

# 基于降水Z指数的朝鲜降水及早涝时空特征

费龙<sup>1</sup>, 邓国荣<sup>2</sup>, 张洪岩<sup>2</sup>, 郭笑怡<sup>2</sup>, 王晓东<sup>1</sup>

(1. 长春师范大学地理科学学院, 长春 130032; 2. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024)

**摘要:** 利用 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)3B43 月降水数据, 并结合降水 Z 指数, 研究朝鲜 1998—2018 年的降水和旱涝时空格局。结果表明: TRMM 与站点观测降水数据有显著的相关性。朝鲜降水季节性特征明显, 57.29% 的降水集中在夏季, 空间上自东北部沿海岸线向东南递增。朝鲜的区域综合旱涝等级基本处于正常状态, 偏旱和偏涝发生的频率最高, 其次是大旱和大涝, 极旱和极涝发生的频率最低, 夏季和冬季干旱发生最为频繁, 而洪涝在秋季频发。朝鲜北部发生旱涝事件的频率明显高于南部, 咸镜山脉和盖马高原是旱涝的多发地区, 温泉平原则最不易受到旱涝影响。春季、夏季和秋季均呈现洪涝强度增强的趋势。夏季洪涝强度加剧的趋势明显, 中北部地区通过 95% 的显著性检验。

**关键词:** 旱涝; TRMM; 降水 Z 指数; M-K 趋势检验; 朝鲜

旱涝灾害主要是由于降水不足或过多所致<sup>[1]</sup>。旱涝灾害直接危害生命安全, 同时对国民经济发展, 特别是对农业生产产生严重影响<sup>[2]</sup>。近年来, 受到全球气候变化的影响, 旱涝灾害也呈现出频发态势<sup>[3]</sup>。因此探寻旱涝时空格局, 预测未来旱涝趋势, 可有效减少因旱涝灾害导致的经济损失。

传统的气象灾害监测利用站点观测数据进行研究, 通过站点数据可以监测相对长的旱涝特征。李双双等<sup>[4]</sup>利用 34 个站点逐日降水数据分析了 1960—2013 年北京的旱涝变化; 杜华明等<sup>[5]</sup>依据 1961—2012 年 11 个站点气象数据探讨了嘉陵江流域旱涝特征。但一些区域受到站点数量和分布限制, 传统方法在大范围的旱涝监测和评估时缺乏时效性和完整性<sup>[6]</sup>。此外, 受观测数据质量限制加上地形因素影响, 气象数据难以准确、精细地反映区域旱涝空间特征。遥感信息具有覆盖范围广、空间连续性强和不受地面条件限制等特点, 已经被应用于不同空间尺度的旱涝灾情监测研究。遥感旱涝监测以土壤水分和植被状态为核心开展研究, 常见方法包括热惯量法、作物蒸散法和植被指数法等<sup>[6]</sup>。但在实际应用中发现多种遥感干旱指数与站点干旱指数在空间上存在不一致性<sup>[7]</sup>。Quiring 等<sup>[8]</sup>认为基于遥感信息计算的指数不可直接作为气象干旱判别的依据。热带测雨卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 作为空基降雨观测手段已被证明其与气象站点实测的降水量精度基本接近, 具有很好的适用性<sup>[5,9-13]</sup>。并且将降水量用空间格网的形式表现, 可以减少由气象站点内插带来的不确定性, 为旱涝监测提供了良好的数据源。

收稿日期: 2019-12-11; 修订日期: 2020-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801010); 吉林省科技发展计划项目 (20180101082JC, 20190103151JH); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目 (JKH20181182KJ)

作者简介: 费龙 (1976-), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智慧城市、地图学与地理信息系统、农业生产规划。E-mail: flyflylong@163.com

通讯作者: 张洪岩 (1963-), 男, 吉林安图人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境遥感与空间分析。  
E-mail: zhy@nenu.edu.cn

前人已经发展了数个基于气象数据的指数用于表征与水分相关的气象灾害,如帕尔默指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPIE)和降水Z指数等。已有研究发现,单点Z指数表征旱涝程度与实际情况吻合度高;区域综合Z指数考虑降水分布的不均性,能相对准确地反映区域旱涝的程度;且降水Z指数计算简单,常被用于不同尺度的区域旱涝灾害监测和预估研究<sup>[14-17]</sup>。

朝鲜境内地形复杂,受季风气候影响显著,是全球海气相互作用最为复杂和活跃的地区之一<sup>[18]</sup>,旱涝灾害频繁发生<sup>[19]</sup>。而朝鲜的农业灌溉水平较差,旱涝灾害的发生直接影响其粮食产量。朝鲜粮食安全不仅关乎其国内稳定,也涉及到我国东北地区,乃至东北亚地区国际地缘安全。因此,研究朝鲜的降水和旱涝时空分布格局对其农业生产和灾害防治具有重要意义。一直以来,由于受到多方面因素的限制,较难获取朝鲜地区相关数据,TRMM数据可代替气象站点数据。同时,朝鲜与我国东北地区毗邻,降水Z指数作为旱涝指标在我国具有良好的适用性<sup>[20]</sup>。因此,本文利用TRMM数据计算降水Z指数,分析朝鲜1998—2018年降水和旱涝时空分布格局,对比不同季节降水量差异及旱涝发生的频率。揭示这一区域旱涝发生的时空分布特征和变化趋势,可为朝鲜农业生产和灾害防治提供参考。

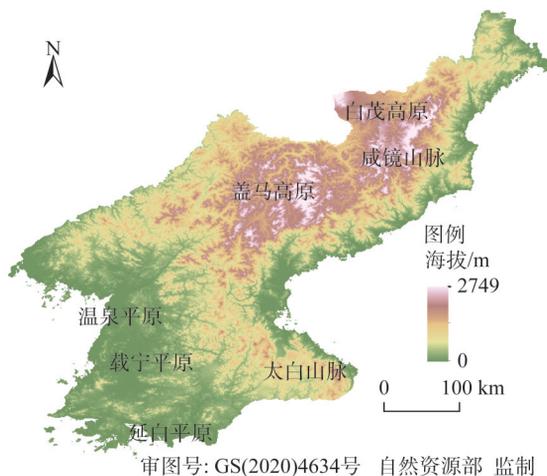
## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

朝鲜民主主义人民共和国简称朝鲜(图1),位于亚洲东部,朝鲜半岛北部,地理位置在 $37^{\circ}36' \sim 43^{\circ}01'N$ 、 $124^{\circ}10' \sim 130^{\circ}40'E$ 之间,总面积为 $1.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。东临日本海,西临黄海,北部与中国吉林省、辽宁省毗邻,东北角和俄罗斯接壤,南部与韩国相邻。朝鲜地形复杂,平均海拔590 m,以北部盖马高原为中心向四周海拔逐渐降低,平原主要分布在西南和东部沿海地区<sup>[21]</sup>。朝鲜受温带东亚季风的影响,降水主要发生在夏季。

### 1.2 TRMM 3B43数据

热带降雨卫星计划是由美国国家航空航天局和日本宇宙航空研究开发机构共同开展的一项为研究降水和能量交换而专门制定的国际联合计划。已有研究表明,TRMM数据在我国东北地区<sup>[22]</sup>、中高纬度地区<sup>[23]</sup>均与气象站点实测数据具有良好的相关性,因此本文利用月际的TRMM 3B43数据对朝鲜的旱涝灾害情况进行评估。该数据可从NASA网站(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)获取,本文中获取了1998年1月至2018年12月共21年的TRMM 3B43数据。其空间分辨



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 研究区位置与地形

Fig. 1 Location of the study area and its terrain

率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , 朝鲜全境共计包括205个像元(格点)。每一个像元值表示月平均降水速率(mm/h), 因此在使用时需要将月平均降水速率转化为月降水量:

$$P = x \times 24 \times d \quad (1)$$

式中:  $P$ 为月降水量(mm);  $x$ 为月平均降水速率(mm/h);  $d$ 为当月的天数(天)。

### 1.3 降水Z指数

本文采用降水Z指数作为旱涝指标, 研究表明该指数适合大范围旱涝时空变化监测。该指数根据多年的月降水时间序列数据计算出目标时间点的旱涝特征。由于某一时段的降水量一般服从P-III分布, 而不是正态分布。因此需要对降水量进行正态化处理, 使之服从正态分布<sup>[24]</sup>。单一格点的降水Z指数计算方法如下:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \times \left( \frac{C_s}{2} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (2)$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^3}{n\sigma^3} \quad (3)$$

$$\varphi_i = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (4)$$

式中:  $Z_i$ 为TRMM数据中某个格点的降水Z指数;  $C_s$ 为偏态系数;  $\varphi_i$ 表示标准化降水量(mm);  $P_i$ 为TRMM格点的降水量(mm);  $n$ 为 $P_i$ 样本数量(个);  $\bar{P}$ 和 $\sigma$ 分别表示降水序列均值和标准差。季节和年尺度的降水Z指数则先要计算季节和年降水量, 之后再依据上述公式计算降水Z指数。根据已有研究, 将降水Z指数划分为7个等级, 依次对应极涝、大涝、偏涝、正常、偏旱、大旱和极旱(表1)<sup>[25]</sup>:

### 1.4 区域综合旱涝指标

对于区域内综合旱涝指标的计算, 在研究区内各像元的降水Z指数值确定的旱涝等级基础上, 进行加权平均确定区域的旱涝等级。由于极端旱涝事件对区域的总体影响较大<sup>[25,26]</sup>, 因此需要对极旱和极涝赋予较大的权重, 计算方法如下<sup>[27]</sup>:

$$I = \frac{2n_1 + n_2 + n_3}{n} \quad (5)$$

$$L = \frac{2n_7 + n_6 + n_5}{n} \quad (6)$$

$$Z' = (I - L) \times 100 \quad (7)$$

式中:  $Z'$ 为区域旱涝综合指数;  $I$ 和 $L$ 分别为洪涝指标和干旱指标。在本文中可将TRMM数据的每一个栅格单元抽象为气象站点,  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_5$ 、 $n_6$ 、 $n_7$ 分别为该区域内降水Z指数为1、2、3、5、6、7级的像元数;  $n$ 为区域总像元数(个)。区域综合旱涝指数 $Z'$ 同样划分7个等级(表1)。

表1 降水Z指数旱涝等级划分标准

Table 1 Classification of drought-flood criterion for Z index

等级	降水Z指数	区域旱涝综合Z'指数	类型
1	$Z > 1.645$	$Z' \geq 75$	极涝
2	$1.037 < Z \leq 1.645$	$50 \leq Z' < 75$	大涝
3	$0.842 < Z \leq 1.037$	$25 \leq Z' < 50$	偏涝
4	$-0.842 < Z \leq 0.842$	$-25 < Z' < 25$	正常
5	$-1.037 < Z \leq -0.842$	$-50 < Z' \leq -25$	偏旱
6	$-1.645 < Z \leq -1.037$	$-75 < Z' \leq -50$	大旱
7	$Z \leq -1.645$	$Z' \leq -75$	极旱

## 1.5 M-K趋势检验

Mann-Kendal (M-K) 检验法较多用于气象数据的趋势分析<sup>[28-30]</sup>。本文将该方法用于在研究时段内朝鲜旱涝的变化趋势研究。M-K趋势检验通过构造标准正态分布统计量 $Z_S$ 来判断样本的趋势。对于独立同分布的时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ,  $n$ 为时间序列长度, 定义统计变量 $S$ :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (8)$$

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$S$ 统计量的方差为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1) \times (2n+5)}{18} \quad (10)$$

当 $n > 10$ 时, 标准正态统计量 $Z_S$ 为:

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

当 $Z_S > 0$ , 序列存在上升趋势;  $Z_S < 0$ , 序列呈下降趋势。当 $|Z_S|$ 等于1.28、1.96和2.32时, 表示其趋势置信度分别为90%、95%和99%。

## 2 结果分析

### 2.1 朝鲜降水时空分布特征

#### 2.1.1 TRMM数据的适用性

尽管TRMM数据已经在全球诸多区域证明其与气象站点的实测数据具有良好的相关性, 但其在朝鲜的适用性仍然未知, 因此首先对其适用性进行评估。本文比较了2000—2015年间朝鲜27个气象站点与TRMM数据的多年平均降水量, 气象站降水数据引自戚德康等<sup>[31]</sup>发表的文献。总体来看TRMM观测的降水量高于实测降水量, 仅有3个站点的实测降水量高于TRMM的观测值。TRMM与气象站点降水量差值范围在-350~278 mm之间, 差值的平均值为-153 mm。以气象站点为真值, TRMM数据的均方根误差为202。相关分析结果(图2)表明: TRMM和气象站点的降水量具有显著的正相关性( $P < 0.01$ )。

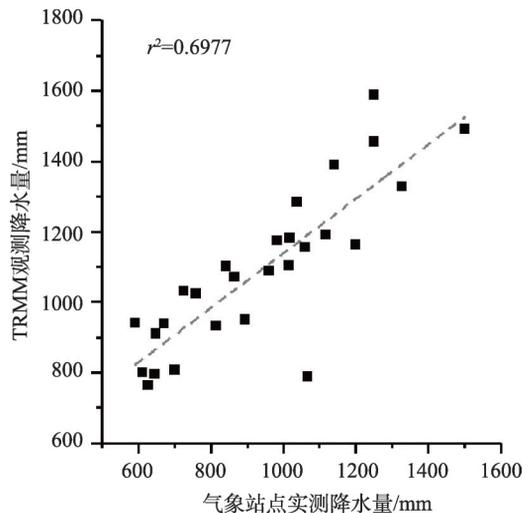


图2 TRMM与气象站点实测数据对比  
Fig. 2 Comparison of observed precipitation from TRMM and climate stations

### 2.1.2 降水时间分布特征

总体上，朝鲜年均降水量为1053.25 mm，总体呈上升趋势，但未通过显著性检验（图3）。降水量的最大值出现在2010年，为1339.03 mm；最小值出现在2014年，仅有669.03 mm。从降水量最大值和最小值出现的年份来看，该结果与气象站点所显示的结果一致<sup>[31]</sup>，同样表明TRMM数据在朝鲜具有较好的适用性。降水量的年际波动较大，且这种情况在近10年尤为明显，基本呈现降水高低值交替出现的特征。降水量不稳定也表明该地区可能更易受到旱涝灾害的影响<sup>[24]</sup>。

朝鲜的降水存在明显的季节性和波动性，但总体都呈现增加趋势。在观测的21年中，春季和秋季的季均降水量分别为177.03 mm和202.67 mm。二者的时间动态特征保持了较好的一致性，基本维持相同的增减态势，但每年秋季降水整体上略高于春季。夏季降水最为充沛，平均降水量可以达到604.10 mm，约占全年降水量的57.29%。且1998—2013年夏季降水呈现显著上升趋势（ $r^2=0.78$ ）。2014年夏季降水量为研究时段内的最低值，仅为405.72 mm，不足平均降水的70%，之后夏季降水逐渐恢复至平均水平。朝鲜冬季的降水量较其他季节相对偏低，平均值为70.51 mm，仅占全年降水的6.90%。

### 2.1.3 降水空间分布特征

对TRMM 3B43数据进行累加平均得到朝鲜年际降水的空间分布（图4），年降水量总体呈现沿海岸线自东北向东南递增的趋势。南部降水较为充沛，年平均降水量均超过1000 mm，其中东南沿海太白山脉是朝鲜降水最多的地区，年平均降水量超过1200 mm。而东北部高原区是朝鲜降水的低值区，其中咸镜山脉的年均降水量不足800 mm，是朝鲜降水最少的地区。

季节性降水空间分布与年际降水空间分布基本保持一致，即从东北部高原山区向东南部平原区降水逐渐增加（图5）。春季仅白茂高原与总体趋势不符，季均

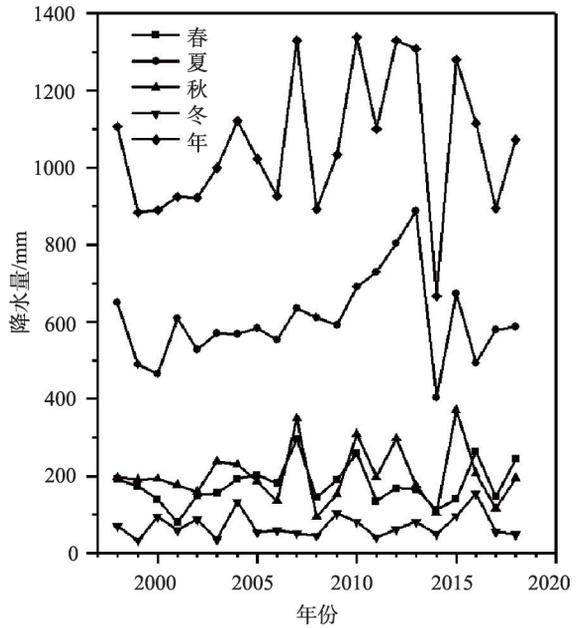


图3 1998—2018年朝鲜降水时间动态特征  
Fig. 3 Temporal patterns of precipitation in DPRK during 1998-2018

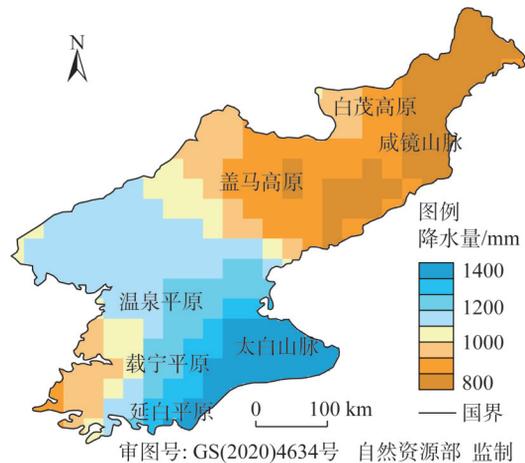


图4 朝鲜年降水量空间分布格局  
Fig. 4 Spatial pattern of annual mean precipitation in DPRK

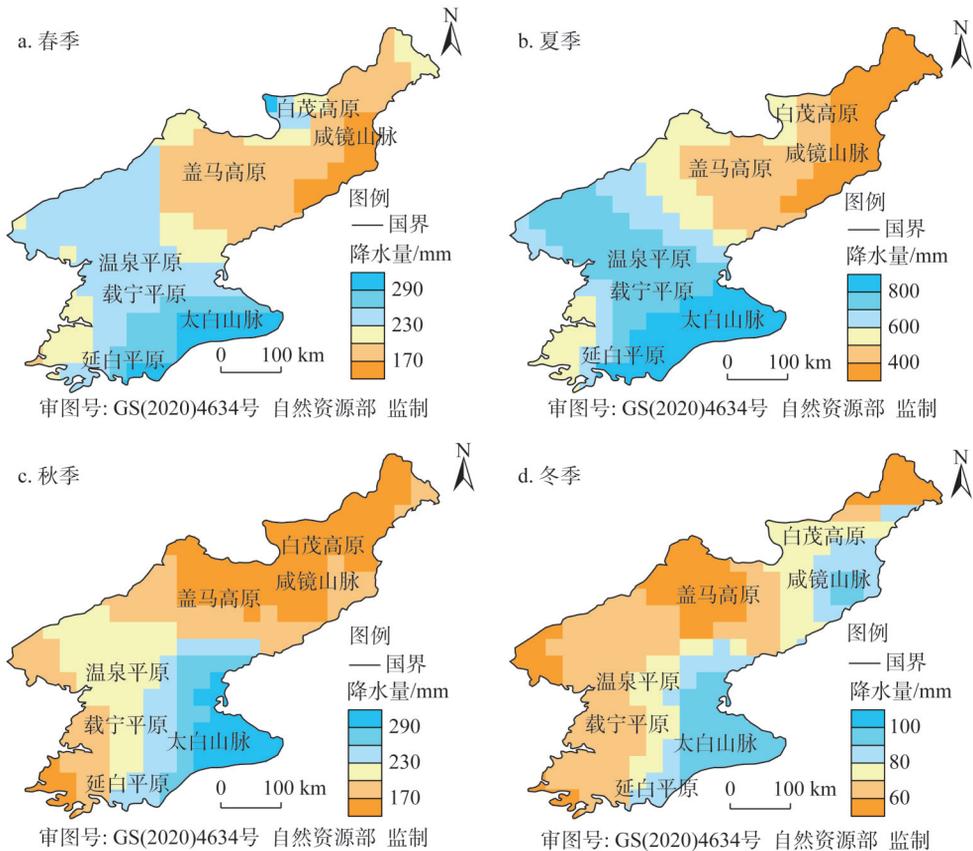


图5 朝鲜季节性降水空间分布格局

Fig. 5 Spatial patterns of precipitation in various seasons in DPRK

降水量超过 200 mm，是朝鲜春季降水最多的地区之一。夏季降水显著增加，但南北差异较大，北部高原山区平均降水量仅为 479.73 mm，而南部平原平均降水量超过 699.32 mm，表现出明显的区域性。秋季和冬季降水持续减少，且降水高值区的范围逐渐缩小，但整体的降水格局保持不变。

## 2.2 旱涝时空变化特征

### 2.2.1 旱涝时间变化特征

本文利用 1998—2018 年的 TRMM 3B43 月降水数据合成年降水量，计算每个格点的降水 Z 指数，在此基础上确定年尺度上的区域旱涝等级（图 6）。朝鲜近 21 年来有 13 年区域旱涝等级处于正常状态（表 2），4 次偏涝（2001 年、2008 年、2016 年和 2018 年）及 4 次偏旱（2010 年、2012 年、2014 年和 2015 年），出现频次分别为 1.5 a/次、5 a/次和 6.7 a/次。旱涝水平不正常的年份集中在近 10 年，呈现旱涝交替的趋势，但并未出现极端旱涝情况。

在季节尺度上总体可以把 1998—2018 年朝鲜的季节性旱涝分为三个阶段：（1）1998—2001 年，这四年间干旱频发，且两次达到极旱等级；（2）2002—2007 年，旱涝发生进入“平静期”；（3）2008—2018 年，旱涝事件频发，且表现出连续和集中的趋势。

在季节性旱涝等级中，偏旱和偏涝发生的频率最高，其次是大旱和大涝，极旱和极涝发生的频率最低。春季总体更易发生干旱，且在 2001 年表现为极旱，Z 值达到

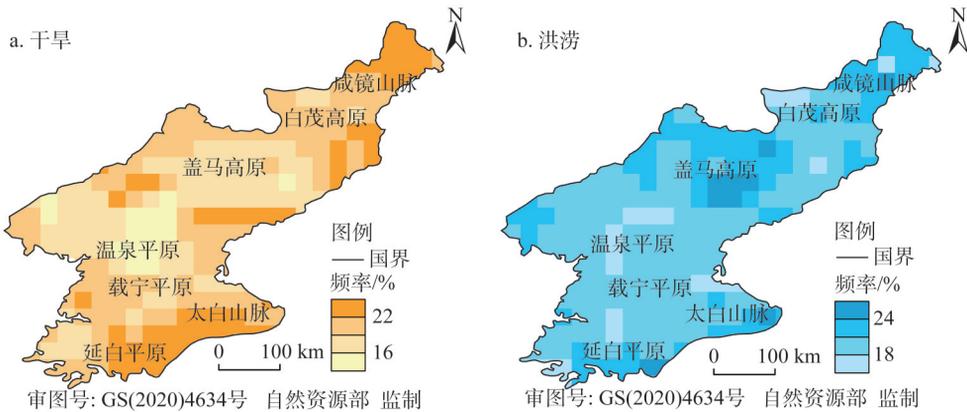


图6 朝鲜旱涝发生频率的空间分布

Fig. 6 Spatial patterns of frequency of drought and flood during 1998 to 2018 in DPRK

表2 朝鲜旱涝年份统计

Table 2 The statistics of drought and flood in North Korea

	极涝	大涝	偏涝	偏旱	大旱	极旱
年际			2001、2016、2018、2008	2010、2012、2014、2015		
春季		2010、2007	2018、2004	2011	2014、2016	2001
夏季			2009、2012、2010	2014、2017、1999、2016	2000	
秋季	2015	2007	2012、2011、2010	2014	2008	2000
冬季	2016	2004	2009、2015、2018	1999、2011、2005、2003	2008	

-81.46, 是近21年来发生的最严重的季节性干旱。夏季没有极端旱涝事件发生, 但近10年旱涝发生呈聚集趋势。秋季洪涝发生的频率较高, 2010—2012年连续三年出现秋涝, 并在2015年发生极涝。冬季是朝鲜旱涝发生最为频繁的季节, 旱涝事件交替出现, 在2016年Z值达到126.50, 是近21年来发生的最严重的季节性洪涝事件。

2.2.2 旱涝空间分布特征

对朝鲜1998—2018年的旱涝灾害进行监测, 将各月的降水Z指数值重分类, 叠加计算得到年际旱涝频率空间分布(图6)。年际尺度上发生旱涝的频率在14%~24%之间。南部延白平原出现干旱的频率较高, 尽管这一地区的年降水量较为充沛, 基本处于1100~1200 mm之间, 但是年降水量的变化剧烈。干旱频率相对较高的区域还包括咸镜山脉北段和东部, 该区域年降水量最低。盖马高原西部及南部延白平原发生洪涝的频率较高, 其他地区的相对均衡。

从季节性干旱角度来看(图7), 春旱的发生在空间上较为分散, 没有明显的高值区存在, 整体干旱频率不高; 在夏季, 盖马高原出现干旱聚集区, 中南部干旱频率降低; 秋季朝鲜全境平均干旱频率超过20%, 是干旱最为多发的季节。北方高值区范围较夏季明显扩大, 形成一条东北—西南方向的干旱带。冬季中北部干旱频率整体大幅降低, 西部沿海的温泉平原大部分区域干旱频率降至15%左右, 为全年最低值。

从季节性洪涝角度来看, 春季南部发生洪涝的频率整体高于北方, 太白山脉和延白平原是受春涝影响最大的地区; 夏涝的空间分布与春涝呈现相反的趋势, 南部涝灾有所

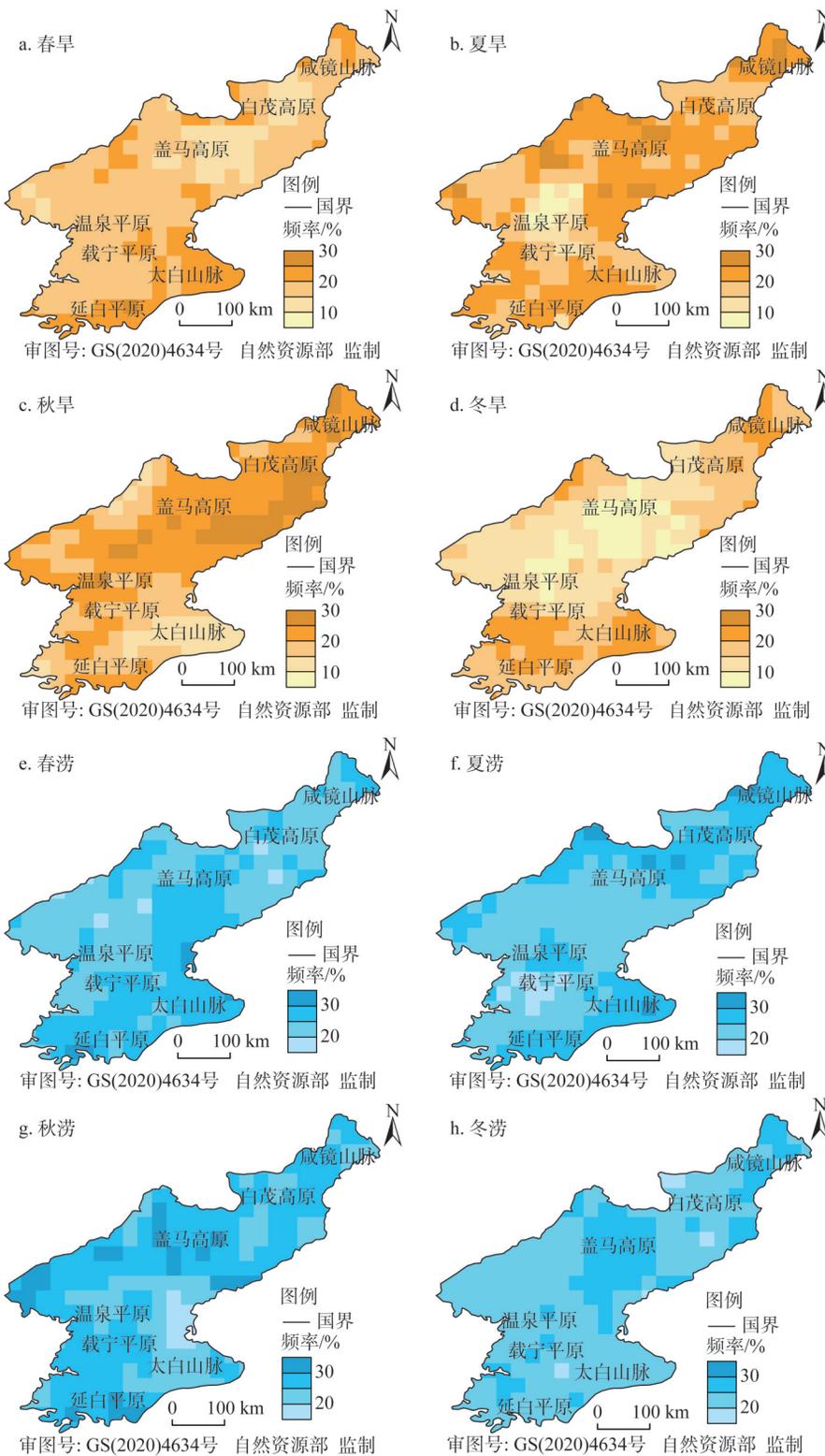


图7 朝鲜季节性旱涝频率空间分布

Fig. 7 Spatial patterns of frequency of drought and flood in various seasons in DPRK

缓解，但北部洪涝频率上升明显，高值区集中在盖马高原和咸镜山脉南侧；秋季是一年 中洪涝发生最为频繁的季节，74.61%的地区洪涝频率超过20%，北部洪涝持续发育，高 值分布在中部山地和西南部的平原区，其余地区的洪涝频率也整体高于其他季节；进入 冬季，涝灾频率较秋季整体下降，空间上没有明显的高值区存在。

通过对比同季旱涝发生的空间位置，可以发现朝鲜全年区域旱涝频率的空间分布基 本保持一致，即某地在当季发生干旱的频率高，发生洪涝的频率也高。总体北方发生旱 涝的频率高于南方。春季和夏季频率基本持平，到秋季达到全年的顶峰，之后在冬季下 降至低谷。

### 2.3 季节性旱涝趋势检验

基于季节尺度降水Z指数的计算结果，采用M-K趋势检验法分析研究区21年来旱涝 空间的变化趋势（图8）。总体来看，降水Z指数均以升高为主，呈显著性变化的区域较 少，各季节变化程度差异明显。春季序列没有明显的趋势。52.68%的地区M-K检验值大 于0，表明降水Z指数有上升趋势，空间上集中于朝鲜东北部地区。西南部降水Z指数有 下降趋势，结合旱涝频率空间分布，自1998年以来西南部春季洪涝频率较高，预计未来 洪涝会有一些的缓和。朝鲜的耕地主要集中在南部温泉平原、载宁平原和延白平原地

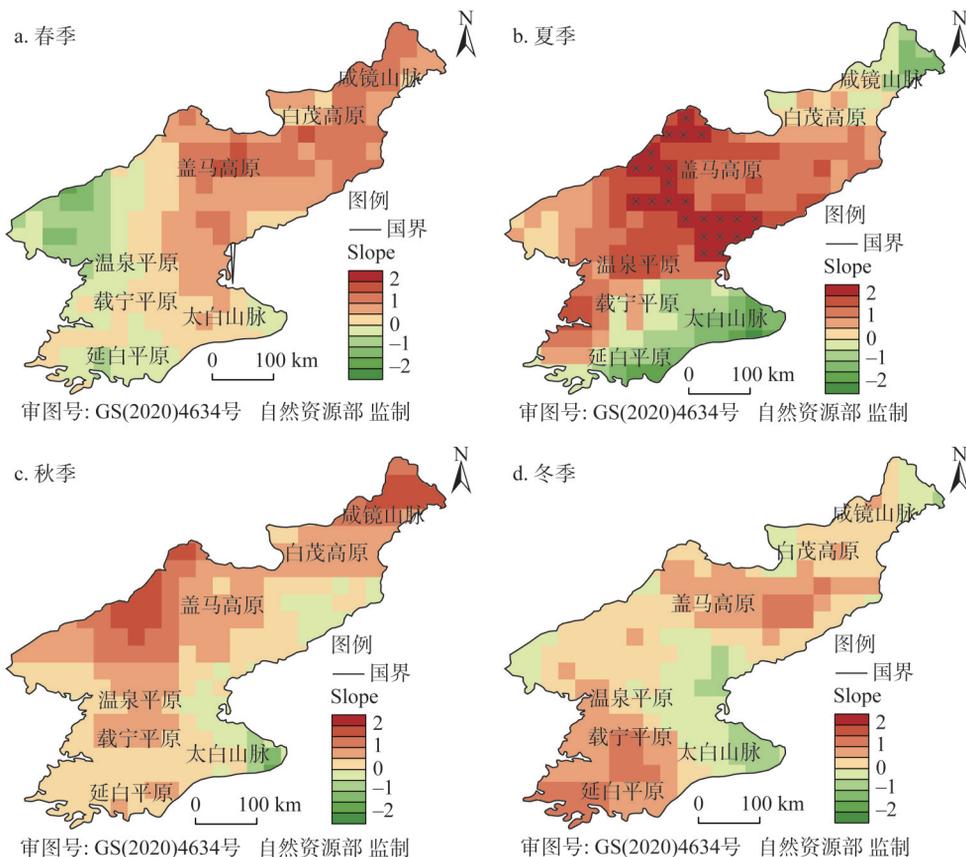


图8 朝鲜季节性旱涝趋势空间分布

Fig. 8 The trend of drought and flood for various seasons in DPRK

区,主要的农作物玉米和水稻也在春季播种。因此,平原地区春涝缓和的趋势有助于朝鲜的农业生产。夏季76.16%的地区降水Z指数有上升趋势,其中中北部地区上升趋势明显,M-K检验值通过95%的显著性检验,占总面积的10.60%。中东部沿海地区M-K检验值通过99%的显著性检验,降水Z指数呈显著上升趋势,预计未来朝鲜中北部地区夏季的洪涝频率会增加。但这些地区主要是高原和山地,耕地分布较少,预计夏涝频率增加对农作物生产的影响较小。秋季朝鲜仍以降水Z指数的上升趋势为主导,近东部沿海有轻微下降趋势。盖马高原北部M-K检验值通过1.96的显著性检验,预计未来该地区秋涝频率呈增加趋势,其余地区趋势均不明显。朝鲜秋季旱涝事件多发,因此在保持现有趋势的情况下,南部平原区应做好旱涝防护措施,减少粮食损失。冬季降水Z指数在东部沿海呈下降趋势的范围扩大,占总面积的25.56%,且太白山脉下降趋势明显。结合旱涝的空间频率分布,冬季朝鲜东部干旱有增加趋势,而西部洪涝可能会增加。考虑到冬季朝鲜已经进入农闲期,且趋势不显著,预计冬季的旱涝趋势对农作物生产直接影响较小。

### 3 结论与讨论

本文基于TRMM 3B43月降水数据,采用降水Z指数作为旱涝指标,研究了朝鲜1998—2018年的降水和旱涝时空分布格局,并对降水Z指数进行M-K趋势检验,得出如下结论:

(1) 近21年朝鲜的年均降水量超过1000 mm,总体呈上升趋势。降水量在空间上自东北高原山地沿海岸线向东南递增。降水存在明显的季节性特征,夏季降水量约为604.10 mm,占全年降水的57.29%。春季和秋季降水保持了较好的一致性,而冬季降水较少。

(2) 在年际尺度上,朝鲜的区域旱涝等级基本处于正常状态,并未发生极端旱涝事件;在季节尺度上,偏旱和偏涝发生的频率最高,其次是大旱和大涝,极旱和极涝发生的频率最低。夏季和冬季干旱发生最为频繁,而洪涝在秋季频发。

(3) 季节性旱涝空间分布并没有明显的规律,夏季和秋季咸镜山脉及盖马高原地区频繁受到旱涝灾害的影响,温泉平原较为稳定,旱涝发生的频率较低。

(4) 在空间上,春季和冬季的旱涝趋势不明显。夏季中北部地区降水Z指数M-K检验值通过95%的显著性检验。其中中东部沿海地区M-K检验值通过99%的显著性检验,洪涝显著加剧。秋季盖马高原西北部呈现洪涝频率升高的趋势,其余地区旱涝趋势不明显。

本文发现TRMM数据是研究朝鲜降水及旱涝灾害的有效数据源。通过TRMM数据和降水Z指数的结合,分析朝鲜1998—2018年的旱涝特征,可以为该时段内朝鲜粮食产量评估提供参考,未来可以利用高时效性的TRMM数据评估洪涝灾害对朝鲜农业生产的潜在影响。朝鲜70%的耕地面积是旱地,鉴于朝鲜主要的农业生产季节洪涝情况可能加剧,在朝鲜西部的温泉平原和延白平原农业主产区可适当扩大水稻种植面积,以减少洪涝灾害带来的农业生产风险。由于气象站点数据可获得性的限制,本文中对于TRMM数据仅进行了多年平均值的检验,未来可通过与相关方面的合作获取逐月气象数据,以便更加全面地检验TRMM数据在朝鲜的适用性。TRMM数据在一定程度上弥补了朝鲜公开

气象资料较少的缺陷, 但是其 $0.25^\circ$ 的空间分辨率仍然较低。未来可以考虑采用多种回归方法进行降尺度研究, 以满足朝鲜局部尺度的精细旱涝监测需求。

### 参考文献(References):

- [1] PARK S, IM J, JANG E. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 157-169.
- [2] 田苗, 李卫国. 基于TRMM遥感数据的旱涝时空特征分析. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 252-257. [TIAN M, LI W G. Analysis of spatial and temporal characteristics of drought and flood based on TRMM remote sensing data. *Transactions of the CSAM*, 2015, 46(5): 252-257.]
- [3] 毕硕本, 孙力, 李兴宇. 基于EEMD的1470—1911年黄河中下游地区旱涝灾害多时间尺度特征分析. *自然灾害学报*, 2018, (1): 137-147. [BI S B, SUN L, LI X Y. Characteristics of drought and flood disasters in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911 based on EEMD method. *Journal of Natural Disasters*, 2018, (1): 137-147.]
- [4] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960—2013年北京旱涝变化特征及其影响因素分析. *自然资源学报*, 2015, 30(6): 951-962. [LI S S, YANG S N, LIU X F. The Characteristics of drought-flood variation and its influence factors in Beijing during 1960-2013. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 951-962.]
- [5] 杜华明, 延军平, 杨登兴, 等. 嘉陵江流域降水变化及早涝多时间尺度分析. *自然资源学报*, 2015, 30(5): 836-845. [DU H M, YAN J P, YANG D X, et al. The distribution of precipitation and multi-temporal scales drought-flood analysis in the Jialing River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(5): 836-845.]
- [6] 李卫国. 作物旱涝灾情遥感监测进展与思考. *江苏农业学报*, 2013, 29(6): 1503-1506. [LI W G. Development and thoughts of crop droughts and floods monitoring realized by remote sensing technology. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2013, 29(6): 1503-1506.]
- [7] BAYARIJARGAL Y, KARNIELI A, BAYASGLAN M, et al. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(1): 9-22.
- [8] QUIRING S M, GANESH S. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 330-339.
- [9] 孙美平, 张海瑜, 巩宁刚, 等. 基于TRMM降水订正数据的祁连山地区最大降水高度带研究. *自然资源学报*, 2019, 34(3): 646-657. [SUN M P, ZHANG H Y, GONG N G, et al. Study on maximum precipitation height zone in Qilian Mountains area based on TRMM Precipitation data. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 646-657.]
- [10] SU F, HONG Y, LETTENMAIER D P. Evaluation of TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 9(4): 622-640.
- [11] HUFFMAN G J, ADLER R F, BOLVIN D T. The TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA). *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 8(1): 3-22.
- [12] 武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1015-1026. [WU W B, YOU Q L, WANG D. Characteristics of extreme precipitation in China based on homogenized precipitation data. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 1015-1026.]
- [13] ALMAZROUI M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998-2009. *Atmospheric Research*, 2011, 99(3-4): 400-414.
- [14] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近50年干旱变化特征. *地理学报*, 2003, 58(s1): 61-68. [WANG Z W, ZHAI P M. Climate change in drought over Northern China during 1950-2000. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(s1): 61-68.]
- [15] 李红军, 江志红, 魏文寿. 近40年来塔里木河流域旱涝的气候变化. *地理科学*, 2007, 27(6): 801-807. [LI H J, JIANG Z H, WEI W S. Drought and flood change of Tarim River Basin in recent 40 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(6): 801-807.]
- [16] 邢子强, 严登华, 鲁帆, 等. 人类活动对流域旱涝事件影响研究进展. *自然资源学报*, 2013, 28(6): 1070-1082. [XING Z Q, YAN D H, LU F, et al. Advances in the study of anthropogenic effects on the drought and flood events. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(6): 1070-1082.]

- [17] 何艳虎, 陈晓宏, 林凯荣. 东江流域近50年旱涝时空演变特征. 地理科学, 2014, 34(11): 1391-1398. [HE Y H, CHEN X H, LIN K R. Characteristic of the spatio-temporal distribution of droughts and floods in the Dongjiang Basin in recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11): 1391-1398.]
- [18] 彭世球, 刘段灵, 孙照渤. 区域海气耦合模式研究进展. 中国科学: 地球科学, 2012, 27(9): 1301-1316. [PENG S Q, LIU D L, SUN Z B. Recent advances in regional air-sea coupled models. *Science China: Earth Sciences*. 2012, 27(9): 1301-1316.]
- [19] 景丞, 王艳君, 姜彤. CMIP5多模式对朝鲜干旱模拟与预估. 干旱区资源与环境, 2016, 30(12): 95-102. [JING C, WANG Y J, JIANG T. Simulation and estimation of droughts in North Korea by CMIP5 multi-model ensembles. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(12): 95-102.]
- [20] 杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于TRMM数据的山东省干旱监测及其可靠性检验. 农业工程学报, 2012, 28(2): 121-126. [DU L T, TIAN Q J, HUANG Y, et al. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 121-126.]
- [21] 王蕾. 朝鲜农作物遥感估产及粮食生产潜力评价. 长春: 东北师范大学, 2012. [WANG L. The crop yield estimation and evaluation for potential grain productivity in North Korea. Changchun: Northeast Normal University, 2012.]
- [22] 刘小婵, 赵建军, 张洪岩, 等. TRMM降水数据在东北地区的精度验证与应用. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1047-1056. [LIU X C, ZHAO J J, ZHANG H Y, et al. Accuracy validation and application of TRMM precipitation data in Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(6): 1047-1056.]
- [23] 蔡研聪, 金昌杰, 王安志, 等. 中高纬度地区TRMM卫星降雨数据的精度评价. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3296-3306. [CAI Y C, JIN C J, WANG A Z, et al. Accuracy evaluation of the TRMM satellite-based precipitation data over the mid-high latitudes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(11): 3296-3306.]
- [24] 李景刚, 李纪人, 黄诗峰. 基于TRMM数据和区域综合Z指数的洞庭湖流域近10年旱涝特征分析. 资源科学, 2010, 32(6): 1103-1110. [LI J G, LI J R, HUANG S F. Characteristics of the recent 10-year flood/drought over the Dongting Lake Basin based on TRMM precipitation data and regional integrated Z-Index. *Resources Science*, 2010, 32(6): 1103-1110.]
- [25] 何萍, 白洪强, 李矜霄. 基于Z指数的昆明市洪涝研究. 地球与环境, 2015, 43(1): 71-79. [HE P, BAI H Q, LI J X. Research of flooding based on Z index in Kunming city. *Earth and Environment*, 2015, 43(1): 71-79.]
- [26] 袁媛, 王心源, 雷能忠. 基于GIS的江淮分水岭地区旱涝灾害时空分析. 水文, 2007, 27(6): 36-38. [YUAN Y, WANG X Y, LEI N Z. Analysis of spatial-temporal characteristics of flood and drought in the divide watershed between the rivers of Yangtze and Huaihe Based on GIS. *Journal of China Hydrology*, 2007, 27(6): 36-38.]
- [27] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究. 应用气象学报, 1997, 8(1): 26-33. [JU X S, YANG X W, CHEN L J. Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1997, 8(1): 26-33.]
- [28] DOUGLAS E M, VOGEL R M, KROLL C N. Trends in floods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, 2000, 240(1): 90-105.
- [29] MODARRES R, VDEPRDA S. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, 2007, 70(2): 344-355.
- [30] 李运刚, 何娇楠, 李雪. 基于SPEI和SDI指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析. 地理科学进展, 2016, 35(6): 758-767. [LI Y G, HE J Q, LI X. Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan province based on SPEI and SDI Indices. *Progress in Geography*, 2016, 35(6): 758-767.]
- [31] 戚德康, 南颖, 孙博杨, 等. 2000年以来朝鲜植被覆盖变化及其与气候因子的相关性研究. 干旱区地理, 2017, 40(4): 839-849. [QI D K, NAN Y, SUN B Y, et al. Changes of vegetation coverage and its relationship with climate factors in North Korea since 2000. *Arid Land Geography*, 2017, 40(4): 839-849.]

## Spatiotemporal patterns of precipitation and drought and flood using Z-index in Democratic People's Republic of Korea

FEI Long<sup>1</sup>, DENG Guo-rong<sup>2</sup>, ZHANG Hong-yan<sup>2</sup>, GUO Xiao-yi<sup>2</sup>, WANG Xiao-dong<sup>1</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Changchun Normal University, Changchun 130032, China; 2. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** Drought and flood are the main agrometeorological disasters in the Democratic People's Republic of Korea (DPRK), which have great influences on the growth of the crops and directly affect grain yield. The level of agricultural production is low because of insufficient investment and poor irrigation installation. Drought and flood are prone to a reduction in grain yield in DPRK. The food security issue in DPRK is not only related to this country's domestic stability but also related to the geo-security in Northeast Asia. Therefore, understanding the spatial and temporal patterns of drought and flood is very important for preventing disasters in this country. In this study, the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B43 time series dataset was used to reveal the spatial and temporal patterns of drought and flood in DPRK from 1998 to 2018. The drought and flood levels were developed by a Z-index. In addition, the trend of Z-index is tested by the Mann-Kendall (M-K) method. The result shows that the precipitation in the study area has an obvious seasonal pattern, with more than 57.29% of the rainfall concentrated in summer, and only 6.90% in winter. The precipitation in spring is slightly higher than that in autumn. Both interannual and seasonal precipitation show increasing trends during the study period. The spatial pattern of precipitation increases from the northeast to the southeast along the coastline. Generally, the regional comprehensive drought and flood levels in DPRK are normal at the national scale. Moderate drought and flood levels occur most frequently, followed by severe drought and flood, and the frequency of extreme drought and flood eventd is the lowest. The floods frequently occur in autumn, and droughts frequently occur in summer and winter. The frequency of drought and flood events appear in the north of DPRK, particularly in Hamgyeong Mountains and the Gaema Plateau. Flood intensity shows an increasing trend in spring, summer, and autumn, while drought and flood level tended to be normal in winter. The central and northern regions passed the significance of 95%. It is expected that the trend of drought and flood in DPRK will be consistent in future. The results of the study provide a unique insight for understanding the agricultural production in DPRK.

**Keywords:** drought; flood; TRMM; Z-index; DPRK