

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0099

LI Lingping, LIU Weicheng, YANG Mei, et al. Precipitation characteristics and its affecting factors on the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau from 1971 to 2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 916–924. [李玲萍, 刘维成, 杨梅, 等. 1971–2015年青藏高原东北边坡降水特征及主要影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 916–924.]

1971 – 2015 年青藏高原东北边坡降水特征 及主要影响因子分析

李玲萍¹, 刘维成², 杨 梅¹, 李岩瑛¹

(1. 甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威 733000; 2. 兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 利用 1971 – 2015 年青藏高原东北边坡 20 个站的降水观测资料和美国国家环境预报中心 (NCEP) 再分析资料, 分析了青藏高原东北边坡年、季降水量空间分布和变化趋势, 并采用相关系数法分析和讨论其所受的影响因素。结果表明: 青藏高原东北边坡地区的年、季平均降水量空间分布极为不均, 总体上是从南向北递减, 东北部最少; 青藏高原东北边坡年、夏、秋季平均降水量北部呈上升趋势, 南部呈下降趋势; 青藏高原东北边坡地区年平均降水量呈下降趋势, 气候倾向率为 $-3.1\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其中春、秋、冬季平均降水量呈上升趋势, 夏季平均降水量呈明显下降趋势; 青藏高原东北边坡地区年、季降水量的显著周期为 2 ~ 3 a、4 ~ 5 a 及 10 ~ 15 a; 南亚季风对青藏高原东北边坡地区降水量影响显著, 为明显的正相关, 西风指数对高原东北边坡地区降水量有一定影响, 相关不是很明显, 与其北部降水量呈正相关, 南部降水量呈负相关。

关键词: 青藏高原东北边坡; 年降水量; 季降水量; 变化特征; 影响因子

中图分类号: P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)05-0916-09

0 引言

青藏高原东北边坡 ($35^{\circ} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 、 $101^{\circ} \sim 105^{\circ}\text{E}$) 位于祁连山东段与秦岭山脉的交汇地带, 是西风带气候区、高原气候区、东南亚季风区的边缘区域, 是东南湿润季风气候与西北内陆干旱气候的过渡带, 气候变化非常复杂。受高原复杂地形的影响, 青藏高原东北边坡地区边界层内平均环流出现了次天气尺度系统, 这种次天气尺度的环流系统使得局地热力或动力作用极不均匀, 对青藏高原东北边坡的天气特征、气候规律等有十分重要的影响, 导致该地区降水时空分布不均, 生态环境十分脆弱, 水土流失、草场退化、沙漠化等环境问题突出。目前对整个青藏高原东北边坡地区降水研究较多, 王宝灵等^[1]、谌芸等^[2]分析认为高原东北侧汛期降水份额最大的 7、8、9 月 3 个月近 40 年降水明

显减少, 过去明显存在的准 3 年周期振荡 20 世纪 80 年代以来处于低潮, 青藏高原东北部地区强降水的分布明显受到地形影响, 年降水量和强降水次数自东向西呈阶梯性递减趋势; 杜亮亮等^[3]分析指出青藏高原东北边坡地带 ($32^{\circ} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 、 $99^{\circ} \sim 104^{\circ}\text{E}$) 2001 – 2011 年平均年降水量整体呈现由南向北逐渐减小, 大气可降水量空间分布为由东南向西北逐渐减小, 且变化梯度在东南部最大, 根据 1967 – 2010 年 83 个大-暴雨个例的水汽轨迹分析发现, 高层水汽主要来自南亚季风的水汽输送带, 低层水汽主要来自东亚季风的水汽输送带。

由于青藏高原高大的地形, 青藏高原已成为我国长江、黄河等主要大江大河的发源地。大气水汽循环作为水循环的一个重要分支是形成青藏高原气候现状的主要原因之一。对青藏高原水资源的研究, 已成为青藏高原研究的一个重要方面。因此许

收稿日期: 2018-04-28; 修订日期: 2018-07-28
基金项目: 国家自然科学基金项目 (41505036); 甘肃省气象局关键技术攻关创新团队项目 (GSQXCXTD-2017-01) 资助
作者简介: 李玲萍 (1977 –), 女, 甘肃定西人, 高级工程师, 2014 年在兰州大学获硕士学位, 从事天气气候变化及灾害性天气预报研究。
E-mail: wwqxjllp@163.com
通信作者: 刘维成, E-mail: cnliuwc@163.com.

多学者对青藏高原的降水和大气水循环变化做了大量研究,也得出许多有价值的研究结论。Wang 等^[4]利用周期叠加和线性趋势相结合预测表明,未来 20 年青藏高原降水将持续减少;Wang 等^[5]分析指出青藏离原地区夏季降水与气温(1971 - 2000 年)有增加的趋势;姜大膀等^[6]研究指出,在全球变暖的情景下,青藏高原大部分地区降水将会随之增加;韦志刚等^[7]通过对青藏高原 72 个观测站的逐日积雪资料进行分析得到高原积雪存在 3 个极值,并且总体上呈平缓增长;康兴成^[8]研究指出,从 20 世纪 50 年代以来,青藏高原降水量有逐渐增加的趋势;朱西德等^[9]认为青藏高原年降水量 1967 - 2000 年在缓慢减少;蔡英^[10]分析发现高原北部和南部降水量的反相位关系是高原降水情况的一个重要特征;冯松^[11]指出绝大多数台站在 1958 - 1996 年间冬季和春季降水量呈增加的趋势,夏季高原大部分地区的降水量在逐年递减;段克勤等^[12]分析发现高原以唐古拉山为界,高原南北降水变化存在明显差异,特别是高原南部和东北部降水几乎成相反的变化;马晓波等^[13]认为高原的降水量自 20 世纪 50 年代后呈上升的趋势,且降水量的增加发生在雨季;韩熠哲等^[14]指出,在 1980 - 2013 年,我国青藏高原的年降水量与降水日数的变化趋势相反,年降水量随时间的推移而升高,年降水日数则随着时间的推移而减少;李晓英等^[15]分析发现 1961 - 2010 年青藏高原降水量总体呈现增加趋势,青藏高原降水季节分配极不均匀,雨季和旱季非常明显,雨季降水占有主导作用,青藏高原降水由东南向西北递减。同时,许多学者对青藏高原降水的影响机制及水汽方面做了相应研究,王可丽等^[16-17]利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)再分析资料分析了西风带与季风对我国西北地区水汽输送的作用,研究发现我国西北大部分地区水汽主要来源于西风带的水汽输送;青海、新疆这些地区的降水易受东南亚夏季风的影响;周长艳等^[18]通过计算多年平均垂直积分的水汽输送通量,得到高原东部及邻近地区夏季水汽输送的基本特征:夏季高原东部及其邻近地区受多重季风气流的影响,水汽输送既有来自孟加拉湾,也有来自南海、西太平洋地区,还有来自中纬度的偏西风气流的水汽输送,是一个水汽输送的敏感区。其中,水汽的输出边界是东边界和北边界,输入边界为南边界和西边界,且南边界的水汽输入更是占主要地位。林厚博等^[19]

分析指出青藏高原平均年降水分布不均匀,存在区域差异,呈现出由其东南部向西北部逐渐递减的分布形式,水汽主要通过青藏高原的南边界、西南边界、西进界和北边界进入青藏高原,其中通过南边界的水汽是青藏高原最主要的水汽来源。李燕等^[20]分析指出,1961 - 2010 年青藏高原冬、夏降水呈现相反的变化趋势,表现为冬季降水增加而夏季降水减少,青藏高原南部初夏降水与南亚夏季风建立日期之间呈显著正相关,南亚夏季风(环流)建立越早,高原南部初夏降水越多,而青藏高原北部地区初夏的降水则主要受到西风带系统年代际变化的影响。

青藏高原作为世界上最高的高原,其地形及地表的物理性质十分复杂,它同时还孕育着丰富的冻土、冰川、积雪、森林、草原、荒漠、湖泊等多种自然景观,这使得它对全球气候变化的响应十分敏感。在全球气候变暖的大背景下,它是对气候变化较为敏感的地区之一,对中国东部、西北干旱区、亚洲的气候和植被格局乃至全球气候变化都具有深刻的影响,在全球气候系统中占据着重要地位,因此对其进行探索和研究具有极为重要的意义。目前对青藏高原东北边坡地区($35^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{N}$ 、 $101^{\circ} \sim 105^{\circ} \text{E}$)年、季降水的细致分析较少,本文重点研究该区域近 45 年降水变化趋势,然后从大气环流及水汽源方面探讨造成这一变化趋势的主要影响因素,对于在全球气候变暖背景下青藏高原边坡地区水资源的规划及降水预测有一定的参考意义。

1 研究区基本概况

青藏高原东北边坡地区($35^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{N}$ 、 $101^{\circ} \sim 105^{\circ} \text{E}$),包括青海省东部、甘肃省中部及南部区域,位于祁连山东段与秦岭山脉的交汇地带,是西风带气候区、高原气候区、东南亚季风区的边缘区域,是东南湿润季风气候与西北内陆干旱气候的过渡带,气候变化非常复杂。研究区内观测站点分布及海拔情况见图 1,可以看出,青藏高原东北边坡地区海拔较高,从西向东地形呈阶梯状,海拔迅速降低。

2 资料与分析方法

本文利用青藏高原东北边坡地区 20 个气象站(永登、白银、靖远、永靖、兰州、榆中、临夏、东乡、和政、广河、康乐、临洮、渭源、定西、夏河、民和、乐都、化隆、尖扎、循化)1971 - 2015 年的逐

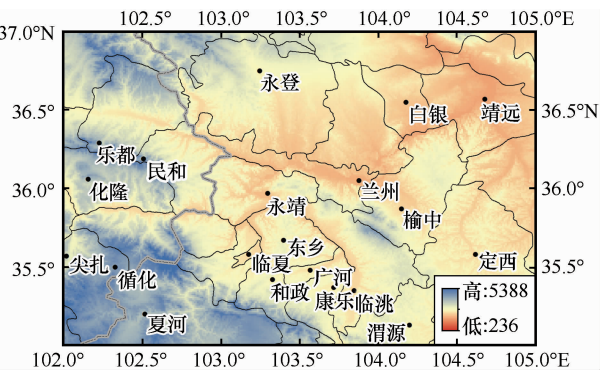


图 1 青藏高原东北边坡地形特征

Fig. 1 Map showing the topographic features of the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau

日降水观测资料,运用常规的气候统计方法,对青藏高原东北边坡降水求季节、年、年代平均值,并求季、年、年代距平值,分析其在不同季、年、年代的变化特征,然后采用最小二乘估计对近 45 年青藏高原东北边坡降水变化趋势进行线性倾向分析,用 Morlet 小波分析不同时段变化周期,并采用相关系数法分析了降水分布与海拔和经纬度的关系,最后采用与气候指数相关性来分析和讨论降水变化的影响因素。

降水总量是指前一日 20:00(北京时间,下同)至当日 20:00 各时次 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的降水累积总量。1971–2015 年大气环流特征量资料由国家气候中心气候诊断预测室提供。西太平洋副高脊线位置指数为 $10^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{ N}$ 、 $110^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{ E}$ 区域内,500 hPa 高度场逐条经线上副热带高压中心位置所在纬度的平均值;西太平洋副高西伸脊点指数为 500 hPa 高度场, $10^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{ N}$ 、 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{ E}$ 区域内,5 880 位势米(gpm)等值线最西端位置所在经度;东亚槽位置指数、东亚槽强度指数分别为 $30^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{ N}$ 、 $110^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{ E}$ 区域内,500 hPa 高度场槽线的平均经向位置以及槽线上各点位势高度之和,减其中位势高度最大值,加其中位势高度最小值;西藏高原-1 指数及西藏高原-2 指数分别为 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{ N}$ 、 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{ E}$ 及 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{ N}$ 、 $75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{ E}$ 区域内,500 hPa 高度场格点位势高度与 5 000 位势米(gpm)之差乘以格点面积的累积值;欧亚纬向环流指数为 500 hPa 高度场, $45^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{ N}$ 、 $0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{ E}$ 区域内,以 30 个经度为间隔划分为 5 个区,分别按照式(1)计算纬向指数 I_z ,然后计算 5 个区的平均纬向指数,为欧亚纬向环流指数。

$$I_z = -\frac{\overline{\Delta z}}{\Delta \varphi} = \frac{z_1 - z_2}{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{\sum_{i=1}^l z_{1i} - \sum_{i=1}^l z_{2i}}{l(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (1)$$

式中: φ_1 、 φ_2 表示计算 I_z 的纬度范围; z_{1i} 、 z_{2i} 分别是在 φ_1 、 φ_2 两个纬圈上的高度值; l 为分别在 φ_1 、 φ_2 纬圈上均匀取点的高度值的数量。

欧亚经向环流指数为 500 hPa 高度场, $45^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{ N}$ 、 $0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{ E}$ 区域内,以 30 个经度为间隔划分为 5 个区分别按照式(2)计算经向指数 I_M ,然后分别计算 5 个区的平均经向指数,为欧亚经向环流指数。

$$I_M = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \left(\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial z}{\partial \lambda} \right)_j \right| = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\cos \varphi_j} \frac{\Delta z_i}{\Delta \lambda} \right) \right|$$
$$= \frac{1}{mn \Delta \lambda} \sum_{j=1}^n \left| \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{\Delta z_i}{\cos \varphi_j} \right) \right] \right| \quad (2)$$

式中: n 为计算区域内的分区数, $\Delta \lambda = 15$ 经度,在 45° N 、 55° N 和 65° N 计算 Δz_i , $m = 3$ 。

东亚季风指数(EASMI)定义为夏季(6–8 月)东亚季风区($10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{ N}$, $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{ E}$)内 850 hPa 平均风场标准化季节变率^[21];南亚季风指数定义为夏季(6–8 月)南亚季风区($5^{\circ}\sim 22.5^{\circ}\text{ N}$, $35^{\circ}\sim 97.5^{\circ}\text{ E}$)内 850 hPa 平均风场标准化季节变率;夏季($30^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{ E}$, $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{ N}$)区内西风指数^[22]定义为:

$$WI = \frac{1}{N} \left[\sum_N H_i(35^{\circ}) - \sum_N H_i(50^{\circ}) \right] \quad (3)$$

式中: N 为 $30^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{ E}$ 、 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{ N}$ 区域内计算格点数目; $H_i(35^{\circ})$ 和 $H_i(50^{\circ})$ 分别为每个格点 6–8 月 500 hPa 等压面沿 35° N 和 50° N 纬圈的平均高度值。

3 结果分析

3.1 降水量空间分布特征

青藏高原东北边坡处于不同气候区的交汇过渡带,天气特征和气候变化规律复杂,降水时空分布严重不均。从青藏高原东北边坡地区 20 个测站各测站 1971–2015 年年平均降水量(图 2)可以看出,该区域降水的空间分布总体上是从南向北递减,东北部最少。青藏高原东北边坡地区 20 个气象站近 45 年年平均降水量为 394.9 mm,各站年平均降水量 195.4~600.1 mm,年平均降水量最大值出现在南部的和政,为 600.1 mm,最小值出现在青藏高原东北边坡东北部的白银,为 195.4 mm,最高值和最低值相差 404.7 mm。

青藏高原东北边坡地区不同季节平均降水量(图略)和年平均降水量的空间分布相似。春、夏、秋、冬四季青藏高原东北边坡地区 20 个气象站近 45 年季平均降水量分别为 93.5、215.9、76.1、9.4

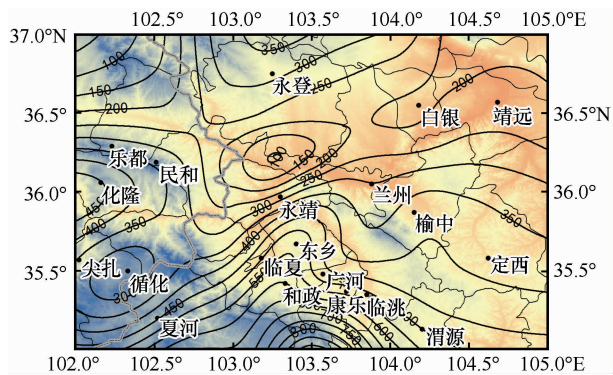


图2 青藏高原东北边坡年平均降水量空间分布(单位: mm)
Fig.2 Spatial distribution of average annual precipitation in the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau (units; mm)

mm。各站春季平均降水量 32.5 ~ 149.7 mm, 最大值出现在南部的化隆, 为 149.7 mm, 最小值出现在白银, 为 32.5 mm, 最大值和最小值相差 117.2 mm; 夏季平均降水量 115.4 ~ 307.7 mm, 最大值出现在南部的和政, 为 307.7 mm, 最小值出现在白银, 为 115.4 mm, 最高值和最低值相差 192.3 mm; 秋季平均降水量 15.1 ~ 142.4 mm, 最大值出现在南部的和政, 为 142.4 mm, 最小值出现在白银, 为 15.1 mm, 最大值和最小值相差 127.3 mm; 冬季平均降水量 2.4 ~ 18.4 mm, 最大值出现在化隆, 为 18.4 mm, 最小值出现在永靖, 为 2.4 mm, 最大值和最小值相差 16.0 mm。

3.2 降水量气候倾向率分布特征

青藏高原东北边坡地区 20 个气象站近 45 年年平均降水量整体呈下降趋势, 其气候倾向率为 $-3.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 但各个站的气候变化趋势并不同步。由图 3 可看出(虚线部分表示平均降

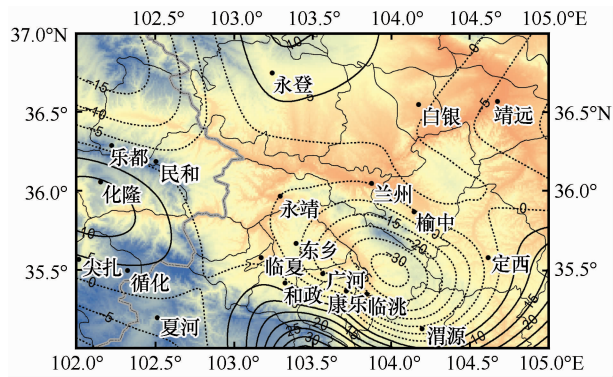


图3 青藏高原东北边坡年平均降水量倾向率空间分布[单位: $\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$]
Fig.3 Spatial distribution of average annual precipitation trend rate in the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau [units: $\text{mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$]

水量呈下降趋势, 实线部分表示呈上升趋势), 青藏高原东北边坡北部的白银、永登以及东面的化隆、夹扎、循化呈上升趋势, 化隆上升最明显, 其气候倾向率为 $10.5 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其次是北部永登上升最明显, 其气候倾向率为 $7.5 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 青藏高原东北边坡的南部年平均降水量整体呈下降趋势, 下降最明显出现在南部的临洮, 其气候倾向率为 $-18.5 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 其次是广河, 为 $-14.0 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

青藏高原东北边坡不同季节平均降水量变化趋势的空间分布(图略)有所不同。夏、秋季平均降水量变化趋势的空间分布与年平均降水量气候倾向率空间分布图基本相似。夏季平均降水量青藏高原东北边坡东面的化隆、夹扎、循化呈上升趋势, 化隆上升最明显, 其气候倾向率为 $6.9 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 其余站点平均降水量都呈下降趋势, 下降最明显的区域是青藏高原东北边坡的南部, 下降中心最大值出现在广河, 其气候倾向率为 $-14.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 其次是临洮, 为 $-13.8 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。秋季平均降水量上升最明显的站点是位于其北部的永登, 其气候倾向率为 $6.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 下降最明显的区域也是青藏高原东北边坡的南部, 下降中心最大值出现在临洮, 其气候倾向率为 $-3.2 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。春、冬季平均降水量与年平均降水量变化趋势的空间分布有所不同。春季平均降水量除了南部的康乐、临洮、渭源及东北部的靖远呈下降趋势外, 其余站点都呈上升趋势, 下降中心最大值出现在南部的渭源, 其气候倾向率为 $-1.8 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 上升趋势最明显的是青藏高原东北边坡东面的化隆, 其气候倾向率为 $5.6 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。冬季平均降水量变化趋势较为复杂, 下降趋势中心最大值出现青藏高原东北边坡东面的化隆, 其气候倾向率为 $-1.6 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 上升趋势最明显的又是青藏高原东北边坡南面的渭源, 其气候倾向率为 $1.6 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

青藏高原东北边坡地区 20 个测站 1971–2015 年年平均降水量的空间分布总体上与测站的地理位置、海拔高度以及纬度密切相关。由表 1 分析得知, 青藏高原东北边坡地区年、四季平均降水量与海拔高度表现为明显的正相关, 与纬度表现为明显的负相关, 即随海拔高度的增加而增加, 随纬度的增加而减小。对于降水量较大、降水相态以雨为主的夏、秋季节, 其平均降水量与纬度的相关性大于与海拔高度的相关性; 对于降水量较小、降水相态

以雨夹雪或雪为主的春、冬季节，其平均降水量与海拔高度的相关性大于与纬度的相关性。总体上可以看出高海拔、低纬度的南部其平均降水量大于低海拔、高纬度的北部。因为纬度越高，零度层高度越低，降水率越小；在山区，随着海拔的升高，空气受到地形抬升作用上升，不断冷却凝结形成降水，降水量是逐渐增加（但到一定高度后，降水之后空气中水汽含量不断减少，降水量就会随着海拔的继续上升而减少）。

其次青藏高原东北边坡地区年平均降水量的空间分布也与影响本地的天气系统有关，由于青藏高原东北边坡地区是西风带气候区、高原气候区、东南亚季风区的边缘区域，是东南湿润季风气候与西北内陆干旱气候的过渡带，气候变化非常复杂。因此有待进一步用更多更详细的资料证实和分析。

表 1 青藏高原东北边坡降水与海拔高度及纬度相关系数
Table 1 Correlation coefficients between precipitation and latitude and elevation in the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau (units: mm)

时间	降水量	
	海拔高度	纬度
年	0.337 *	-0.470 **
春季	0.442 **	-0.364 *
夏季	0.347 *	-0.480 **
秋季	0.137	-0.354 *
冬季	0.347 *	-0.248

注：* 表示通过了 $\alpha = 0.05$ 信度检验，** 表示通过了 $\alpha = 0.01$ 信度检验。

3.3 降水量年际、年代际变化特征

由青藏高原东北边坡地区年平均降水量变化趋势图(图 4)可以看出，近 45 年青藏高原东北边坡地区年平均降水量呈下降趋势，气候倾向率为 $-3.1\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。近 45 年青藏高原东北边坡地区四季平均降水量变化曲线(图略)显示，春、秋、冬季平均降水量变化呈上升趋势，上升最明显的是春季，气候倾向率为 $1.5\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ，秋、冬季上升不明显，气候倾向率分别为 $0.5\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.2\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ ；夏季平均降水量呈明显下降趋势，气候倾向率为 $-5.4\text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。说明近 45 年青藏高原东北边坡地区年平均降水量下降主要是夏季降水量下降的贡献。

从不同年代青藏高原东北边坡地区平均降水量距平值(表 2)可以看出，青藏高原东北边坡地区年平均降水量 20 世纪 70 年代为明显的正距平，20 世

纪 80 年代 - 2015 年都为负距平，近 5 年 2011 - 2015 年负距平最大。青藏高原东北边坡地区平均降水量不同季节距平值表现不同，春季青藏高原东北边坡地区 20 世纪 70、90 年代以及 2011 - 2015 年平均降水量为负距平，90 年代负距平最大，20 世纪 80 年代以及 2001 - 2010 年为正距平，80 年代正距平最大；夏季青藏高原东北边坡地区 20 世纪 80 年代、2001 - 2010 年、2011 - 2015 年平均降水量为负距平，2001 - 2010 年负距平最大，20 世纪 70、90 年代为正距平，90 年代正距平最大；秋季青藏高原东北边坡地区 20 世纪 80、90 年代平均降水量为负距平，90 年代负距平最大，20 世纪 70 年代、2001 - 2010 年、2011 - 2015 年为正距平，2001 - 2010 年正距平最大；冬季青藏高原东北边坡地区 20 世纪 70、80 年代平均降水量为负距平，70 年代负距平最大，20 世纪 90 年代、2001 - 2010 年、2011 - 2015 年都为正距平，各年代距平值相等。

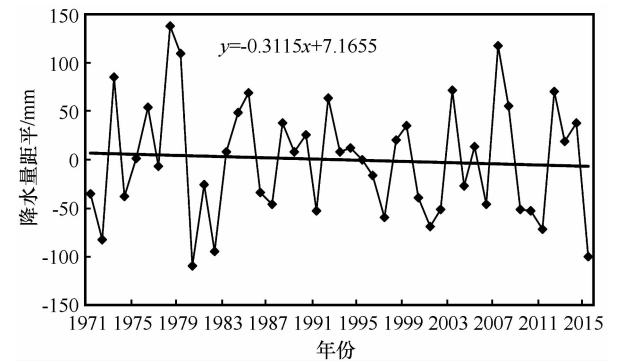


图 4 青藏高原东北边坡降水量距平变化趋势
Fig. 4 Annual variation of annual mean precipitation anomaly in the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau

表 2 不同年代青藏高原东北边坡降水量距平值(单位: mm)
Table 2 The annual and seasonal precipitation anomalies in the northeast slopes of the Qinghai-Tibet Plateau (units: mm)

年代	春季	夏季	秋季	冬季	年
1971 - 1980 年	-7.3	14.7	4.7	-0.7	11.4
1981 - 1990 年	8.9	-7.7	-1.5	-0.2	-0.5
1991 - 2000 年	-9.2	17.5	-11.7	0.4	-3.0
2001 - 2010 年	7.9	-19.1	7.0	0.4	-3.9
2011 - 2015 年	-0.5	-12.1	3.4	0.4	-8.8

3.4 降水量周期变化特征

为了研究青藏高原东北边坡地区降水量周期变化特征，分别对青藏高原东北边坡地区年、季降水量变化的时间序列进行 Morlet 小波周期分析，并运用功率谱对显著性进行检验。

青藏高原东北边坡地区年平均降水量(图5)近45年各年代都存在周期振荡,20世纪70年代中期到80年代初、90年代中期、2005–2010年存在2~3 a、4~6 a、7~9 a、10~20 a的周期振荡,80

年代中期、21世纪初期、2014–2015年存在2~3 a、4~6 a、7~10 a变化周期,通过 $\alpha=0.05$ 信度白噪声检验发现,10~15 a左右长周期、4~5 a以及2~3 a的短周期反映通过信度检验。

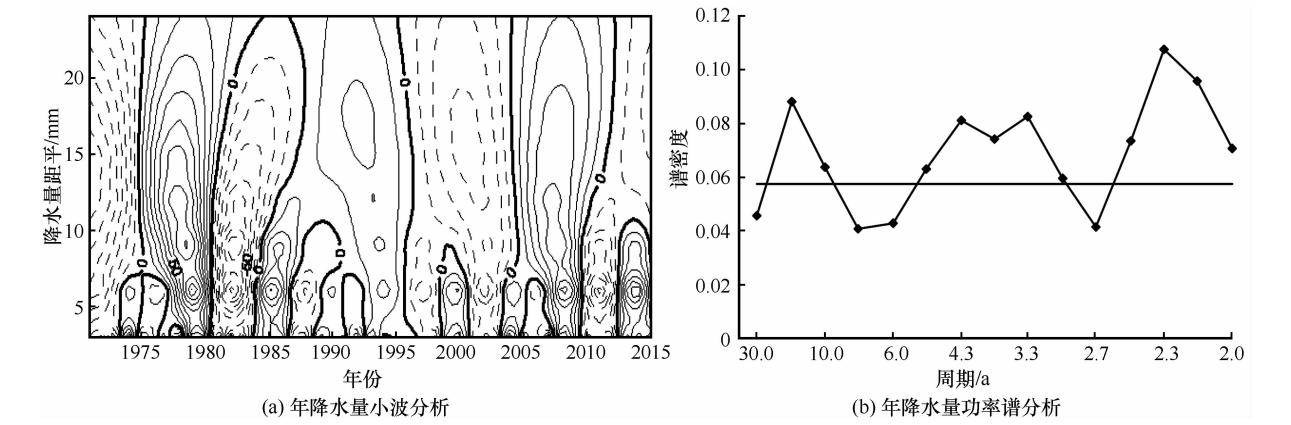


图5 青藏高原东北边坡年降水量小波及功率谱分析(图5b中的光滑直线为 $\alpha=0.05$ 的白色噪声标准谱)
Fig.5 Wavelet and power spectrum analyses of annual mean precipitation in the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau

四季年平均降水量(图略)也存在不同周期振荡,春季降水量70年代、90年代末、2014–2015年主要存在2~3 a、5~6 a的周期振荡,80年代中期到90年代中期主要表现为2~3 a、5~6 a以及15~20的周期振荡,2003–2005年有2~3 a、5~6 a、9 a、12 a的周期反映, $\alpha=0.05$ 信度红噪声检验发现,10~15 a左右长周期、4~6 a以及3 a左右的短周期反映通过信度检验;夏季降水量和年降水量各年代周期变化基本一致, $\alpha=0.05$ 信度白噪声检验发现也是,15~20 a长周期、5~6 a以及2~3 a的短周期反映通过信度检验;秋季降水量70年代中期到80年代初、90年代初中期,90年代末、2005–2010年主要存在2~3 a、4~6 a、7~9 a、10~20 a的周期振荡,80年代中期、2000–2002年、2014–2015年主要表现为2~3 a、5~6 a以及9~10 a的周期振荡, $\alpha=0.05$ 信度白噪声检验发现,15~20 a长周期、5~7 a以及2~3 a的短周期反映通过信度检验;冬季降水量80年代末到90年代末、2005–2010年主要存在2~3 a、4~6 a、7~9 a、10~20 a的周期振荡,70年代中期、80年代初中期、2000–2002年、2014–2015年主要表现为2~3 a、6~7 a以及9~10 a的周期振荡, $\alpha=0.05$ 信度红噪声检验发现,4~7 a以及3 a左右的短周期反映通过信度检验。

总体归纳起来看,青藏高原东北边坡地区年、季降水量的显著周期表现为2~3 a、4~5 a及10~15 a。

4 降水量变化影响因素分析

青藏高原东北边坡地区由于其复杂地理位置,它不同于北疆地区主要受西风带控制,也不同于我国东部地区受较均一的夏季风影响,夏季的天气气候特征是东南季风、高原季风和西风带共同作用的结果,本地区降水受诸多天气系统及因素影响,本文重点从大尺度系统和水汽源的角度出发分析环流指数和西风指数及南亚季风变化对该地区降水的影响(表3)。

从大尺度系统分析发现,青藏高原东北边坡年平均降水量与西太平洋副高脊线位置指数、西太平洋副高西伸脊点指数都呈正相关(在海拔的化隆、民和为负相关),说明西太平洋副高西伸北抬,青藏高原东北边坡降水出现偏多现象;欧亚纬向环流指数与青藏高原东北边坡降水量呈正相关,且和高原东北边坡偏北低海拔地区降水量的正相关较明显,说明欧亚纬向环流偏强对青藏高原东北边坡偏北的降水量有一定影响;欧亚经向环流指数、东亚槽位置与青藏高原东北边坡偏北低海拔地区降水量呈正相关,而与偏南高海拔地区的降水量呈负相关;青藏高原东北边坡降水量与东亚槽强度指数和西藏高原-2指数基本呈负相关,与西藏高原-1指数为正相关。上述相关都表现为各指数对青藏高原东北边坡偏北低海拔地区降水量的影响较明显,对偏南高海拔地区降水量的影响不是很明显,说明青藏高原东北边坡偏南高海拔地区由于特殊的地理位

表 3 青藏高原东北边坡降水变化与各影响因素相关系数
Table 3 Correlation coefficients between precipitation and various influence factors of some stations in the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau

站点	西太平洋副高脊线位置指数	西太平洋副高西伸脊点指数	欧亚纬向环流指数	欧亚经向环流指数	东亚槽位置指数	东亚槽强度指数	青藏高原-1 指数	青藏高原-2 指数	东亚季风指数	南亚季风指数	西风指数
永登	0.10	0.06	0.19	0.10	0.19	-0.05	0.78	0.08	-0.03	0.25	0.13
白银	0.03	0.01	0.31 *	0.05	0.11	-0.07	0.49	0.13	-0.06	0.11	0.14
靖远	0.12	0.17	0.15	-0.05	0.10	-0.11	0.57	-0.07	-0.01	0.18	0.09
永靖	0.05	0.26	0.06	-0.03	0.00	-0.14	0.27	-0.15	0.03	0.24	-0.12
兰州	0.12	0.15	0.20	0.07	0.11	-0.16	0.72	-0.04	-0.08	0.08	0.06
榆中	0.17	0.17	0.11	0.00	0.06	-0.08	0.71	-0.08	-0.08	0.30 *	0.04
临夏	0.04	0.12	-0.01	-0.15	0.15	-0.07	0.64	-0.07	-0.06	0.42 * *	-0.08
东乡	0.11	0.14	0.05	-0.10	0.07	-0.11	0.63	-0.08	-0.02	0.33 *	-0.15
和政	0.21	0.10	0.01	-0.09	0.06	0.04	0.89	-0.04	0.05	0.26	-0.13
广河	0.17	0.22	0.08	-0.06	0.03	-0.07	0.17	-0.20	0.06	0.36 *	0.05
康乐	0.20	0.11	0.11	-0.13	-0.12	0.01	0.70	-0.06	0.04	0.30 *	0.01
临洮	0.26	0.12	0.04	0.01	-0.13	-0.09	0.65	-0.10	0.01	0.22	0.01
渭源	0.16	0.09	-0.03	-0.03	-0.02	0.02	0.61	-0.12	-0.06	0.25	0.11
定西	0.11	-0.05	0.00	-0.01	-0.15	0.04	0.69	0.02	-0.01	0.11	0.04
夏河	0.12	0.03	0.13	0.01	0.19	-0.12	0.90	0.04	-0.10	0.30 *	0.01
民和	-0.03	0.16	0.29	-0.05	0.15	-0.07	0.39	-0.10	-0.06	0.12	0.01
乐都	0.13	0.02	0.34 *	-0.03	0.02	-0.02	0.71	0.07	0.06	0.14	0.06
化隆	-0.07	-0.08	0.19	0.02	-0.11	0.17	0.49	0.11	0.06	-0.09	-0.10
尖扎	0.10	0.02	0.10	0.07	-0.03	0.11	0.75	0.04	0.04	0.02	-0.10
循化	0.07	0.05	0.09	-0.15	-0.10	-0.02	0.79	0.07	0.07	0.19	0.07

注：* 表示通过了 $\alpha=0.05$ 信度检验，* * 表示通过了 $\alpha=0.01$ 信度检验。

置、地形和下垫面条件，降水受单一大系统影响不是很明显，而是受中小尺度天气系统及地形、下垫面等诸多因素影响，有待进一步做详细研究。

很多研究认为水汽进入青藏高原主要受两个主要系统控制：一个是南亚季风；另一个是中纬度西风带^[18]。本文从水汽源角度分析发现(表3)，南亚季风指数与高原东北边坡地区降水量呈明显的正相关，且与其南部降水量的相关性大于北部，这和高原东北边坡地区降水的空间分布总体上是从南向北递减有很好的对应性；高原东北边坡地区降水量与西风指数相关较为复杂，总体看，在其北面的低海拔地区，西风指数和降水量呈正相关，在偏南的高海拔地区，西风指数和降水量呈负相关(未通过显著性检验)。这和夏季青藏高原水汽主要从青藏高原南侧和西侧(少量)进入青藏高原，阿拉伯海水汽通道对藏高原夏季降水的影响最强，西风带水汽通道对青藏高原夏季降水的影响较弱相符合^[19]，也

和南亚夏季风强度指数和青藏高原南部的降水，不管是在初夏6月份还是整个夏季在90%的置信度下都显著相关的结论较一致^[17]。南侧主要是受到青藏高原南部的南亚季风所携带的水汽影响；西边界主要是受到西风带水汽输送的影响，西边界水汽输送的位置偏北，在夏季时，西风带所携带的水汽中大值区位置较为偏北，并随着纬度的增加西风带所携带的水汽量也逐渐呈增加的态势。

5 结论与讨论

利用最小二乘、Morlet小波分析及相关系数等方法，分析了1971–2015年青藏高原东北边坡降水的变化趋势，分析了降水分布与海拔和经纬度以及降水变化与气候指数的关系，得到如下主要结论：

(1) 青藏高原东北边坡年、季降水分布极为不均，存在明显的空间差异，总体上从南向北递减，

降水量最大值与最小值差距较大, 大值区位于青藏高原东北边坡南部的和政, 小值区则位于青藏高原东北边坡东北部的白银, 最大值和最小值相差 404.7 mm。同时, 青藏高原东北边坡年降水变化趋势也存在明显的空间差异, 年、季降水量北部呈上升趋势, 南部呈下降趋势。

(2) 近 45 年青藏高原东北边坡地区年平均降水量呈下降趋势, 气候倾向率为 $-3.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。其中春、秋、冬季平均降水量变化呈上升趋势, 上升最明显的是春季; 夏季水量呈明显下降趋势。说明近 45 年青藏高原东北边坡地区年平均降水量下降主要是夏季降水量下降的贡献。

(3) 青藏高原东北边坡地区年、季降水量的显著周期为 2 ~ 3 a、4 ~ 5 a 及 10 ~ 15 a。

(4) 青藏高原东北边坡年平均降水量与西太平洋副高脊线位置指数、西太平洋副高西伸脊点指数、欧亚纬向环流指数、西藏高原-1 指数呈正相关, 与东亚槽强度指数和西藏高原-2 指数基本呈负相关, 欧亚经向环流指数、东亚槽位置与青藏高原东北边坡北部降水量呈正相关, 南部降水量呈负相关, 各气候指数对青藏高原东北边坡偏北低海拔地区降水量的影响较明显, 对偏南高海拔地区降水量的影响不是很明显。

(5) 南亚季风对青藏高原东北边坡地区降水量影响较显著, 表现为明显的正相关, 且与高原东北边坡南部降水量的相关性大于与其北部降水量的相关性; 西风指数对高原东北边坡地区降水量的影响较为复杂, 在其北面的低海拔地区, 西风指数和降水量呈正相关, 在偏南的高海拔地区, 西风指数和降水量呈负相关。

参考文献 (References):

- [1] Wang Baolin, Xie Jinnan, Wu Guoxiong, et al. A study of the precipitation of the Tibetan Plateau northeastern side during flood seasons[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 24(6): 775 - 784. [王宝灵, 谢金南, 吴国雄, 等. 青藏高原东北侧汛期降水若干问题研究[J]. 大气科学, 2000, 24(6): 775 - 784.]
- [2] Chen Yun, Li Qiang, Li Zechun. Climatic characteristics of heavy rainfall in the northeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(Suppl 1): 98 - 103. [湛芸, 李强, 李泽春. 青藏高原东北部强降水天气过程的气候特征分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(Suppl 1): 98 - 103.]
- [3] Du Liangliang, Li Jiangping, Chen Xiaoyan, et al. Analysis on cloud and vapor flux in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau during the period from 2001 to 2011[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 862 - 869. [杜亮亮, 李江萍, 陈晓燕, 等. 2001 - 2011 年青藏高原东北边坡地带云水资源分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 862 - 869.]
- [4] Wang Chenghai, Yu Lian, Huang Bo. The impact of warm pool SST and general circulation on increased temperature over the Tibetan Plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(2): 274 - 284.
- [5] Wang Chenghai, Guo Yipeng. Precipitable water conversion rates over the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau: changing characteristics with global warming[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(10): 1509 - 1516.
- [6] Jiang Dabang, Fu Yuanhai. Climate change over china with a 2°C global warming[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(2): 234 - 246. [姜大膀, 富元海. 2°C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 234 - 246.]
- [7] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(2): 157 - 170. [韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代变化[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 157 - 170.]
- [8] Kang Xingcheng. The Features of the climate change in the Qing-Zang Plateau area during the last 40 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl 1): 281 - 287. [康兴成. 青藏高原地区近 40 年来气候变化的特征[J]. 冰川冻土, 1996, 18(增刊 1): 281 - 287.]
- [9] Zhu Xide, Li Lin, Qin Ningsheng, et al. Studies on climatic variation and anomaly types of the annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2003, 23(4): 452 - 459. [朱西德, 李林, 秦宁生, 等. 青藏高原年降水量的气候变化及其异常类型研究[J]. 气象科学, 2003, 23(4): 452 - 459.]
- [10] Cai Ying. Interdecadal variation of climate in the Qinghai-Xizang Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 1998: 22 - 45. [蔡英. 青藏高原气候的年代际变化[D]. 兰州: 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 1998: 22 - 45.]
- [11] Feng Song. Explore the causes of the Tibetan Plateau and comprehensive analysis of ten to millennial-scale climate change[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 1999: 11 - 23. [冯松. 青藏高原十到千年尺度气候变化的综合分析及原因探讨[D]. 兰州: 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 1999: 11 - 23.]
- [12] Duan Keqin, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. The difference in precipitation variability between the north and south Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 726 - 732. [段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 青藏高原南北降水变化差异研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 726 - 732.]
- [13] Ma Xiaobo, Hu Zeyong. Precipitation variation characteristics and abrupt change over Tibetan Plateau in recent 40 years[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(1): 137 - 139. [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[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 137 - 139.]
- [14] Han Yizhe, Ma Weiqiang, Wang Bingyun, et al. Climate characteristics of rainfall change over the Qinghai-Xizang Plateau from 1980 to 2013[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 36(6): 1477 - 1486. [韩熠哲, 马伟强, 王炳赞, 等. 青藏高原近 30 年降水变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 36(6): 1477 - 1486.]
- [15] Li Xiaoying, Yao Zhengyi, Xiao Jianhua, et al. Analysis of the

- spatial-temporal variation characteristics over the Tibetan Plateau from 1961 through 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1233 – 1240. [李晓英, 姚正毅, 肖建华, 等. 1961 – 2010 年青藏高原降水时空变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1233 – 1240.]
- [16] Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China [J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 432 – 438. [王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 432 – 438.]
- [17] Wang Keli, Jiang Hao, Wu Hong. Analysis on characteristics of interannual variability of the South Asian summer monsoon[J]. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(3): 318 – 324. [王可丽, 江灏, 吴虹. 南亚夏季风年际变化特征分析[J]. *高原气象*, 2001, 20(3): 318 – 324.]
- [18] Zhou Changyan, Li Yueqing, LI Wei, et al. Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings[J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(6): 880 – 888. [周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征[J]. *高原气象*, 2005, 24(6): 880 – 888.]
- [19] LinHoubao, You Qinglong, Jiao Yang, et al. Water vapor transportation and its influences on precipitation in summer over Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 309 – 317. [林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 青藏高原及附近水汽输送对其夏季降水影响的分析[J]. *高原气象*, 2016, 35(2): 309 – 317.]
- [20] Li Yan, Yan Jiahai, Zhang Dongfeng. Diagnosis and simulation on the relationship between snow depth over Qinghai-Tibetan Plateau and summer precipitation in Eastern China[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(2): 317 – 324. [李燕, 闫加海, 张冬峰. 青藏高原冬春积雪异常和中国东部夏季降水关系的诊断与模拟[J]. *高原气象*, 2018, 37(2): 317 – 324.]
- [21] Li Jianping, Zeng Qingyun. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(3): 351 – 365. [李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(3): 351 – 365.]
- [22] Liu Weicheng, Zhang Qiang, Fu Zhao. Variation characteristics of precipitation and its affecting factors in Northwest China over the past 55 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(6): 1533 – 1545. [刘维成, 张强, 傅朝. 近 55 年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析[J]. *高原气象*, 2017, 36(6): 1533 – 1545.]

Precipitation characteristics and its affecting factors on the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau from 1971 to 2015

LI Lingping¹, LIU Weicheng², YANG Mei¹, LI Yanying¹

(1. Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei 733000, Gansu, China; 2. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the in-situ observation of precipitation at 20 stations in the northeast slopes of the Qinghai-Tibet Plateau and the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data from 1971 to 2015, regional changing trend and spatial characteristics of annual and seasonal precipitations have investigated. Furthermore, affecting factors of annual precipitation were also analyzed using the correlation relationship related to climatic indices. The results showed that: spatial distribution of the annual and seasonal precipitations were extremely uneven in the northeast slopes of the Qinghai-Tibet Plateau, northwards decreasing; the annual precipitation, summer precipitation and autumn precipitation showed an increasing trend in the north and a decreasing trend in the south; the spring precipitation showed an increasing trend and the winter precipitation showed an increasing trend in some stations; the annual and summer precipitation showed a decreasing trend in some stations, autumn precipitation, spring precipitation and winter precipitation showed an increasing trend in some stations. It is also found that there were vibration periods of 2 ~ 3 a, 4 ~ 5 a and 10 ~ 15 a. The South Asian monsoon mainly influenced the precipitation on the northeast slopes of the plateau; the westerly affected annual precipitation certainly, which was positively related to the precipitation in the north and negatively related to the precipitation in the south.

Key Words: the northeast slopes of Qinghai-Tibet Plateau; annual and seasonal precipitation; change characteristics; affecting factors

(本文编辑: 周成林)