气候区的分区结果比较合理; 近 46 年来青藏高原大部分地区湿润度和每个气候区的平均湿润度均呈增加趋势, 半干旱和半湿润气候区的界线呈向西北推进趋势, 气候在向暖湿方向发展。

关键词 青藏高原 干湿气候区 动态变化

文章编号 1006-9895 (2008) 03-0499-09

中图分类号 P463

文献标识码 A

A Study of Dynamic Change of Dry and Wet Climate Regions in the Tibetan Plateau over the Last 46 Years

MAO Fei^{1, 2}, TANG Shi-Hao³, SUN Han⁴, and ZHANG Jia-Hua²

1 *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

3 *National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*

4 *Remote Sensing Application and Experiment Station, National Satellite Meteorological Center, Nanning 530022*

Abstract Using daily meteorological data at 62 stations from 1961 to 2006 in the Tibetan Plateau, the potential evapotranspiration is estimated with the Penman-Monteith (recommended by FAO in 1998) model, and the five moisture indexes, which are precipitation, the ratio of accumulated temperature to precipitation, the ratio of air temperature to precipitation, the ratio of evapotranspiration to precipitation and the ratio of precipitation to evapotranspiration, are compared. The dry and wet conditions in each climate region and dynamic change of the boundaries between different climate regions in the Tibetan Plateau over the last 46 years are analyzed based on general statistic methods and Mexican Hat wavelet. The mainly results show that the distribution of humid, semi-humid, semi-arid, arid and extreme arid climate regions in the Tibetan Plateau given by using the ratio of precipitation to evapotranspiration is the most reasonable in the distributions given by using the five indexes. Over the last 46 years, the moisture index values in the most places of the Tibetan Plateau and the average moisture index values in each climate region increase and the boundary between the humid region and the semi-humid region moves northwestward. The cli-

收稿日期 2006-11-14, 2007-07-03 收修定稿

资助项目 中国气象局成都高原气象研究所资助项目 LPM2006019, 中国气象局气候变化专项 CCSF2006-13, 科技部社会公益项目 2003DIB4J144

作者简介 毛飞, 女, 1958 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事应用气象和生态环境研究。E-mail: maofei77@cma.gov.cn

mate in the Tibetan Plateau changes toward warm-wet climate.

Key words the Tibetan Plateau, the dry and wet climate regions, dynamic change

1 引言

青藏高原平均海拔 4000 m, 总面积约为 290 万平方公里, 是地球上海拔最高和异常独特的地理单元, 是中国、东南亚和南亚地区主要江河的发源地和上游流经地区, 素有“江河源”、“生态源”之称, 其大地形作用对周边地区乃至全球的气候和生态环境变化有显著的影响, 被认为是东半球的气候启动器和全球的气候调节器^[1, 2]。当前, 全球气候正经历着以变暖为主要特征的前所未有的显著变化, 在全球变暖大背景下, 青藏高原近 46 年来各气候区的地表水分平衡状况也会发生相应的变化, 有些地区变干, 有些地区变湿^[3]。一个地区的气候干湿条件改变后, 干湿气候区的界线也会随之变动。

有关干湿气候区划分指标的研究工作自 20 世纪 60 年代以来已经有大量的论文和专著发表。我国学者最初用年降水量来划分干湿气候区, 它简便、意义明确, 但只考虑了水分的收入项, 没有水分平衡的概念。后来发展了多种引入温度、蒸发等因子的综合指标, 常见的有积温降水比、气温降水比、蒸散降水比和降水蒸散比等。其中降水蒸散比是目前最常用的指标, 但由于不同研究者选用的蒸散量计算方法不同, 干湿气候区界线的划分阈值也不尽相同^[2, 4~6]。通过比较, 从众多指标中选出一个适合于青藏高原干湿气候区划分的指标, 这方面的工作迄今还未见有文献报道。同时, 有关干湿气候区界线的年代际变化的研究, 国内学者做了一些^[7, 8], 但开展得还不够, 尤其对近 46 年青藏高原湿润、半湿润、半干旱、干旱、极端干旱气候区分界线的波动, 迄今还未见到相关的研究文章。

本文试图通过分析比较国内几种常用的湿润度指标, 确定适合青藏高原极端干旱、干旱、半干旱、半湿润和湿润气候区划分的指标, 根据它进一步分析各气候区干湿状况及其他他们之间的界线近 46 年来的动态变化。这将是一项基础性的、应用广泛的工作, 对青藏高原及其周边地区气候资源的合理利用、生态环境评价和保护以及土地荒漠化的研究具有重要意义。

2 资料来源及其计算方法

青藏高原 62 个站 1961~2006 年的逐日气象资料 (包括平均气温、最高气温、最低气温、水汽压、日照时数、风速、降水量等要素) 来自中国气象局国家信息中心气象资料室。

采用世界粮农组织 (FAO) 在 1998 年推荐的、并唯一承认的 Penman-Monteith 模式计算潜在蒸散量^[9]:

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}, \quad (1)$$

式中, E_0 为潜在蒸散量 (单位: mm/d), R_n 为地表净辐射 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), T 为 2 m 高度处平均气温 (单位: $^{\circ}\text{C}$), U_2 为 2 m 高度处风速 (单位: m/s), e_s 为饱和水汽压 (单位: kPa), e_a 为实际水汽压 (单位: kPa), Δ 为饱和水汽压曲线斜率 (单位: kPa/ $^{\circ}\text{C}$), γ 为干湿表常数 (单位: kPa/ $^{\circ}\text{C}$)。

小波分析被公认为继傅里叶分析方法以来纯粹数学与应用数学完美结合的又一个新的里程碑, 它不仅能反映信号在时频域上的总体特征还能提供局部化的信息, 既可给出信号变化的时间尺度, 也可以显示出信号变化的时间位置, 还具有对突变点的诊断能力。由于上述特点, 小波分析已在许多领域得到广泛的应用, 在气候变化分析和气候预测方面也有许多成功的例子^[10~12]。

本文取小波母函数 $\Psi(t)$ 为

$$\Psi(t) = (1 - t^2) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad -\infty < t < \infty, \quad (2)$$

式中, t 为时间。

3 干湿气候区的划分

3.1 干湿气候区划分指标的选取

选取国内外常用的降水量 (P)、积温降水比 (K_{cp})、气温降水比 (K_{tp})、蒸散降水比 (K_{ep}) 和降水蒸散比 (K_{pe}) 五个指标, 其中降水蒸散比 (K_{pe}) 是目前最常用的指标。虽然 K_{pe} 和 K_{ep} 互为倒数,

但不同的研究者在进行干湿气候区划分时,对相近的指标,或者是同一个指标,如果采用的分区阈值(分界线具体的值)不同,得到的分区结果是不一样的。因此,本文选了这五种指标以及前人用过的分区阈值进行比较,其中降水量(P)的单位为 mm,其他四种指标分别为:

(1) 积温降水比(K_{cp})

$$K_{cp} = \frac{0.16 \sum T}{\sum P},$$

(3)

其中, $\sum T$ 为一年中大于等于 10°C 的积温(单位: $^{\circ}\text{C}$); $\sum P$ 为与 $\sum T$ 同期的降水量(单位: mm)。

(2) 气温降水比(K_{tp})

$$K_{tp} = \frac{kT_s}{P_s},$$

(4)

其中 T_s 为夏季三个月(6~8 月)平均气温(单位: $^{\circ}\text{C}$), P_s 为夏季三个月的总降水量(单位: mm), k 为系数($k=17.5$)。

(3) 降水蒸散比(K_{pe})

$$K_{pe} = \frac{P}{E_0}.$$

(5)

(4) 蒸散降水比(K_{ep})

$$K_{ep} = 1/K_{pe}.$$

(6)

上述五种指标对不同干湿气候区的划分阈值见表 1。

3.2 不同干湿气候区分区结果比较

青藏高原地形复杂,气候独特,为了确定适合青藏高原气候条件的干湿气候区划分指标,选用表 1 中五种指标,计算 62 个站历年的五种指标值,分别用这五种指标的 46 年平均值和表 1 中的分区阈值,对青藏高原干湿气候区进行划分(图 1)。

用降水量(P)划分干湿气候区(图 1a),青藏高原从东南向西北气候逐渐变干,依次分布着湿润、半湿润、半干旱和干旱气候区,其中湿润区分布在西藏的东南部,半湿润区主要分布在西藏东南

部和青海的东南角,二者的面积之和只占总面积的约 15%,其他广大的地区为半干旱、干旱气候区,约占 85%。用积温降水比(K_{cp}),干湿气候的分布趋势与降水量基本一致,但位于青藏高原东南部的湿润、半湿润气候区面积明显扩大,约占总面积的 60%(图 1b)。用气温降水比(K_{tp})进行分区,青藏高原干湿气候区的分布趋势与积温降水比(K_{cp})基本相同,但湿润气候区面积进一步扩大(图 1c)。用蒸散降水比(K_{ep}),结果与降水量基本一致,但干旱、半干旱气候区的面积有所扩大,其中干旱区约占 50%,且没有湿润区(图 1d)。用降水蒸散比(K_{pe})得到的青藏高原干湿气候区分布趋势(图 1e)与上述四种方法基本一致,从东南向西北气候逐渐变干,并依次分布着湿润、半湿润、半干旱、干旱和极端干旱气候区,其中湿润、半湿润区主要分布在东南部,约占总面积的 25%,极端干旱气候区主要分布在青海的柴达木盆地,约占 10%,其他地区为干旱、半干旱气候区。

与青藏高原的实际情况和前人的研究成果^[2]相比,上述五种分区结果中,前四种的偏差较大,而第五种(降水蒸散比)比较接近。此外,用降水量(P)作为指标,只考虑了水分的收入项,欠全面。用积温降水比(K_{cp}),计算简单,物理意义比较明确,但适用范围有限。青藏高原气候寒冷,大部分地区一年中日平均气温大于等于 10°C 的天数非常少, K_{cp} 值显著偏小。6、7、8 月是青藏高原的雨季,而同期的气温却显著低于相同降水量的其他地区,导致气温降水比(K_{tp})也显著偏小。本文选用的潜在蒸散量计算方法[公式(1)]综合考虑了气温、日照、空气湿度、风速以及地理位置等因子对地表水分支出项的影响,因此,降水量与它的比值不但考虑了水分的收入和支出项,其适用范围应更为广泛。蒸散降水比(K_{ep})和降水蒸散比(K_{pe})互为倒数,物理意义相同,应考虑的是分区阈值的取法。

本文认为上述五种指标都有各自的适用范围,没有绝对的合理或不合理。就青藏高原而言,用降水蒸散比比较适合,但在其他地区,是否也会得出相同的结论,还需要更多研究来验证。而且,在实际的研究和应用中,还有其他更多的指标,如马柱国等^[15, 16]根据降水和温度变化对潜在蒸发的影响构建了一个干湿指标,并对我国北方近 100 年、50

表 1 5 种干湿气候区指标阈值

Table 1 Thresholds of five dry and wet climate region indexes

气候区	$P^{[13]}$	$K_{cp}^{[13]}$	$K_{tp}^{[5]}$	$K_{ep}^{[13]}$	$K_{pe}^{[14]}$
过湿		≤ 0.49			
湿润	≥ 800	$0.5 \sim 0.99$	≤ 1	≤ 1.0	> 0.65
半湿润	$550 \sim 800$	$1.0 \sim 1.49$	$1 \sim 1.5$	$1.0 \sim 1.49$	$0.5 \sim 0.65$
半干旱	$250 \sim 550$	$1.5 \sim 3.99$	$1.5 \sim 5$	$1.5 \sim 3.49$	$0.2 \sim 0.5$
干旱	< 250	≥ 4.0	$5 \sim 20$	≥ 3.5	$0.05 \sim 0.20$
极端干旱			≥ 20		< 0.05

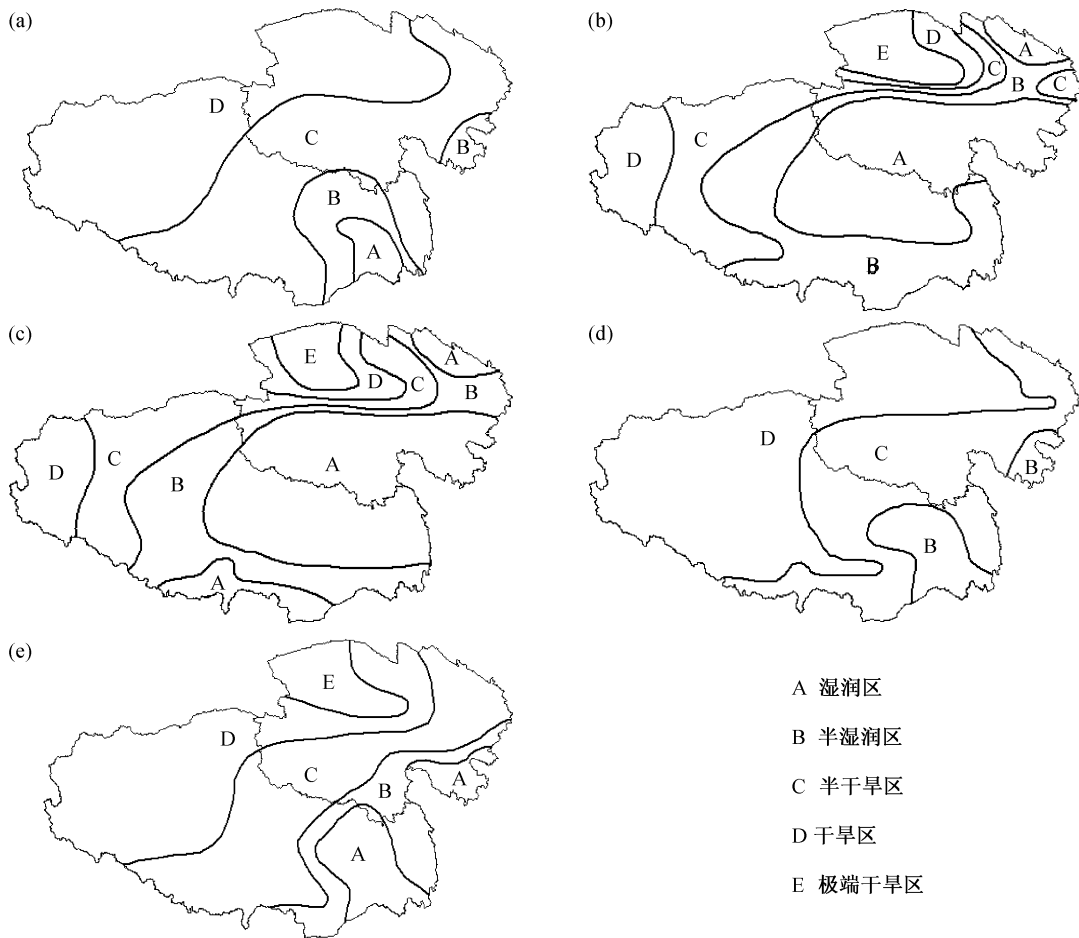


图1 青藏高原干湿气候区分布图: (a) 降水量; (b) 积温降水比; (c) 气温降水比; (d) 蒸散降水比; (e) 降水蒸散比
Fig. 1 Distribution of dry and wet climate regions in the Tibetan Plateau: (a) Precipitation; (b) ratio of accumulated temperature to precipitation; (c) ratio of air temperature to precipitation; (d) ratio of evapotranspiration to precipitation; (e) ratio of precipitation to evapotranspiration

年、20 年和 10 年的干湿变化趋势进行系统分析, 得到了一些有参考价值的结论。因此, 对某个区域, 用哪一种指标最合适, 是今后需要进一步研究的科学问题。

4 气候区界线的动态变化

根据上述分析, 用降水蒸散比 (图 1e) 与实际情况比较相符, 但图 1e 只反映了近 46 年的平均状况。目前, 对于干湿气候区分区指标的称呼还没有一个统一的名字, 有的称干燥度, 有的称湿润度, 还有的称干燥指数或湿润指数等等, 本文根据选定的降水蒸散比, 其值越大, 表示气候越湿润的特点, 因此, 在以下的分析论述中称其为湿润度。

利用青藏高原 62 个气象站 1961~2006 年逐日气象资料, 用公式 (1) 和 (5) 计算各站历年的湿润

度、降水量和潜在蒸散量, 对每个站 46 年的湿润度、年降水量和年潜在蒸散量进行线性拟合, 用线性拟合方程的斜率来表示它们的年变率, 并分析它们的空间分布规律 (图 2)。由图 2a 可知, 青藏高原大部分地区湿润度呈增加趋势, 只有约 15% 的地区呈减少趋势, 主要分布在青海的东南部和西藏的南部, 可知青藏高原大部分地区气候在向湿润的方向发展。年降水量呈减少趋势的地区的空间分布与湿润度基本相同, 但面积略缩小 (图 2b)。年潜在蒸散量呈增加趋势的地区约占青藏高原总面积的 25%, 主要分布在西藏的东南部以及青海的东南部和西部的部分地区 (图 2c)。由此可知, 青藏高原大部分地区气候向湿润的方向发展的主要原因是这些地区大都年降水量呈增加趋势以及年潜在蒸散量呈减少趋势。

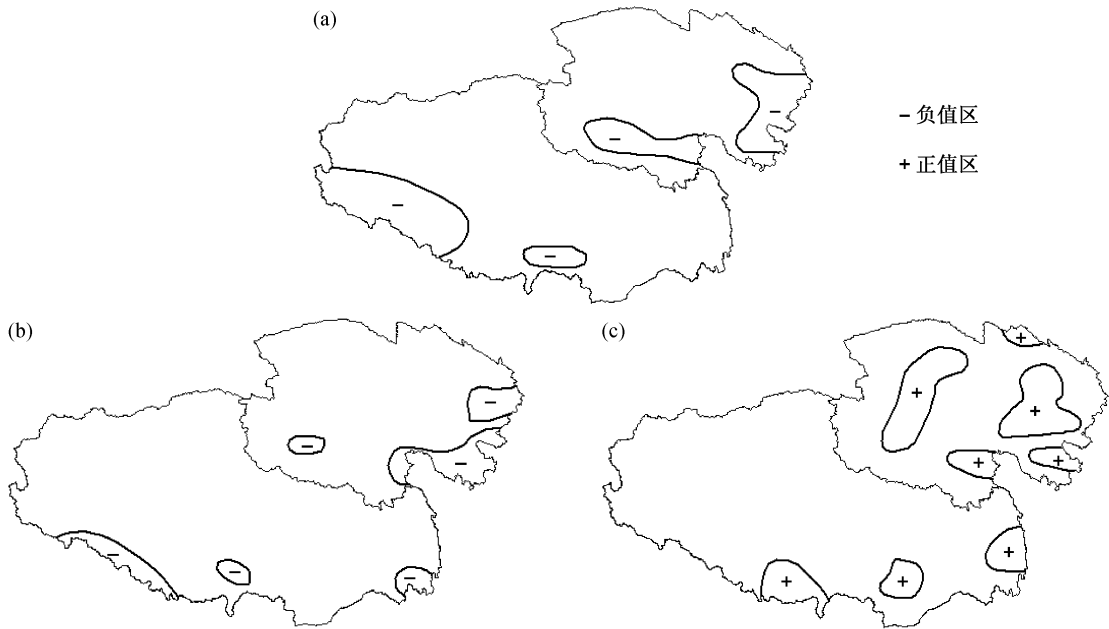


图 2 青藏高原气候年变率：(a) 湿润度；(b) 降水量；(c) 潜在蒸散量

Fig. 2 Annual climate variability in the Tibetan Plateau: (a) Moisture index; (b) precipitation; (c) potential evapotranspiration

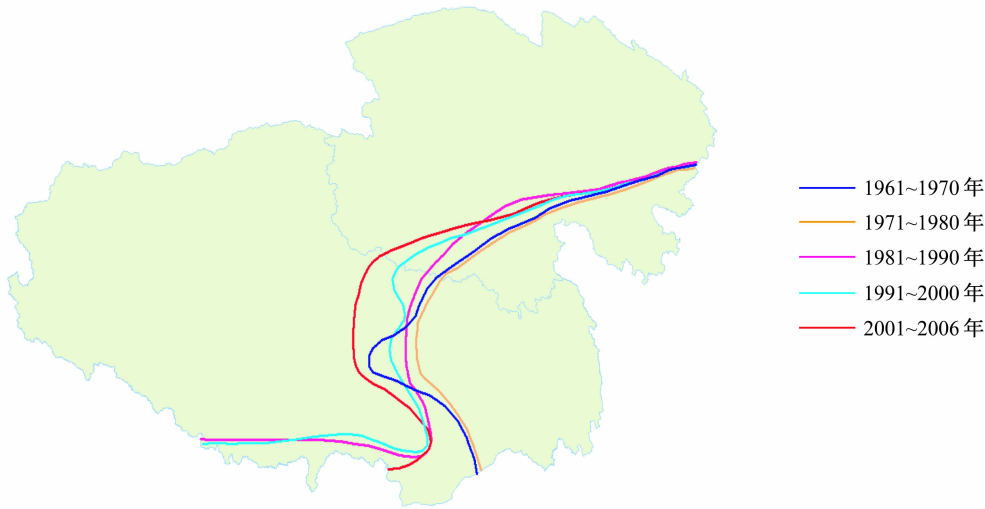


图 3 青藏高原半湿润半干旱分界线动态变化

Fig. 3 Dynamic change of the boundaries between semi-humid and semi-arid climate regions in the Tibetan Plateau

由图 2a 可知，在半湿润、半干旱区，湿润度年变率正负交错出现最频繁，而且又是青藏高原主要的农牧区，半湿润与半干旱气候区的分界线是气候由湿润向干旱转变的重要标志，因此，本文重点分析半湿润、半干旱区分界线的变动情况。

按 1961~2006 年期间的 5 个年代（2001~2006 年只有 6 年），分别求湿润度的年代平均值，得到每个年代的半湿润、半干旱区分界线，分析其年代际的摆动情况（图 3）。从图 3 可以看出，不同

年代半湿润、半干旱区分界线的东南边是半湿润、湿润气候区，西北边是半干旱、干旱、极端干旱气候区。这些分界线的年代际摆动比较大，摆动的方向主要是向西北推进或往东南退缩，摆动的幅度从分界线的东北端至西南端逐渐增大。在 5 个年代中，湿润、半湿润气候区的面积 2001~2006 年最大，20 世纪 90 年代次大，80 年代又次之，70 年代最小，60 年代在 70 年代和 80 年代之间。1961~1980 年湿润、半湿润气候区的面积表现出缩小的

趋势, 1971~2006 年湿润、半湿润气候区的面积呈扩大趋势。

5 各气候区湿润指标的小波特征

小波分析的特点是在不同的时间频率下表现出变量随时间变化的特征。本文根据图 1e 青藏高原干湿气候区的划分, 对每个干湿气候区的各气象站计算 1961~2006 年历年湿润度和湿润度距平值, 选取 46 年资料齐全的站, 求不同气候区内历年湿润度的平均值和距平值代表该气候区的平均状况, 分析各气候区湿润度的年际变化趋势和湿润度距平值的小波特征 (图 4~8)。其中, 选湿润区 4 个站、

半湿润区 5 个站、半干旱区 17 个站、干旱区 4 个站、极端干旱区 5 个站。

由图 4a 可见, 青藏高原湿润气候区 1961~2006 年湿润度呈增加趋势, 增加率为 0.0005/a, 多年平均湿润度为 0.74。在 15 年时间频率附近 (图 4b), 主要出现了 5 个干湿交替期, 4 个突变点分别在 1968 年、1976 年、1991 年和 1997 年附近, 与对应的是 1968 年以前、1976~1991 年 (1984 年附近有一偏干的振荡) 和 1997 年以后的偏湿期, 1968~1976 年和 1991~1997 年的偏干期。在中高频区, 2005 年以后转为偏干期。2006 年以后偏干的可能性较大。

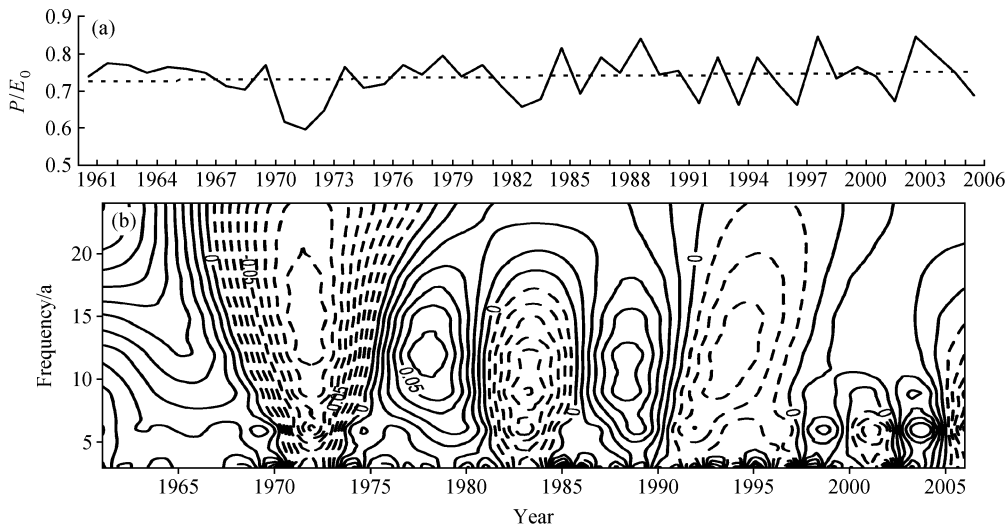


图 4 湿润区湿润度 (a) 及其距平小波 (b) 变化图
Fig. 4 Variation of (a) moisture index and (b) its anomaly wavelet in the humid climate region

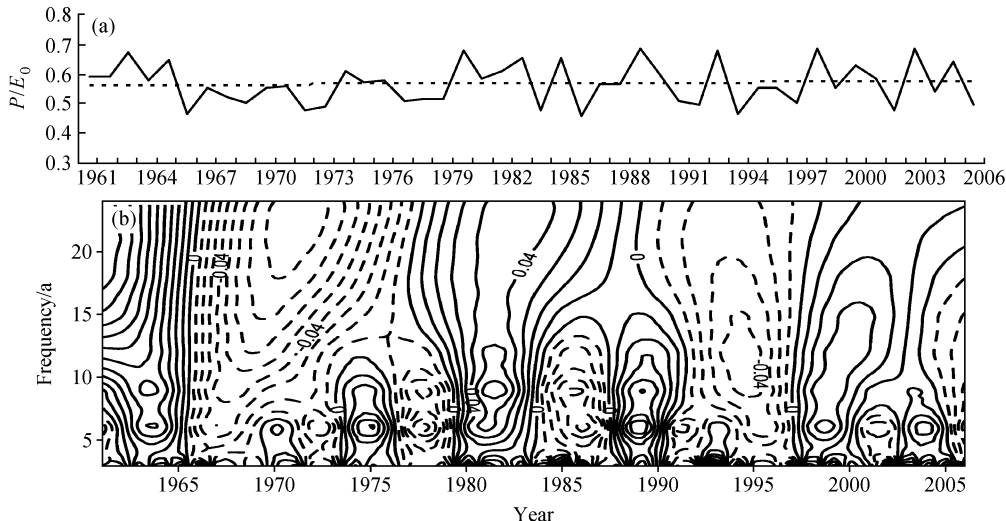


图 5 同图 4, 但为半湿润区
Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the semi-humid climate region

半湿润气候区 1961~2006 年平均湿润度为 0.57, 呈增加趋势 (图 5a), 增加率为 0.0002/a。在 15 年时间频率附近 (图 5b), 主要出现了 6 个干湿交替期, 5 个突变点的位置分别在 1965 年、1978 年、1990 年、1998 年和 2003 年附近, 与此对应的是 1965 年以前、1978~1990 年和 1998~2003 年的偏湿期, 1965~1978 年、1990~1998 年和 2003 年以后的偏干期。从不同时间频率看, 在 1965 年附近发生了一次强烈的振荡, 气候由偏湿期向偏干期转型。2006 年以后偏干的可能性较大。

半干旱气候区 1961~2006 年平均湿润度为 0.36, 呈增加趋势 (图 6a), 增加率为 0.0007/a。

在 15 年时间频率附近 (图 6b), 主要出现了 6 个干湿交替期, 5 个突变点的位置分别在 1965 年、1985 年、1991 年、1997 年和 2003 年附近, 与此对应的是 1965 年以前、1985~1991 年和 1997~2003 年的偏湿期, 1965~1985 年、1991~1997 年和 2003 年以后的偏干期。46 年中, 约在 1965~1985 年期间, 干湿的变化比较小, 以偏干为主, 1985 年以后, 干湿的交替相对比较频繁, 变化的强度比较大, 以偏湿为主。2006 年以后偏干的可能性较大。

干旱气候区 1961~2006 年平均湿润度为 0.12, 呈增加趋势 (图 6a), 增加率为 0.001/a。在 15 年时间频率附近 (图 7b), 主要出现了 6 个干湿交替期

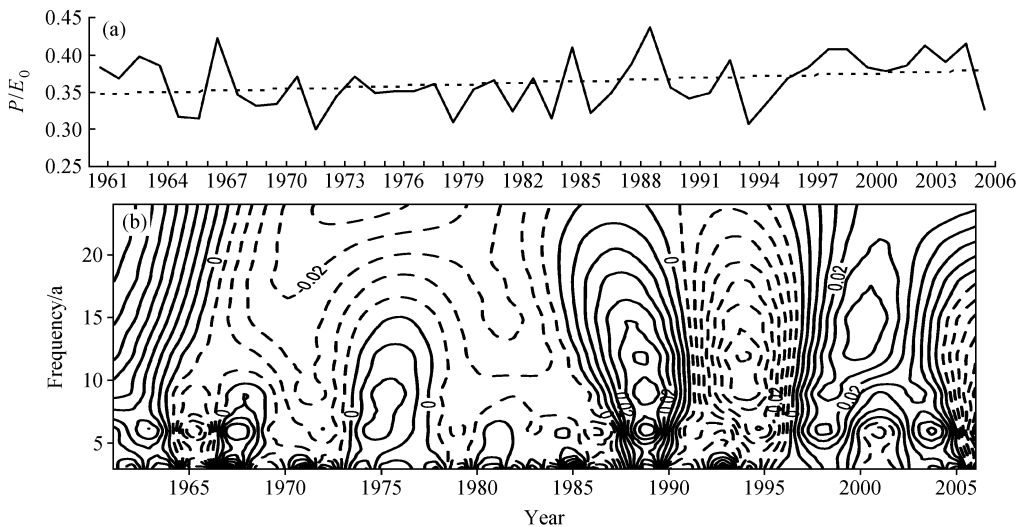


图 6 同图 4, 但为半干旱区
Fig. 6 Same as Fig. 4, but for the semi-arid climate region

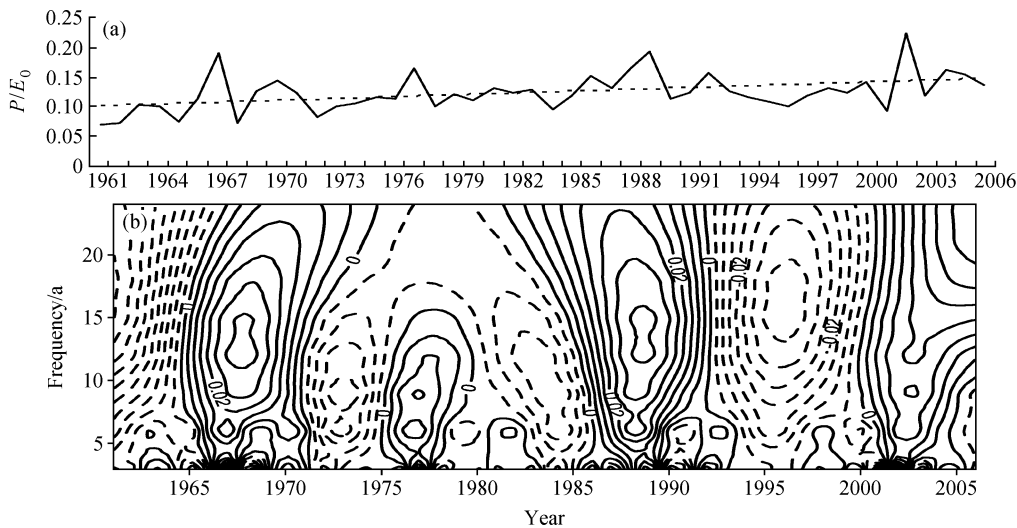


图 7 同图 4, 但为干旱区
Fig. 7 Same as Fig. 4, but for the arid climate region

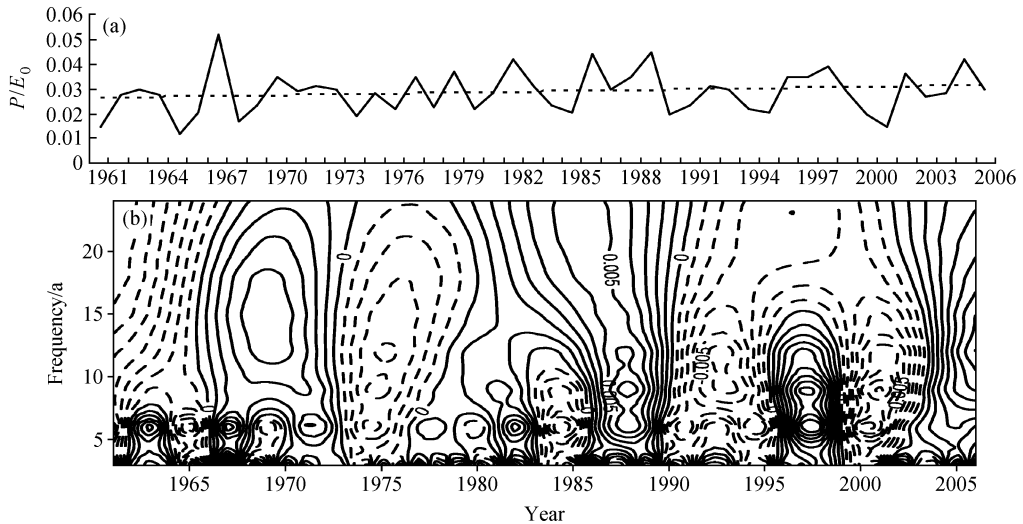


图 8 同图 4, 但为极端干旱区

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for the extreme arid climate region

交替期, 5 个突变点的位置分别在 1965 年、1971 年、1985 年、1992 年和 2000 年附近, 与此对应的是 1965 年以前、1971~1985 年和 1992~2000 年的偏干期, 1965~1971 年、1985~1992 年和 2000 年以后的偏湿期。2006 年以后偏湿的可能性较大。

干旱气候区 1961~2006 年平均湿润度为 0.03, 呈增加趋势 (图 6a), 增加率为 0.0001/a。在 15 年时间频率附近 (图 8b), 主要出现了 6 个干湿交替期, 5 个突变点的位置分别在 1966 年、1973 年、1979 年、1990 年和 2003 年附近, 与此对应的是 1966 年以前、1973~1979 年和 1990~2003 年的偏干期, 1966~1973 年、1979~1990 年和 2003 年以后的偏湿期。2006 年以后偏湿的可能性较大。

6 小结与讨论

(1) 降水量、积温降水比、气温降水比、蒸散降水比和降水蒸散比五种指标中, 用降水蒸散比得到的青藏高原干湿气候区分区结果比较合理。

(2) 近 46 年来青藏高原大部分地区湿润度呈增加趋势, 只有约 15% 的地区呈减少趋势, 主要分布在青海的东南部和西藏的南部。湿润、半湿润气候区的面积 2001~2006 年最大, 20 世纪 90 年代次大, 80 年代又次之, 70 年代最小, 60 年代在 70 年代和 80 年代之间。1961~1980 年湿润、半湿润气候区的面积呈缩小趋势, 1971~2006 年呈扩大趋势。

(3) 根据青藏高原湿润、半湿润、半干旱、干

旱和极端干旱 5 个气候区代表站的资料, 近 46 年来各气候区区域平均湿润度均呈增加趋势, 增加率分别为 0.0005/a、0.0002/a、0.0007/a、0.001/a 和 0.0001/a。

(4) 在 15 年时间频率附近, 青藏高原近 46 年来湿润气候区主要出现了 5 个干湿交替期, 半湿润、半干旱、干旱和极端干旱气候区主要出现了 6 个干湿交替期。湿润、半湿润和半干旱气候区 2006 年以后偏干的可能性较大, 而干旱和极端干旱气候区偏湿的可能性较大。

(5) 近 46 年来青藏高原大部分地区气候在向湿润的方向发展, 主要原因是青藏高原大部分地区降水呈增加趋势, 别的学者也曾得到类似的结果^[10, 17]。根据前人的研究, 青藏高原气温虽然也呈增加趋势^[10, 18], 且气温的增加会导致潜在蒸散的增加, 但影响潜在蒸散的因子除了气温外, 还有日照、空气湿度、风速等因子。根据图 2c 显示, 青藏高原约有 75% 地区近 46 年来潜在蒸散量呈减少趋势。综合上述的分析, 本文认为青藏高原大部分地区近 46 年来气候在向暖湿方向发展。

参考文献 (References)

- [1] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979
Ye Duzheng, Gao Youxi. *Meteorology of the Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979
- [2] 戴加洗. 青藏高原气候. 北京: 气象出版社, 1990. 307~309
Dai Jiaxian. *Climate of the Tibetan Plateau* (in Chinese).

- Beijing: China Meteorological Press, 1990. 307~309
- [3] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近30年气候变化趋势. 地理学报, 2005, **60** (1): 3~11
Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Climate change in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2005, **60** (1): 3~11
- [4] 赵松林(主编). 集水农业引论. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996. 35~45
Zhao Songlin (Ed.). *Introduction of Catchment Agriculture* (in Chinese). Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1996. 35~45
- [5] 丁一汇, 王守荣(主编). 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 2001. 9~11
Ding Yihui, Wang Shourong (Eds.). *Introduction to Climate, Ecology and Environment in Northwest China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 9~11
- [6] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近30年中国陆地表层干湿状况研究. 中国科学(D辑, 地球科学), 2005, **35** (3): 276~283
Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Study on dry and wet condition of land surface layer in China in recent 30 years. *Science in China* (Ser. D, Earth Sciences) (in Chinese), 2005, **35** (3): 276~283
- [7] 张兰生. 中国北方季风尾闾区全新世不同时期降水变化及其区域分异规律的研究. 中国生存环境历史演变规律研究. 北京: 海洋出版社, 1993. 147~154
Zhang Lansheng. Research on precipitation change and its distributive pattern of monsoon edge area in northern China during Holocene. *Research on Historical Evolution Law of Living Environment in China* (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1993. 147~154
- [8] 杨建平, 丁永建, 陈仁生, 等. 近50年来中国干湿气候界线的10年际波动. 地理学报, 2002, **57** (6): 655~661
Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. The interdecadal fluctuation of dry and wet climate boundaries in China in recent 50 years. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57** (6): 655~661
- [9] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 1998
- [10] 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化. 大气科学, 2003, **27** (2): 157~170
Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (2): 157~170
- [11] 郭世昌, 常有礼, 张利娜. 北半球中纬度地区大气臭氧的年际和年代际变化研究. 大气科学, 2007, **31** (3): 418~424
- Guo Shichang, Chang Youli, Zhang Lina. Research on the interannual and interdecadal variations of the atmospheric ozone in the middle latitude region of the Northern Hemisphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (3): 418~424
- [12] 全利红, 胡非, 程雪玲. 用小波系数谱方法分析湍流湿度脉动的相干结构. 大气科学, 2007, **31** (1): 57~63
Quan Lihong, Hu Fei, Cheng Xueling. Analysing coherent structures of humidity time series by the spectral analysis of the wavelet transform coefficients. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 57~63
- [13] 李建龙. 干旱农业生态工程学. 北京: 化学工业出版社, 2002. 27~29
Li Jianlong. *Environment Eco-engineering of Dry Agriculture* (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 27~29
- [14] 刘爱霞. 中国及中亚地区土地荒漠化遥感监测研究. 中国科学院遥感应用研究所博士学位论文, 2004
Liu Aixia. Remote sensing monitoring of desertification in China and central Asia. Ph.D. dissertation (in Chinese), Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2004
- [15] 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. 大气科学, 2005, **29** (5): 671~681
Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 671~681
- [16] 马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. 大气科学, 2006, **30** (3): 464~474
Ma Zhuguo, Shao Lijuan. Relationship between dry/wet variation and the Pacific decade oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 464~474
- [17] 马晓波, 胡泽勇. 青藏高原40年来降水变化趋势及突变的分析. 中国沙漠, 2005, **25** (1): 137~139
Ma Xiaobo, Hu Zeyong. Precipitation variation characteristics and abrupt change over Qinhai-Xizang Plateau in recent 40 years. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2005, **25** (1): 137~139
- [18] 王堰, 李雄, 缪启龙. 青藏高原近50年来气温变化特征的研究. 干旱区地理, 2004, **27** (1): 41~46
Wang Yan, Li Xiong, Miao Qilong. Analyses on variety characteristics of temperature in Qinghai-Tibet Plateau in recent 50 years. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2004, **27** (1): 41~46