

文章编号:2095-6134(2018)04-0500-06

# 青藏高原夏季降水与东亚、南亚夏季风 相关程度的空间格局\*

高 东,牛海山<sup>†</sup>

(中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)  
(2017 年 4 月 24 日收稿;2017 年 5 月 23 日收修改稿)

Gao D, Niu H S. Spatial pattern of correlation of summer precipitation in Qinghai-Tibetan Plateau with East Asian and South Asian summer monsoon indices[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018,35(4):500-505.

**摘 要** 基于 CRU\_TS4.0 数据、东亚夏季风指数和南亚夏季风指数,使用偏相关分析方法,分析青藏高原 1970—2014 年间夏季(6—8 月)降水的变化趋势及其对东亚夏季风(EASM)和南亚夏季风(SASM)响应的格局。结果表明:SASM 与青藏高原夏季降水显著性相关的范围要明显大于 EASM,SASM 正相关区域位于青藏高原南部地区,负相关区域位于正相关区域外围、高大山体后部的高原西缘、中部和北部地区。EASM 与高原夏季降水正相关区域集中分布于柴达木盆地,负相关区域面积较大,主要位于高原的中部和西部地区。

**关键词** 东亚夏季风;南亚夏季风;CRU\_TS4.0 数据;偏相关分析;青藏高原夏季降水  
中图分类号:P467 文献标志码:A doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2018.04.012

## Spatial pattern of correlation of summer precipitation in Qinghai-Tibetan Plateau with East Asian and South Asian summer monsoon indices

GAO Dong, NIU Haishan

(College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Influence of East Asian summer monsoon (EASM) and South Asian summer monsoon (SASM) on summer precipitation in Qinghai-Tibetan Plateau was evaluated, based on dataset CRU\_TS4.0, East Asian summer monsoon index (EASMI), and South Asian summer monsoon index (SASMI). By using partial correlation method, the tempo-spatial pattern of summer precipitation in the region was also examined. The results showed that SASM was associated with much larger area than EASM. SASM was positively correlated with precipitation in part of the southern plateau, while was negatively correlated with the middle, the north, and the west of the plateau. Positive correlation between EASM and precipitation was found in Qaidam Basin and surrounding regions.

**Keywords** East Asian summer monsoon; South Asian summer monsoon; CRU\_TS4.0 data; partial correlation analysis; summer precipitation in Qinghai-Tibetan Plateau

\* 科技部国家重点基础研究发展计划项目(2013CB956000)资助

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: niuhs@ucas.ac.cn

青藏高原是中国最大的高原,也是世界上海拔最高的地貌单元,其具有的特殊地形以及独特的热力循环系统,在高原地区产生特殊的气候系统,也对中国乃至全球的气候产生深远的影响。由此,青藏高原被称为“全球变化与地球系统科学统一研究的最佳天然实验室”<sup>[1]</sup>和“全球气候变化的驱动机与放大器”<sup>[2]</sup>。从20世纪50年代开始,中国科研人员便开始了对青藏高原的考察研究,并取得重大成果<sup>[3]</sup>。

受青藏高原的影响以及海陆分布的差异,亚洲是全球最大的季风地区。以往很多研究展现出亚洲季风的爆发、维持以及演化受到青藏高原的影响,吴国雄等<sup>[4]</sup>利用再分析数据和数值模拟,证明高原加热等状况调节着亚洲季风。简茂球和罗会邦<sup>[5]</sup>研究指出,青藏高原的表面加热是决定亚洲季风爆发的一个重要因素。赵声蓉等<sup>[6]</sup>发现,青藏高原上异常热力影响亚洲季风以及欧亚中高纬度地区的环流,从而对中国内陆地区的水文过程产生影响。Wei等<sup>[7]</sup>从分析高原及周围区域的大气热源出发,进而分析高原对于西北地区降水的影响。由此,青藏高原影响中国很多地区的大气环流及气候。Tao和Chen<sup>[8]</sup>在20世纪80年代提出,亚洲的季风系统分为:东亚季风以及南亚季风两个子系统,受到位置、大气环流、地形等的影响,南亚季风以及东亚季风对中国内陆包括青藏高原产生不同的影响。

研究者也做了关于季风、水汽循环及输送影响青藏高原降水的机理的很多研究工作。刘晓东等<sup>[9]</sup>讨论对高原中部以及东部降水造成影响的环流特点,提出北大西洋涛动的变化影响青藏高原的中东部降水,西风环流的改变,引起青藏高原南北降水的相反变化。王可丽等<sup>[10]</sup>利用NCEP/NCAR再分析资料,分析青藏高原东部的西南季风气流对高原的水汽输送,发现青藏高原中西部地区的降水与西南季风密切相关。高登义<sup>[11]</sup>研究发现青藏高原东南部地区的降水主要受到来自雅鲁藏布江通道水汽的影响。Gao等<sup>[12]</sup>指出,起源于印度次大陆的水汽通过喜马拉雅山脉最终影响青藏高原的西部降水。田立德等<sup>[13]</sup>通过降水中稳定同位素的分析以及结合NCEP/NCAR再分析数据研究发现,青藏高原夏季东部降水的水汽主要来源于西南季风。

目前东亚夏季风(EASM, East Asian summer monsoon)以及南亚夏季风(SASM, South Asian

summer monsoon)对青藏高原降水的影响范围以及对两种季风的作用路径研究较少。而且,青藏高原的气象站点数据存在分布稀疏以及有些地区年份数据缺失的问题。因此,本文采用英国East Anglia大学的Climatic Research Unit(简称CRU)整合的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格的降水数据,采用偏相关的方法,通过对青藏高原每个栅格点降水的时间序列进行分析,得到1970—2014年东亚夏季风和南亚夏季风对青藏高原各地区降水的影响差异。

## 1 研究区概况

本研究的区域为有着“世界第三极”之称的青藏高原,青藏高原位于中国西南部,范围为 $26^\circ 00'12''N \sim 39^\circ 46'50''N, 73^\circ 18'52''E \sim 104^\circ 46'59''E$ ,面积约为 $257.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占中国大陆总面积的26.8%。青藏高原在中国境内的部分西起帕米尔高原、东至横断山脉、南自喜马拉雅山、北迄昆仑山北侧<sup>[14]</sup>。

青藏高原地域广阔,地势高耸,存在复杂多样的气候条件以及多种的气候类型。青藏高原的气候特征为:气温较低,气温的年较差小,日较差大;降水空间分布不均匀,干湿季较明确,并且雨热同期;太阳辐射较强,日照的时间长,气压整体低<sup>[15]</sup>。

## 2 数据以及方法

### 2.1 数据来源

1)1970—2014年青藏高原地区的CRU\_TS4.0栅格数据。英国East Anglia大学的CRU通过整合若干个数据库重建的一套无中断且覆盖完整的高分辨率地表气候数据集。闻新宇等<sup>[16]</sup>发现CRU数据展现的中国降水量的变化与气象站观测的变化较吻合,较完整地描述了中国20世纪气候的变化特征。国外研究者在研究区域降水量减少成因时也将CRU数据作为基础数据来使用<sup>[17]</sup>。CRU高分辨率月平均气候数据是根据全世界4000多个气象站的观测数据进行插值得到的高分辨率、长时间尺度的栅格资料。本文使用的数据集是CRU\_TS4.0版本,时间跨度是1970—2014年,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,具体分析时用到的夏季降水数据是6—8月的月平均数据。

2)1970—2014年6—8月平均东亚夏季风强度指数(EASMI, EASM index)以及平均南亚夏季风强度指数(SASMI, SASM index),由北京师范大学

全球变化与地球系统科学研究所的李建平教授提供, Li 和 Zeng<sup>[18-19]</sup>详细说明了该数据集的可靠性。

## 2.2 研究方法

1) 偏相关分析方法。生态系统以及本文所研究的气候系统都是多要素混合的复杂系统, 任何一个要素的变化都必将会对其他的要素产生一定的影响。同理, 任何一个要素的变化都是由很多其他不同要素变化引起的。在研究某一个要素与另外一个要素的相关程度时, 经常会把这两个要素之外的要素当成常数, 也就是去除其他要素产生的影响, 这样单独研究两个要素之间相关性的方法称为偏相关, 一般用偏相关系数来表示, 显著性检验采用 t 检验<sup>[20]</sup>。

青藏高原降水与 EASMI、青藏高原降水与 SASMI 的偏相关系数的计算分别为:

$$R_{re,rs} = \frac{R_{re} - R_{rs} \times R_{es}}{\sqrt{(1 - R_{rs}^2) \times (1 - R_{es}^2)}}, \quad (1)$$

$$R_{rs,se} = \frac{R_{rs} - R_{re} \times R_{se}}{\sqrt{(1 - R_{re}^2) \times (1 - R_{se}^2)}}. \quad (2)$$

t 检验计算为

$$t = \frac{R}{\sqrt{1 - R^2}} \times \sqrt{n - m - 1}. \quad (3)$$

式中,  $R$  为偏相关系数,  $n$  为样本数,  $m$  为自变量个数。  $R_{re,rs}$  与  $R_{rs,se}$  分别为青藏高原降水与 EASMI 的偏相关系数以及青藏高原降水与 SASMI 的偏相关系数;  $R_{re}$ 、 $R_{rs}$ 、 $R_{se}$  分别为青藏高原降水与 EASMI、青藏高原降水与 SASMI、EASMI 与 SASMI 的单相关系数。

2) 本研究使用 R 软件进行数据分析, 使用 ggm (版本号 2.3) 以及 RNetCDF (版本号 1.8-2) 等 R 包。 ggm 用于偏相关分析, RNetCDF 用于处

理 CRU\_TS4.0 栅格数据。

## 3 研究结果

### 3.1 青藏高原夏季降水分析

为了分析青藏高原夏季降水的趋势, 本研究使用 1970—2014 年 CRU\_TS4.0 的降水栅格数据, 针对每个栅格点夏季降水的时间序列做线性拟合, 输出拟合曲线的系数并且生成图 1。

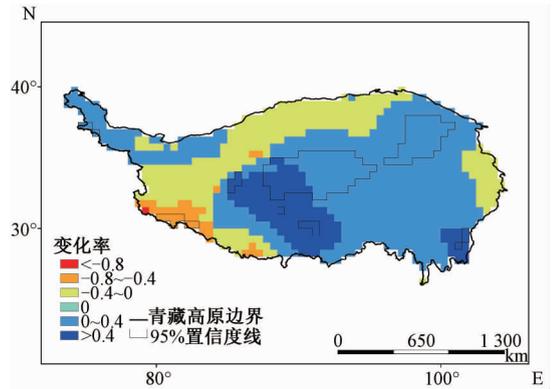


图 1 1970—2014 年青藏高原夏季 (6—8 月) 降水趋势图  
Fig.1 Precipitation trends in Qinghai-Tibetan Plateau in summers (June to August) from 1970 to 2014

从图 1 可以看出, 在研究范围内, 青藏高原夏季降水的趋势很清晰。整体上, 青藏高原大部分地区夏季降水是增加趋势, 特别是青藏高原的中南部以及东南地区; 然而在青藏高原的西南地区, 夏季降水则是明显的减少趋势。

### 3.2 EASMI 对青藏高原降水的影响研究

图 2 是 EASMI 与降水相关性空间分布情况, 图 2(a) 是两个因素直接相关, 并不控制 SASM 影响的结果, 图 2(b) 使用偏相关去掉 SASM 影响后的结果。

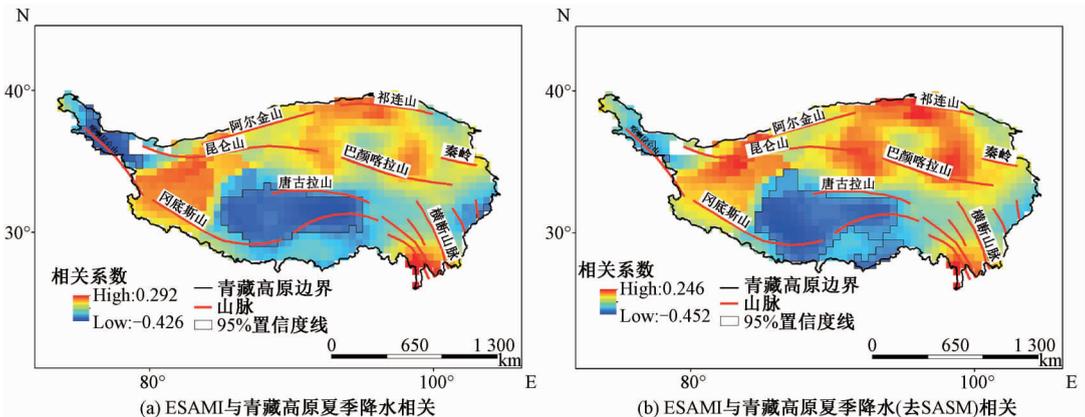


图 2 EASMI 与青藏高原夏季 (6—8 月) 降水相关性分布

Fig. 2 Spatial-pattern of correlation between EASMI and summer (June to August) precipitation in Qinghai-Tibetan Plateau

EASMI 与降水正相关的区域有 3 个(图 2(a)),一个在高原东北柴达木盆地周边,一个是高原西部冈底斯山与昆仑山夹持地区,还有一个是东南部横断山脉区域。相关系数值大都超过 0.20,东南部地区相关系数值大于 0.25,通过 95% 置信度检验。负相关关系区域出现在中部地势相对较低、绵延东西的谷地(由唐古拉山脉山与念青唐古拉山脉地区夹持的区域),相关系数值大都超过  $-0.20$ ,绝大部分区域相关在 95% 置信度达到显著水平。

在消除 SASM 对于青藏高原降水的影响之后(图 2(b)),EASMI 与夏季降水之间关系的空间格局没有根本性的变化,但与图 2(a)相比,柴达木盆地周边正相关区域稍有扩大、高原东南部正相关地区稍有缩小,中部负相关区域的面积有比较明显的扩大。但高原西北部(塔里木盆地南边)一片显著负相关区域(图 2(a))不仅面积上缩小、而且相关强度下降。而且在昆仑

山西端与冈底斯山夹持的区域,正相关的程度有所增强。

通过以上分析,青藏高原降水与东亚夏季风显著性相关的区域范围不大,特别是显著正相关区域,而在青藏高原中部大部分地区呈现显著的负相关。在高原东北部的柴达木盆地以及西南部的横断山脉,区域降水与东亚夏季风正相关程度很高,由此推断,东亚夏季风是通过柴达木盆地以及横断山脉影响青藏高原的。然而东亚夏季风沿着柴达木盆地以及横断山脉进入青藏高原之后的作用路径,则需要结合风向图以及水汽通道等进行进一步的研究分析,相关关系定量分析的结果结合风向图、水汽通道图定性分析的结果,能够更好地解释这个问题。

### 3.3 SASMI 对青藏高原降水的影响研究

图 3 是不扣除(a)和扣除(b)EASM 影响情况下 SASMI 与高原夏季降水相关性的空间分布关系。

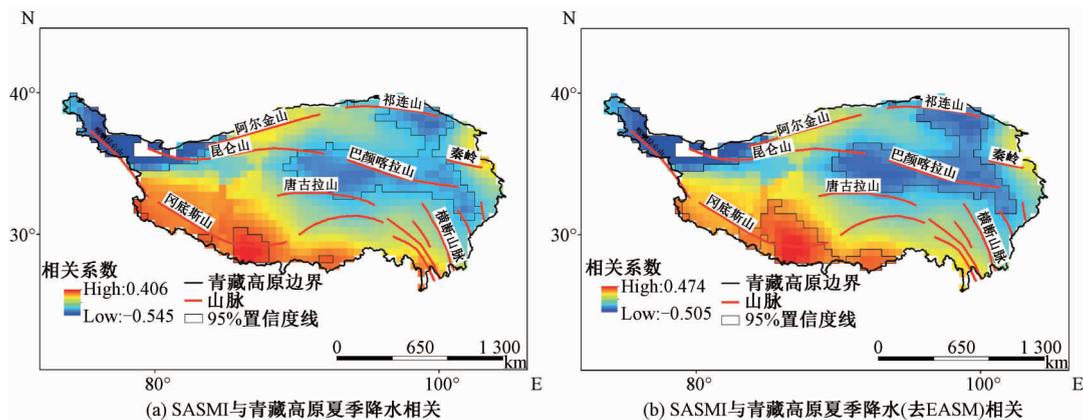


图 3 SASMI 与青藏高原夏季(6—8月)降水相关性分布

Fig. 3 Spatial pattern of correlation between SASMI and summer (June to August) precipitation in Qinghai-Tibetan Plateau

正相关的区域主要分布在青藏高原的东南、南部以及西南部地区,其中此片区域中部分地区 SASMI 与高原降水的相关系数超过 0.30,而且通过 95% 置信度检验。与此同时,负相关区域较多,青藏高原西部、东北部以及中部地区均有,而且西部、东北部的部分地区 SASMI 与高原降水的相关系数超过  $-0.40$ ,通过 95% 置信度检验。在消除 EASM 的影响之后(图 3(b)),SASMI 与高原夏季降水相关性的空间格局变化不大,但是在高原西南地区显著正相关的面积增大;显著性负相关面积变化很小。由于喜马拉雅山脉的阻隔,南亚夏季风通过翻越山脉影响青藏高原的水汽是有限的,所以与南亚夏季风正相关的区域大都集

中于青藏高原南部地区。横断山脉地区与南亚夏季风呈现一定的正相关,证明南亚夏季风也是通过横断山区影响青藏高原。

## 4 讨论与结论

虽然可以根据已有研究对两种季风在青藏高原的“势力范围”和作用路径进行一般推测,但只有数量分析才能得到具体范围和作用方向的知识,本研究就是在这方面进行的初步尝试。

研究青藏高原夏季降水趋势时发现,青藏高原西南地区夏季降水减少,而同样受到南亚季风影响的南部其他区域却是降水增加的趋势。这可能是由于青藏高原西南地区气候比其他地区要复

杂, Dong<sup>[21]</sup> 研究发现, 印度平原深对流影响青藏高原西南部的夏季降水, 青藏高原西南部一半以上的夏季降水和这一水汽通道有关。气候的多样以及复杂的水汽输送, 青藏高原西南地区的降水也就会不同于其他地区。

已有研究表明柴达木盆地受到高原季风、西风环流的影响较大<sup>[22]</sup>, 而本研究中盆地周边出现受 EASM 正向作用的区域(图 2), 虽然相关性在 0.05 水平并没有达到显著, 但由于这是附近大量栅格的一致性趋势, 而且这个规律从地形上能够得到解释, 所以不能用偶发性去解释这个区域的正相关关系。柴达木盆地是西风为主, 本研究也做了西风指数与高原降水的相关分析, 发现柴达木盆地降水与西风指数并没有显著相关性。若要影响柴达木盆地降水的主导因素, 则需要结合更多其他数据进行分析。

与 SASM 正相关的区域在喜马拉雅山脉区域和横断山南部地区(图 3), 这与以前研究者所认识的 SASM 气候作用区大体吻合<sup>[23]</sup>。

与 SASM 负相关的有 3 个区域(图 3), 第 1 个区域在塔里木盆地南侧、昆仑山脉中段偏西部分, 是高原西北边缘有一个狭长区域。这一部分既与 SASM 也与 EASM 呈负相关关系(图 2(a), 图 3(a)), 但与 SASM 关系更密切一些, 因为在扣除 SASM 作用后 EASM 与此处相关关系明显减弱(图 2(b)), 而在扣除 EASM 之后该处与 SASM 的相关性反而有一点增强。第 2 个区域在高原的中东部(图 3), 这个区域又可以明显地划分为两个部分, 一个在高原正中部(唐古拉山脉以北、昆仑山脉东段巴颜喀拉山脉西段以南), 另一个在高原东部(沙鲁里山及邛崃山之间部分)。SASM 的负相关区域(即塔里木盆地南缘、高原中部和东部, 图 3(b)) 都恰好在正相关区域的外围和高大山体的周围地区。第 3 个区域是高原北部祁连山及其以南地区。

本研究的结果也可能会受到数据源 CRU\_TS 本身的影响。在气象站稀少的地区, CRU 数据精确性会降低。然而对 CRU\_TS 降水数据在青藏高原地区的最新评估表明, 该数据集虽然系统地低估了年降水量, 仍然能够较好地反映时间动态<sup>[24]</sup>。气候系统异常复杂, 本研究并没有从气候系统的机理角度去分析, 也没有考虑高原季风的作用, 而只是对相关性的空间格局的静态描述, 但是这种相关性的空间格局体现出与地形要素之间

的高度契合, 至少说明本研究所揭示的两种季风的作用区能够在地形方面得到一定的支持。

研究结论如下:

1) 1970—2014 年青藏高原夏季降水变化的趋势较为一致, 大部分地区夏季降水明显增加, 只有西南地区夏季降水是明显的减少。

2) 东亚夏季风与青藏高原夏季降水正相关的区域集中分布在柴达木盆地边缘以及横断山脉地区; 但是在青藏高原中部以及西部地区是显著的负相关。

3) 南亚夏季风对于高原降水的显著性影响范围要大于东亚夏季风, 显著正相关的区域是青藏高原南部地区; 显著负相关区域主要在正相关区域的外围、高大山体周围, 分布于高原西缘(塔里木盆地西南侧)、高原中部和北部地区。

## 参考文献

- [1] 毕思文. 全球变化与地球系统科学统一研究的最佳天然实验室——青藏高原[J]. 系统工程理论与实践, 1997, 5(5): 72-77.
- [2] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球变化的驱动力与放大器[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1996, 32(1): 108-115.
- [3] 齐冬梅, 李跃清. 青藏高原季风研究主要进展及其科学意义[J]. 干旱气象, 2007, 25(4): 74-79.
- [4] 吴国雄, 何编, 刘屹岷, 等. 青藏高原和亚洲夏季风动力学研究的新进展[J]. 大气科学, 2016, 40(1): 22-32.
- [5] 简茂球, 罗会邦. 1998 年青藏高原东部及其邻近地区大气热源与南海夏季风的关系[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 381-387.
- [6] 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(5): 881-893.
- [7] Wei N, Gong Y F, He J H. Structural variation of an atmospheric heat source over the Qinghai-Xizang Plateau and its influence on precipitation in northwest China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(5): 1 027-1 041.
- [8] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China[M]. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987: 60-92.
- [9] 刘晓东, 张敏锋, 惠晓英. 青藏高原当代气候变化特征及其对温室效应的响应[J]. 地理科学, 1998, 18(2): 113-121.
- [10] 王可丽, 江颀, 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(3): 432-438.
- [11] 高登义. 雅鲁藏布江水汽通道考察研究[J]. 自然杂志, 2008, 30(5): 301-303.
- [12] Gao Y H, Guo L, Zhang Y X. Changes in moisture flux over the Tibetan Plateau during 1979-2011 and possible mechanisms[J]. Journal of Climate, 2014, 27(5): 1 876-1 893.

- [13] 田立德,马凌龙,余武生,等. 青藏高原东部玉树降水中稳定同位素季节变化与水汽输送[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(8):986-992.
- [14] 张懿铨,李炳元,郑度,等. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究,2002,21(1):1-8.
- [15] 张继承,姜琦刚,李远华,等. 近 50 年柴达木盆地湿地变迁及其气候背景分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007,37(4):752-758.
- [16] 闻新宇,王绍武,朱锦红. 英国 cru 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J]. 大气科学,2006,30(5):894-904.
- [17] Delworth T L, Zeng F R. Regional rainfall decline in Australia attributed to anthropogenic greenhouse gases and ozone levels[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(8):583-587.
- [18] Li J P, Zeng Q C. A unified monsoon index[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(8):1 274.
- [19] Li J P, Zeng Q C. A new monsoon index and its inter-annual variability and relation with monsoon precipitation [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(3):351-365.
- [20] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [21] Dong W H. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent[J]. Nature Communications, 2016,7:1-9.
- [22] 李林,申红艳,李红梅,等. 柴达木盆地气候变化的区域显著性及其成因研究[J]. 自然资源学报,2015,30(4):641-650.
- [23] 郑度,姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [24] Shi H Y, Li T J, Wei J H. Evaluation of the gridded CRU TS precipitation dataset with the point raingauge records over the three-river headwaters region [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548:322-332.