

刘玉莲, 姜德君, 康恒元, 等, 2020. 松花江流域夏季雨涝特征及变化[J]. 气象, 46(6): 813-822. Liu Y L, Lou D J, Kang H Y, et al, 2020. Characteristics and changes of waterlogging over the Songhua River Basin in summer[J]. Meteor Mon, 46(6): 813-822(in Chinese).

松花江流域夏季雨涝特征及变化^{*}

刘玉莲¹ 姜德君² 康恒元³ 孙爽¹ 周贺玲⁴

1 黑龙江省气候中心, 哈尔滨 150030

2 黑龙江省齐齐哈尔市气象局, 齐齐哈尔 161006

3 哈尔滨市气象局, 哈尔滨 150001

4 河北省廊坊市气象局, 廊坊 131001

提 要: 利用 1961—2017 年松花江流域月降水数据计算 Z 指数, 分析松花江流域夏季雨涝的气候学特征和年代际变化特征, 及与气候系统指数关系, 得出结论: 松花江流域夏季干流区雨涝发生最多(30 a 中有 12 a 发生雨涝), 其次是嫩江上游(11 a), 小兴安岭山地区雨涝发生最少(7 a)。小兴安岭山地雨涝强度最大(平均 2.1 a^{-1}), 其次是第二松花江上游(1.8 a^{-1}), 张广才岭山地区(1.4 a^{-1})最小。松花江流域 6 月发生雨涝最多, 8 月最少; 8 月平均雨涝强度最大, 7 月最小。1961—2017 年夏季和 7 月, 嫩江下游雨涝减弱明显; 6 月小兴安岭山地区雨涝强度明显增强。松花江流域夏季的雨涝事件受前期大气环流和海洋因子影响。

关键词: 松花江流域, 雨涝, Z 指数

中图分类号: P461, P468

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.008

Characteristics and Changes of Waterlogging over the Songhua River Basin in Summer

LIU Yulian¹ LOU Dejun² KANG Hengyuan³ SUN Shuang¹ ZHOU Heling⁴

1 Heilongjiang Climate Centre, Harbin 150030

2 Qiqihaer Meteorological Office of Heilongjiang Province, Qiqihaer 161006

3 Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150001

4 Langfang Meteorological Office of Hebei Province, Langfang 131001

Abstract: This article calculated the Z-index by using the monthly precipitation data over the Songhua River Basin from 1961 to 2017, and also analyzed the climatological characteristics and interdecadal variations of the summer rain waterlogging over the Songhua River Basin and the relationship with the climate system index. The results are as follows. Waterlogging tends to occur most in the main stream of the Songhua River in summer (12 in 30 years), then in the upper reaches of the Nenjiang River (11 years), and the least in the Xiao Hinggan Mountains area (7 years). However, the Xiao Hinggan Mountains have the highest intensity of waterlogging (average 2.1 a^{-1}), followed by the upstream of Songhua River (1.8 a^{-1}), and in Zhangguangcai Mountains it is the smallest (1.4 a^{-1}). The waterlogging occurs most in June in the Songhua River Basin, and least in August. The average rain intensity of waterlogging is the highest in August

^{*} 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019D013)、国家自然科学基金项目(41771067)、中国气象局气候变化专项(CCSF201842 和 CCSF201910)、中央引导地方科技发展专项(ZY18C12)和黑龙江省气象局重点项目(HQ2019004)共同资助

2019 年 2 月 11 日收稿; 2020 年 2 月 20 日收修定稿

第一作者: 刘玉莲, 主要从事区域气候变化研究. Email: Liuy174@qq.com

通讯作者: 康恒元, 主要从事气象网络与保障. Email: 627362835@qq.com

and the smallest in July. In the summer and July of 1961–2017, the waterlogging over the lower reaches of the Nenjiang River gets weakened significantly. In June, the intensity of waterlogging in the Xiao Hinggan Mountains increases apparently. The summer waterlogging events in the Songhua River Basin are affected by atmospheric circulation and oceanic factors during the previous period.

Key words: Songhua River Basin, waterlogging, Z-index

引 言

雨涝指某一时段内由于降水过多,排水不畅而产生的洪、涝、渍害等的总称。其中洪指河流泛滥和山洪暴发;涝指雨水过多或过于集中,使农田积水成灾;渍指土壤水分过剩,农作物正常生长发育受抑(冯定原等,1992;刘敏等,1995)。在全球变化背景下,地表蒸发加剧,导致大气保水能力增加,全球和区域水循环加快,势必造成部分地区降水增多(IPCC,2012;2013)。在总降水量增大的区域,强降水量极有可能以更大比例增加,即使平均总降水量减少或不变的区域,也存在着强降水量及降水频次增加的现象(Manton et al, 2001; Buffoni et al, 1999)。

很多学者对中国区域降水及早涝变化开展研究。林建和杨贵名(2014)讨论了中国暴雨的时空特征,袁媛等(2017)分析了2016年夏季我国东部降水异常特征及成因,张丰启等(2017)对青岛汛期降水阶段进行划分并讨论其环流背景特征,邢峰等(2018)讨论了黄河流域夏季降水的气候特征及其与大气环流的关系。翟盘茂和潘晓华(2003)、任国玉等(2010)指出,过去几十年,中国总的降水量变化趋势不明显,但雨日显著减少;降水总量不变但频率减少,降水过程可能存在强化趋势,干旱与洪涝可能趋于增多。闵岫和钱永甫(2008a)分析各类降水事件的变化趋势,指出我国四季降水量均有向极端化方向发展的趋势。

孙力等(2002)指出东北地区夏季不同级别旱涝出现概率存在一定差异;王志伟等(2005)研究指出中国南方地区20世纪后半叶夏季(6—8月)雨涝范围在扩大;王革丽等(2007)对中国北方地区旱涝的年际预测开展分析研究,给出场时间序列预测模型的建立思路;龚志强和封国林(2008)分析中国近1000年旱涝的持续性特征,发现旱涝指数序列中的群发现象;闵岫和钱永甫(2008b)研究指出大部分北方地区极端降水的持续性以及区域性均较差;翟

建青等(2011)利用ECHAM5/MPI-OM气候模式输出的降水数据,分析指出中国有一条由东北向西南延伸的干旱趋势带,A2情景下这条干旱带将持续存在,B1情景下中国东部将出现“北涝南旱”格局;罗岚心等(2017)指出珠江流域旱涝严重程度主要受降水量影响,流域夏季雨涝有频发趋势;肖潺等(2017)指出我国处于欧亚大陆东岸,受东亚季风影响,具有典型季风气候特点,降水时空差异特征显著,旱涝灾害突出,且雨涝主要集中在夏季,各流域雨涝年代际变化明显;金燕等(2018)分析云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势,发现云南区域性干旱的发生频次、累积强度和累积影响站次均呈现上升趋势。

松花江流域是我国纬度最高、经度最偏东地区,是国家重要商品粮基地。松花江是我国重点防汛的七大江河之一,降水的年际变化较大且连续多雨与连续少雨的阶段性变化比较明显(于宏敏等,2012;刘玉莲等,2012)。对松花江流域夏季雨涝特征和变化的讨论还较少,加强流域雨涝时空特征分析,对保障国家粮食安全、生态安全和社会经济发展有重大意义。本研究利用松花江流域气象站网降水观测资料和国家气候中心计算的气候系统指数,分析松花江流域夏季雨涝特征与气候指数关系,为松花江流域农业、生态、水文、气候研究、防灾减灾提供依据参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

选取1961—2017年松花江流域内35个资料序列完整的气象台站月降水数据,资料来自中国气象局国家气象观测站网的地面观测数据。气候系统指数源自国家气候中心业务使用的130个气候指数(<https://cmdp.ncc-cma.net/cn/download.htm>)。季节按气象业务规定划分,夏季为6—8月;气候期取1981—2010年。

1.2 方 法

采用 REOF 方法(吴洪宝和吴蕾,2005;刘玉莲等,2012;2013),根据 1981—2010 年松花江流域夏季降水量数据对流域夏季降水的变异性进行分区(图 1)。分区的临界相关系数确定为 0.4($n=30, p=0.05$),即将 REOF 载荷向量值 >0.4 的区域划分为一个降水气候区。图 1 中的 1~7 区分别为嫩江上游、第二松花江上游、干流、嫩江下游、第二松花江下游、张广才岭山地、小兴安岭山地区,下文分别以 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 和 Q_7 代表各分区。选各区载荷向量最大的台站为代表站(表 1), $Q_1 \sim Q_7$ 分别为克山、靖宇、依兰、通榆、长春、牡丹江和伊春。

对雨涝的确定采用 Z 指数方法(Kite,1978)。假设月、季降水量服从 Person III 型分布,对降水量进行正态化处理,可将其概率密度函数PersonIII 型

分布转换为以 Z 为变量的标准正态分布(Kite,1978;鞠笑生等,1997):

$$Z_i = [6(\Phi_i \times C_s/2 + 1)^{1/3}]/C_s - 6/C_s + C_s/6 \tag{1}$$

式中: C_s 为偏态系数, Φ_i 为标准化变量。这 2 个参数的计算:

$$C_s = [(X_1 - X_a)^3 + (X_2 - X_a)^3 + \dots + (X_n - X_a)^3]/n\sigma^3$$
$$\Phi_i = (X_i - X_a)/\sigma \tag{2}$$

式中: n 为序列长度; X_i 为序列中第 i 个降水量; X_a 为序列平均降水量; σ 为标准偏差,可由降水序列求得:

$$\sigma = \text{Sqrt}\{[(X_1 - X_a)^2 + (X_2 - X_a)^2 + \dots + (X_n - X_a)^2]/n\} \tag{3}$$

根据 Z 变量的正态分布曲线,划分出 4 个等级并确定相应的 Z 界限值,作为各级雨涝指标(表 2)。

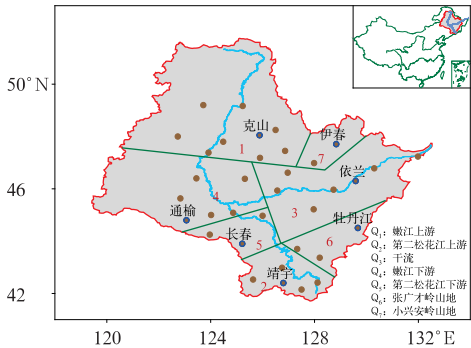


图 1 松花江流域位置、气象台站分布及分区
(蓝线:河流,绿线:分区线;圆点:气象台站,其中蓝色圆点为分区代表站)

Fig.1 Location of the Songhua River Basin, distribution of meteorological stations (blue line: river, green line: division line; dots: meteorological station, especially the blue dots for regional representative stations)

表 1 松花江流域气候分区及代表站
Table 1 Climate division and representative stations over Songhua River Basin

气候分区	名称	代表站
Q_1	嫩江上游	克山
Q_2	第二松花江上游	靖宇
Q_3	干流	依兰
Q_4	嫩江下游	通榆
Q_5	第二松花江下游	长春
Q_6	张广才岭山地	牡丹江
Q_7	小兴安岭山地	伊春

表 2 以 Z 值为指标的雨涝等级

Table 2 Grades of waterlogging with Z-Index		
等级	Z 值	类型
3	$1.645 < Z$	重涝
2	$1.037 < Z \leq 1.645$	大涝
1	$0.542 < Z \leq 1.037$	偏涝
0	$Z \leq 0.542$	正常或旱

统计时段(如夏季)Z 值达到雨涝标准,当年为雨涝年;雨涝频次为统计时期(如 1981—2010 年)有雨涝发生的年数(单位:a);雨涝等级累计值为台站多年雨涝等级的合计值;雨涝强度为统计时期雨涝等级累计值/雨涝频次(单位: a^{-1}),由表 1 可知雨涝强度值越大雨涝越重。

标准化变量采用 Z-Score 方法,标准化变量=距平/标准差(黄嘉佑,1990)。相关显著性水平使用 $p=0$ 的临界值检验(黄嘉佑,1990;魏凤英,2007),文中的显著相关指通过 0.05 显著性水平检验,给出的雨涝与气候指数相关都是显著的。周期分析使用小波分析(<https://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>)。

2 结果分析

2.1 松花江流域降水空间分布特征

1981—2010 年,松花江流域年降水量空间分布(图 2a)呈现南多北少、东多西少, Q_2 区降水最多,

最多在吉林东岗站(779.5 mm), Q_4 区降水最少, 最少在吉林通榆站(370.7 mm)。流域平均年降水量为 548.3 mm, 各分区平均年降水量最多是吉林境内的 Q_2 区, 为 751.9 mm, 其次是东南部的 Q_6 区, 平均为 628.6 mm, 其后依次是 Q_7 、 Q_3 、 Q_1 、 Q_5 区(平均分别为 617.6、561.4、498.8、501.6 mm), 最少是流域西部 Q_4 区(平均为 397.8 mm)。

夏季降水(图 2b)与年降水量空间分布基本一致, 最多在 Q_2 区的桦甸(490.1 mm), 最少在 Q_4 区的通榆(268.8 mm)。流域平均夏季降水量为 361.4 mm, 各分区平均的夏季降水量最多的是 Q_2 区(459.2 mm), 其次 Q_6 区(平均为 396.8 mm), 其后依次是 Q_7 、 Q_3 、 Q_1 、 Q_5 区(平均分别为 392.0、358.2、346.4、344.2 mm), 最少是 Q_4 区(平均为 286.6 mm)。

夏季降水量占年降水量比例(图 2c)的空间分

布与降水量空间分布大致相反, 年和夏季降水最多的东岗夏季占比最小(57.0%), 降水较少的扎兰屯最大(73.7%)。流域平均的夏季降水占比为 65.9%, 平均夏季降水比例最大的是年和夏季降水量都最少的 Q_4 区, 分区平均为 72.1%, 其次是 Q_1 区(平均为 69.4%), 其后依次是 Q_5 、 Q_7 、 Q_3 、 Q_6 区(平均分别为 68.6%、63.5%、63.7%、63.0%), 最少是年和夏季降水都最多的 Q_2 区(平均为 61.1%)。

2.2 松花江流域夏季雨涝年代际变化

统计松花江流域各年代夏季雨涝等级累计值、频次和强度(图 3), 20 世纪 10 年代不足 10 a, 为方便比较, 雨涝等级累计值和雨涝频次以实际值换算为 10 a, 如: 雨涝频次实际在 2011—2017 年为 4 a 时, 则换算为 $4 \times 10/7 = 5.7$ a。

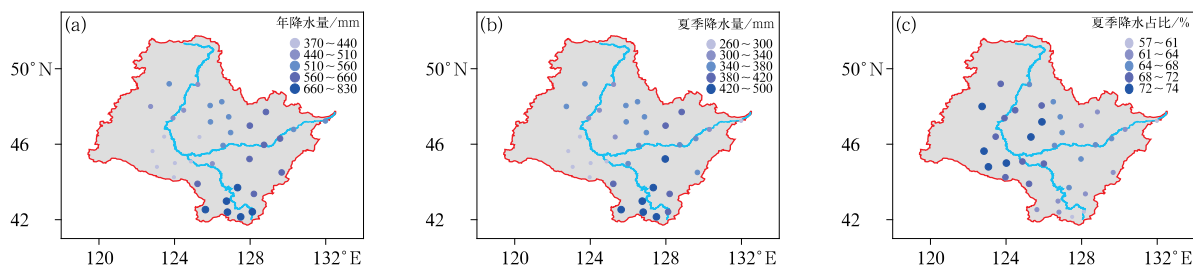


图 2 1981—2010 年松花江流域年(a)和夏季(b)降水空间分布及夏季降水占年总降水比例(c)
Fig. 2 Spatial distribution of annual precipitation (a), summer precipitation (b) and the percentage of summer precipitation in annual precipitation (c) over Songhua River Basin from 1981 to 2010

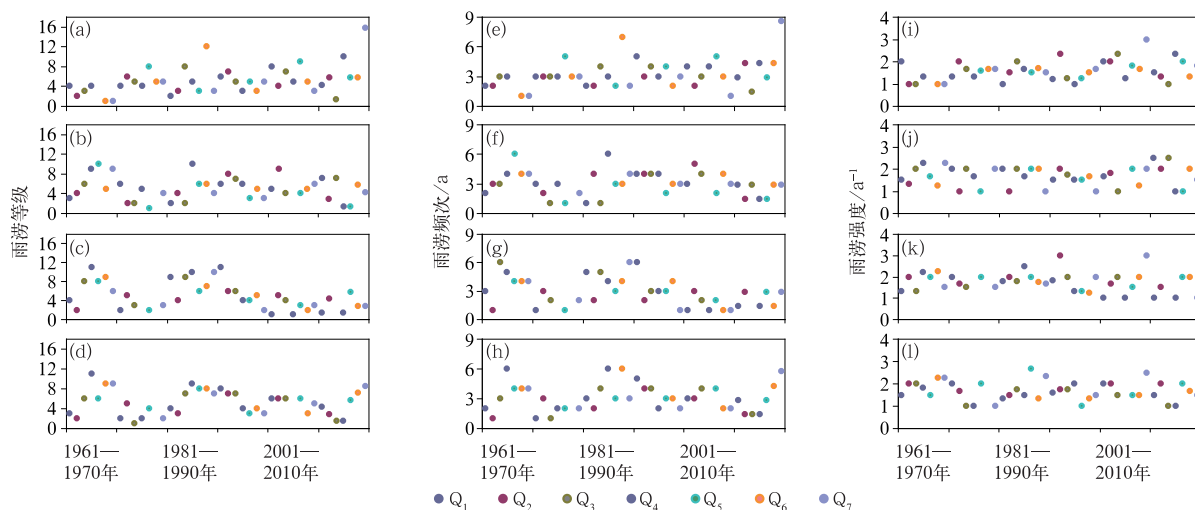


图 3 各年代松花江流域雨涝等级(a, b, c, d)、频次(e, f, g, h)和强度(i, j, k, l)变化

(a, e, i) 6 月, (b, f, j) 7 月, (c, g, k) 8 月, (d, h, l) 夏季

Fig. 3 Changes of waterlogging grade (a, b, c, d), frequency (e, f, g, h) and intensity (i, j, k, l) over Songhua River Basin in different Decades

(a, e, i) June, (b, f, j) July, (c, g, k) August, (d, h, l) summer

1961—1970年夏季雨涝较重区在 Q_4 区, Q_3 和 Q_4 区雨涝事件发生较多, Q_6 和 Q_7 区雨涝强度较大。6月,嫩江流域雨涝较重、强度较大, Q_4 和 Q_3 区雨涝事件发生较多;7月 Q_5 和 Q_4 区雨涝较重, Q_5 区雨涝事件较多, Q_4 和 Q_3 区雨涝强度较大;8月 Q_6 区雨涝较重、强度较大, Q_3 区雨涝事件较多。

1971—1980年夏季第二松花江雨涝较重、雨涝事件发生较多, Q_4 和 Q_5 区雨涝强度较大。6月雨涝较重区在第二松花江流域,多发区在 Q_5 区, Q_2 区雨涝强度较大;7月雨涝较重和多发区在嫩江流域,雨涝强度较大区在流域北部的 Q_1 、 Q_7 和 Q_3 区;8月雨涝较重和多发区在 Q_2 区和东北部的 Q_3 和 Q_7 区, Q_1 和 Q_5 区雨涝强度较大。

1981—1990年夏季 Q_4 、 Q_5 和 Q_6 区雨涝最重,多发区在 Q_1 、 Q_6 和 Q_3 区, Q_5 和 Q_7 区雨涝强度较大。6月流域东部的 Q_6 区是雨涝较重和多发区,强度较强是 Q_3 区;7月雨涝较重和多发区在 Q_4 区;8月雨涝较重和多发区在流域北部(嫩江流域、 Q_3 和 Q_7 区),雨涝强度较大区在流域西南部(Q_4 区、第二松花江流域)。

1991—2000年夏季雨涝较重和多发区是 Q_1 区, Q_4 区雨涝强度较大。6月 Q_1 区是雨涝较重区和强度较大区, Q_2 区强度较大;7月雨涝较重、多发和强度较大区在 Q_3 和 Q_2 区;8月雨涝较重和多发区在 Q_1 区,强度较大区在 Q_2 区。

2001—2010年夏季雨涝较重和多发区在 Q_4 和 Q_3 区,强度较大区是 Q_7 区。6月重涝和多发区在 Q_5 区,强度较大区在 Q_7 区;7月重涝和多发区在 Q_2 区, Q_4 和 Q_7 区强度较大;8月重涝和多发区与7月一致,在 Q_2 区,强度较大区是 Q_7 区。

2011—2017年夏季雨涝较重和多发区在 Q_7 区,强度较大区在第二花江流域。6月重涝和多发区在 Q_7 区,强度较大在 Q_4 区;7月重涝、多发和强度较大区都在 Q_1 和 Q_3 区;8月重涝、多发和强度较大区都在 Q_5 区。

2.3 松花江流域夏季雨涝分布特征

统计1981—2010年松花江流域夏季各分区代表站雨涝等级累计值(图4a~4d)、雨涝频次(表3,图4e~4h)和雨涝强度(图4i~4l)。

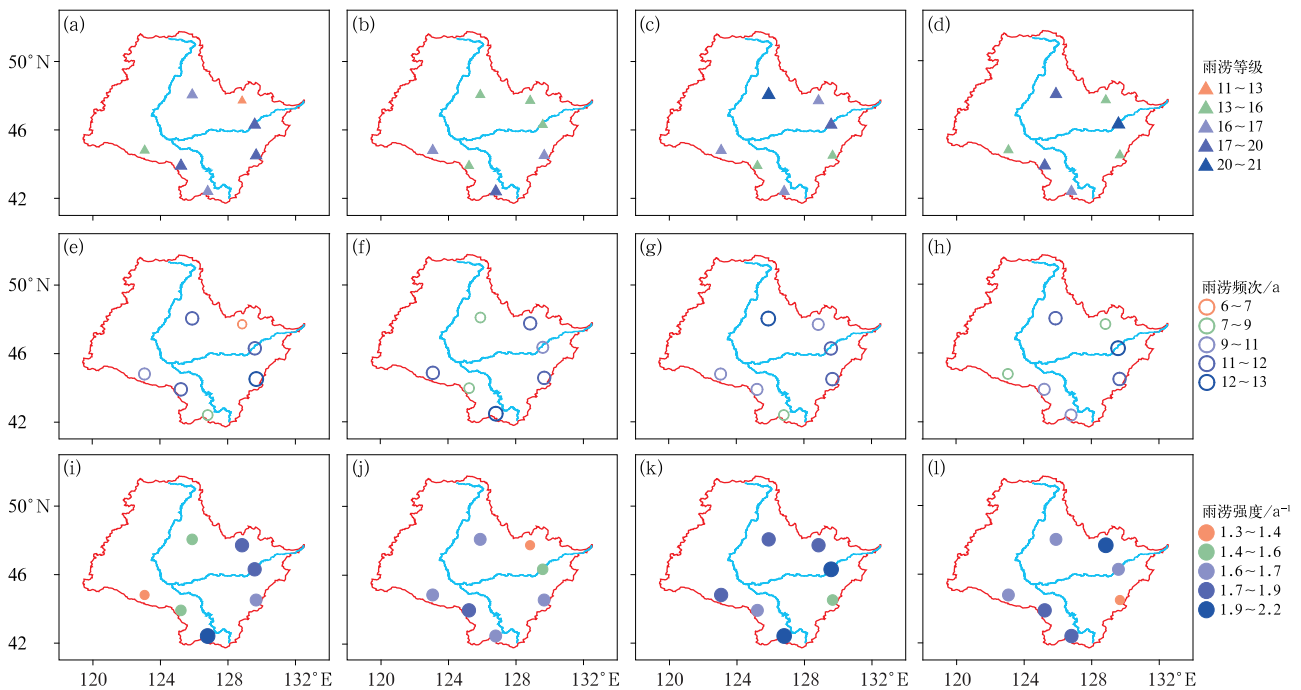


图4 1981—2010年松花江流域夏季雨涝等级(a,b,c,d)、雨涝频次(e,f,g,h)和雨涝强度(i,j,k,l)的空间分布

(a,e,i)6月,(b,f,j)7月,(c,g,k)8月,(d,h,l)夏季

Fig. 4 Spatial distribution of waterlogging grade (a, b, c, d), frequency (e, f, g, h) and intensity (i, j, k, l)

over Songhua River Basin in summer from 1981 to 2010

(a, e, i) June, (b, f, j) July, (c, g, k) August, (d, h, l) summer

表 3 1981—2010 年松花江流域夏季不同等级雨涝频次(单位:a)

时段	雨涝等级	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇
夏季	雨涝年	11	9	12	8	10	11	7
	偏涝	6	3	6	4	5	7	2
	大涝	3	5	4	3	3	4	2
	重涝	2	1	2	1	2	0	3
6 月	雨涝年	11	7	11	10	11	12	6
	偏涝	7	3	5	8	6	5	2
	大涝	3	1	3	1	4	6	3
	重涝	1	3	3	1	1	1	1
7 月	雨涝年	8	13	9	10	7	10	10
	偏涝	4	8	6	5	2	6	7
	大涝	3	2	2	4	4	2	3
	重涝	1	3	1	1	1	2	0
8 月	雨涝年	12	7	10	8	8	9	8
	偏涝	6	3	3	4	4	4	4
	大涝	3	0	5	1	3	5	1
	重涝	3	4	2	3	1	0	3

夏季雨涝等级累计最大是 Q₃ 区(累计值为 20 a),其次 Q₁ 区(累计值为 18 a),Q₄ 区最小(累计值为 13 a)。夏季雨涝频次最多也是 Q₃ 区,30 a 中有 12 a 发生雨涝(其中重涝 2 a、大涝 4 a、偏涝 6 a),其次是 Q₁ 区(11 a,重涝 2 a、大涝 3 a、偏涝 6 a),最少是 Q₇ 区,仅有 7 a 发生雨涝(重涝 3 a、大涝 2 a、偏涝 2 a)。夏季雨涝强度最大是 Q₇ 区(2.1 a^{-1}),其次 Q₂ 区(1.8 a^{-1}),最小是 Q₆ 区(1.4 a^{-1})。可见 Q₃ 和 Q₁ 区是雨涝多发区,而少发雨涝的 Q₇ 区偶发的雨涝事件强度却较大。

6 月雨涝等级累计最大是 Q₃ 区(累计值为 20 a)和 Q₆ 区(累计值为 20 a),最小是 Q₇ 区(累计值为 11 a)。雨涝频次最多是 Q₆ 区(12 a,其中重涝 1 a、大涝 6 a、偏涝 5 a),其次是 Q₁、Q₃、Q₅ 区,都是 11 a(重涝:Q₁ 和 Q₅ 区都是 1 a,Q₃ 区为 3 a;大涝:Q₁ 和 Q₃ 区均为 3 a,Q₅ 区均为 4 a;偏涝:Q₁ 区 7 a,Q₃ 区 5 a,Q₅ 区 6 a),最少是 Q₇ 区(6 a,重涝 1 a、大涝 3 a、偏涝 2 a)。雨涝强度 Q₂ 区最大(2 a^{-1}),其次为 Q₇ 区(1.8 a^{-1}),最小是 Q₄ 区(1.3 a^{-1})。

7 月雨涝等级累计值流域分三个级别,第一级最大,Q₂ 区(累计值为 21 a);第二级其次,Q₁ 和 Q₆ 区都是 16 a;第三级最小,Q₁、Q₃、Q₄ 和 Q₇ 区,均为 13 a。雨涝频次最多是 Q₂ 区,13 a(重涝 3 a、大涝 2 a、偏涝 8 a),其次是 Q₁、Q₆、Q₇ 区,都是 10 a(Q₁ 区重涝 1 a、大涝 4 a、偏涝 5 a,Q₆ 区重涝 2 a、大涝 2 a、偏涝 6 a,Q₇ 区无重涝、大涝 3 a、偏涝 7 a),最少的是 Q₅ 区(7 a)。雨涝强度 Q₅ 区最大(1.9 a^{-1}),其次 Q₁、Q₂ 区

(1.6 a^{-1}),最小是 Q₇ 区(1.3 a^{-1})。

8 月雨涝等级累计最大是 Q₁ 区(累计值为 21 a),其次是 Q₃ 区(累计值为 19 a),最小是 Q₅ 区(累计值为 13 a)。雨涝频次最多是 Q₁ 区(12 a,重涝 3 a、大涝 3 a、偏涝 6 a),其次是 Q₃ 区(10 a,重涝 2 a、大涝 5 a、偏涝 3 a),最少是 Q₂ 区(7 a,重涝 4 a、无大涝、偏涝 3 a)。雨涝强度 Q₂ 区最大(2.1 a^{-1}),其次 Q₃ 区(1.9 a^{-1}),最小是 Q₆ 区(1.6 a^{-1})。

平均来看,松花江流域雨涝等级累计 8 月最大(平均为 16 a),7 月最小(15 a);雨涝频次 6 月最多(平均为 9.7 a),8 月最少(平均为 8.9 a);雨涝强度 8 月最大(1.8 a^{-1}),7 月最小(1.6 a^{-1})。

2.4 松花江流域夏季雨涝月度分布变化

图 5 为松花江流域各分区夏季及季内各月雨涝等级变化。流域夏季最长连续雨涝年在东南部的 Q₆ 区,1989—1993 年连续 5 年有雨涝发生;其次是西部的 Q₁ 区,1985—1988 年连续 4 年有雨涝发生(图 5d)。6 月最长连续雨涝年在 Q₅ 区,1977—1981 年连续 5 年,其次是 Q₆ 区,1983—1986 年连续 4 年(图 5a)。7 月最长连续雨涝年在流域中部的 Q₃、Q₄、Q₅ 区,连续 4 年,分别是 1994—1997、1985—1988 和 1961—1964 年(图 5b)。8 月最长连续雨涝年在中东部的 Q₃ 区,1963—1967 年连续 5 年(图 5c)。

流域夏季最长连续无雨涝年在西部的 Q₁ 区,1999—2014 年连续 16 年,其次是 Q₆ 区,1970—1982 年连续 13 年(图 5d)。6 月最长连续无雨涝年在 Q₅

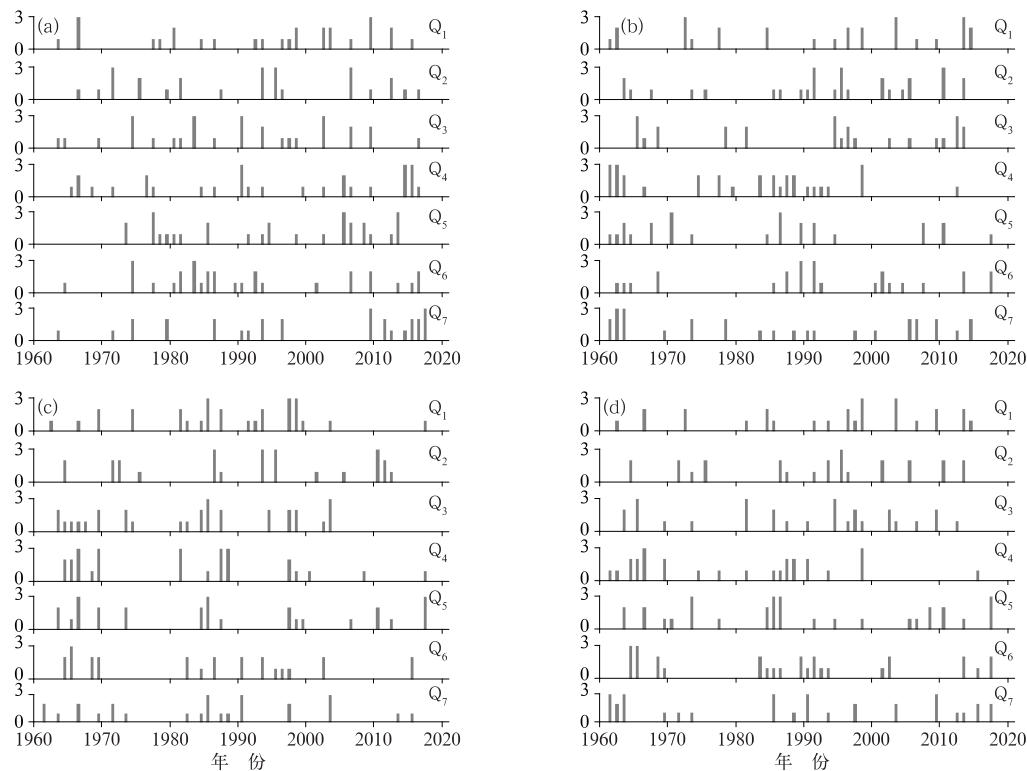


图 5 1961—2017 年松花江流域各分区夏季及季内各月雨涝等级变化
(a)6 月,(b)7 月,(c)8 月,(d)夏季
Fig. 5 Changes in waterlogging levels over the Songhua River Basin during the summer and each month from 1961 to 2017
(a) June, (b) July, (c) August, (d) summer

和 Q_7 区,连续 12 年的 6 月无雨涝,分别是 1961—1972 年和 1997—2008 年(图 5a)。7 月最长连续无雨涝年在 Q_6 区,1969—1985 年连续 17 年的 7 月无雨涝,其次是 Q_4 区,1999—2012 年连续 14 年(图 5b)。8 月最长连续无雨涝年在 Q_1 和 Q_3 区,2004—2016 年连续 13 年的 8 月无雨涝(图 5c)。

表 4 为流域各分区夏季及季内各月雨涝等级的变化趋势(通过 0.05 显著性水平检验),“+”为显著增强趋势,“-”为显著减小趋势。可见,1961—2017 年的夏季,松花江流域大多区域雨涝无明显趋势变化,仅 Q_4 区减小明显(通过 0.05 显著性水平检验);8 月全流域雨涝趋势不显著,7 月 Q_4 区雨涝减小趋势显著,6 月 Q_7 区雨涝增强趋势显著。

对松花江流域夏季及各月雨涝序列做小波变换(图略)分析其周期,各分区雨涝年代际以上尺度都不显著,主要表现出年际尺度振荡,以 2~3、4、6 a 左右周期为主。

夏季 Q_1 区存在 3.1 和 5.6 a 左右的年际尺度周期变化,1961—1985 年和 2010 年以后以 3 a 左右周

期为主,1986—2009 年 5.8 a 左右周期振荡更显著; Q_2 区以 2~3 a 周期为主。 Q_3 区存在 3.2 a 左右的周期,1980—2015 年至 21 世纪 10 年代显著; Q_4 区有 3 和 5 a 左右的周期; Q_5 区有 4 a 左右的周期; Q_6 区以 3 a 周期为主; Q_7 区以 2.6 a 左右周期较为显著。

表 4 1961—2017 年松花江流域各分区夏季及季内各月雨涝等级变化趋势

Table 4 Trends of waterlogging levels over the Songhua River Basin during the summer and each month from 1961 to 2017							
时段	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
6 月							+
7 月				-			
8 月							
夏季				-			

6 月 Q_1 区主要存在 2.4、3.7 和 5.5 a 左右的周期, Q_2 区以 4.8 和 3 a 左右周期为主, Q_3 区以 2.7~3.2 a 左右周期为主, Q_4 区以 5.3 和 2.6 a 左右周期为主, Q_5 区有 2.7 a 左右的周期, Q_6 区以 2.2 a 周期为主, Q_7 区有 5 和 2.6 a 左右周期显著;7 月 Q_1 区主

要存在 5.8 a 左右的周期, Q_2 区有 8 a 左右的周期; Q_3 区存在 4.6 和 3.7 a 左右的周期, Q_4 区以 5.8 和 3.2 a 左右的周期为主, Q_5 区有 3.5 a 左右的周期, Q_6 区以 4 a 周期为主, Q_7 区存在 2.5 和 5.8 a 左右周期显著; 8 月 Q_1 区主要存在 5.6 和 2.5 a 左右的周期, Q_2 区存在 2.3 和 4.4 a 左右的周期, Q_3 区存在 3.1~4 a 左右的周期, Q_4 区有 4 和 2.6 a 左右的周期, Q_5 区有 3.6 和 2.4 a 左右的周期, Q_6 区存在 4~5 a 的周期, Q_7 区有 2.7 a 左右的显著周期。

2.5 流域雨涝与气候系统指数相关

统计 1961—2017 年松花江流域各分区 6—8 月雨涝指数(Z)与前期 1~3 个月气候指数的相关系数, 表 5 中给出各分区相关最好的指数($n=57, p_{0.05/50}=0.2732$)。

松花江流域夏季的雨涝事件受前期大气环流和

海洋因子影响明显, 6 月雨涝事件与前期 4 月极地—欧亚遥相关型指数、大西洋海温三极子指数和 5 月东亚槽、斯堪的纳维亚遥相关型指数、极涡及海表温度指数高相关。当 4 月北大西洋呈“+ - +”的三极子型海温异常分布, 欧亚地区环流呈极地—欧亚遥相关型的负位相, 北大西洋高脊向东北方向嵌入极区, 冷空气沿脊前偏北气流南下东移, 6 月极涡和东亚槽偏弱, 松花江流域易发生雨涝。前期呈 AO 负位相分布时, 流域南部易雨涝; 前期热带印度洋偶极子负位相分布时流域东北部易雨涝。

7 月雨涝事件与前期 4—6 月太平洋、大西洋海温指数, 北半球极涡, 副热带高压, 遥相关等指数显著相关。当前期春季赤道中东太平洋海温异常偏暖, 7 月极涡偏弱, 西太平洋副热带高压偏北偏西, 松花江流域易发生雨涝。前期北太平洋关键区海温偏暖、北半球极涡中心偏东时, 流域西部易发生雨涝。前期赤

表 5 流域雨涝事件与气候系统指数相关

Table 5 Correlation between waterlogging events over the basin and climate system index				
雨涝月	分区	指数	指数月	相关系数
6 月	Q_1	东亚槽位置	5	0.35
	Q_2	极地—欧亚遥相关型指数	4	-0.35
	Q_3	斯堪的纳维亚遥相关型指数	5	0.34
	Q_4	大西洋海温三极子指数	4	0.30
	Q_5	北半球极涡中心经向位置	5	-0.46
	Q_6	大西洋海温三极子指数	4	0.36
	Q_7	热带南大西洋海温指数	5	0.37
	Q_1	北半球极涡中心纬向位置	5	0.49
	Q_2	东大西洋—西俄罗斯遥相关型指数	4	-0.42
	Q_3	北太平洋遥相关型指数	4	0.32
7 月	Q_4	西太平洋遥相关型指数	5	0.39
	Q_5	大西洋副热带高压脊线位置	4	0.35
	Q_6	大西洋副热带高压脊线位置	6	0.34
	Q_7	亚洲区极涡面积指数	5	0.34
	Q_1	北美区极涡面积指数	6	0.40
	Q_2	太平洋区极涡面积指数	6	0.30
	Q_3	太平洋区极涡强度指数	5	0.37
8 月	Q_4	西风漂流区海温指数	6	-0.40
	Q_5	太平洋区极涡强度指数	6	0.32
	Q_6	东亚槽强度指数	5	-0.35
	Q_7	北半球极涡面积指数	6	0.40

道中东太平洋海温偏暖时, 流域西南部易发生雨涝。

8 月雨涝事件与前期 5—7 月极涡、海温等指数高相关。当前期北太平洋关键区海温异常偏冷, 北半球极涡面积偏大、强度偏强, 副热带高压偏西, 8 月松花江流域受中高纬增强的经向环流和偏西的副热带高压共同影响易发生雨涝。当前期 6—7 月北太平洋

关键区海温异常偏冷、AO 呈负位相分布、PDO 为高指数时, 流域西部易雨涝。

3 结论与讨论

(1) 松花江流域夏季平均降水量为 361.4 mm, 南

部的第二松花江上游降水量最多(459.2 mm),其次是东南部张广才岭山地(396.8 mm),西部的嫩江下游降水量最少(286.6 mm)。

(2)松花江流域夏季雨涝多发区,1961—1970年位于流域南北向中部的松花江干流和嫩江下游地区,1971—1980年南移到第二松花江流域,1981—1990年北退与1961—1970年相似,中部多发,张广才岭山地也较多,1990—2000年更向北到嫩江上游,2001—2010年南撤,同于1961—1970年,中部的嫩江下游和干流多发,2011—2017年小兴安岭山地多发。

(3)1981—2010年夏季雨涝发生最多是松花江干流(30 a中有12 a发生雨涝),其次是嫩江上游(11 a),小兴安岭山地区雨涝发生最少(7 a)。而雨涝强度却是小兴安岭山地最大(平均 $2.1 a^{-1}$),其次第二松花江上游($1.8 a^{-1}$),最小是张广才岭山地区($1.4 a^{-1}$)。松花江流域6月发生雨涝最多,8月最少;平均雨涝强度8月最大,7月最小。松花江干流和嫩江上游是雨涝多发区,而少发雨涝的小兴安岭山地偶发的雨涝事件强度却较大,防汛抗灾时应给予关注。

(4)1961—2017年夏季松花江流域雨涝无明显趋势变化,仅嫩江下游减小明显(通过0.05显著性水平检验),6月小兴安岭山地区雨涝强度明显增强,7月嫩江流域下游雨涝减弱。流域夏季雨涝主要表现为年际尺度振荡,以2~3、4、6 a左右周期较显著。

(5)松花江流域夏季的雨涝事件受前期大气环流和海洋因子影响明显,6月雨涝事件与前期4月极地—欧亚遥相关型指数、大西洋海温三极子指数和5月东亚槽、斯堪的纳维亚遥相关型指数、极涡及海表温度指数高相关;7月雨涝事件与前期4—6月太平洋、大西洋海温指数,北半球极涡、副热带高压、遥相关等指数显著相关;8月雨涝事件与前期5—7月极涡、海温等指数高相关。

需要说明的是,Z指数确定的旱涝等级建立在假设某地降水异常偏多会发生雨涝的基础上,雨涝形成除了和降水强度、持续时间有关外,还和地形、植被、土壤等因素有关,Z指数只表明具有形成雨涝的潜在可能性,是否造成雨涝,还取决于其他下垫面因子。

本文只讨论了松花江流域夏季月以上尺度雨涝特征,月以下尺度雨涝特点及其与气候系统指数的更多关系分析有待下一步深入细致开展。

致谢:感谢 Torrence C 和 Campo G 提供的小波分析软件。

参考文献

- 冯定原,邱新法,陈怀亮,1992.我国雨涝灾害的指标和时空分布特征[J].南京气象学院学报,15(3):436-446. Feng D Y, Qiu X F, Chen H L, 1992. Agroflood-waterlogging index and its temporal and spatial distribution in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 15(3):436-446(in Chinese).
- 龚志强,封国林,2008.中国近1000年旱涝的持续性特征研究[J].物理学报,57(6):3920-3931. Gong Z Q, Feng G L, 2008. The research of durative characteristics of dry/wet series of China during the past 1000 years[J]. Acta Phys Sin, 57(6):3920-3931(in Chinese).
- 黄嘉佑,1990.气象统计分析与预报方法[M].北京:气象出版社. Huang J Y, 1990. Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Method[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 金燕,况雪源,晏红明,等,2018.近55年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J].气象,44(9):1169-1178. Jin Y, Kuang X Y, Yan H M, et al, 2008. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteor Mon, 44(9):1169-1178(in Chinese).
- 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等,1997.我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J].应用气象学报,8(1):26-33. Ju X S, Yang X W, Chen L J, et al, 1997. Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China[J]. J Appl Meteor, 8(1):26-33(in Chinese).
- 林建,杨贵名,2014.近30年中国暴雨时空特征分析[J].气象,40(7):816-826. Lin J, Yang G M, 2014. Spatio-temporal characteristics of rainstorm in China during 1981—2010[J]. Meteor Mon, 40(7):816-826(in Chinese).
- 刘敏,李书睿,倪国裕,等,1995.湖北省雨涝灾害的指标和时空分布特征[J].长江流域资源与环境,4(2):149-153. Liu M, Li S R, Ni G Y, et al, 1995. Agroflood-waterlogging index and its temporal and spatial distribution in Hubei[J]. Resour Environ Yangtze Val, 4(2):149-153(in Chinese).
- 刘玉莲,任国玉,于宏敏,2012.中国降雪气候学特征[J].地理科学,32(10):1176-1185. Liu Y L, Ren G Y, Yu H M, 2012. Climatology of snow in China[J]. Sci Geogr Sin, 32(10):1176-1185(in Chinese).
- 刘玉莲,于宏敏,任国玉,等,2013.我国强降雪气候特征及其变化[J].应用气象学报,24(3):304-313. Liu Y L, Yu H M, Ren G Y, et al, 2013. Climatic characteristics of intense snowfall in China with its variation[J]. J Appl Meteor Sci, 24(3):304-313(in Chinese).
- 罗岚心,姜彤,孙赫敏,等,2017.珠江流域旱涝变化及其与大气环流关系研究[J].干旱区资源与环境,31(4):142-147. Luo L X, Jiang T, Sun H M, et al, 2017. Variation of droughts and floods and their connection with atmospheric circulation in the Pearl River Basin[J]. J Arid Land Resour Environ, 31(4):142-147(in Chinese).

- 闵岫,钱永甫,2008a.我国近40年各类降水事件的变化趋势[J].中山大学学报(自然科学版),47(3):105-111. Min S, Qian Y F, 2008a. Trends in all kinds of precipitation events in China over the past 40 years[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 47(3):105-111(in Chinese).
- 闵岫,钱永甫,2008b.中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J].水科学进展,19(6):763-771. Min S, Qian Y F, 2008b. Regional-ity and persistence of extreme precipitation events in China[J]. Adv Water Sci, 19(6):763-771(in Chinese).
- 任国玉,封国林,严中伟,2010.中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J].气候与环境研究,15(4):337-353. Ren G Y, Feng G L, Yan Z W, 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China[J]. Clim Environ Res, 15(4):337-353(in Chinese).
- 孙力,安刚,丁立,2002.中国东北地区夏季旱涝的分析研究[J].地理科学,22(3):311-316. Sun L, An G, Ding L, 2002. The characteristics of summer drought and flood in northeast area of China [J]. Sci Geogr Sin, 22(3):311-316(in Chinese).
- 王革丽,杨培才,王咏青,等,2007.中国北方地区旱涝的年代际预测分析研究[J].高原气象,26(1):67-74. Wang G L, Yang P C, Wang Y Q, et al, 2007. On study of interdecadal prediction of drought/flood in Northern China[J]. Plat Meteor, 26(1):67-74 (in Chinese).
- 王志伟,翟盘茂,唐红玉,等,2005.中国南方近半个世纪的雨涝变化特征[J].自然灾害学报,14(3):56-60. Wang Z W, Zhai P M, Tang H Y, et al, 2005. Variation of characteristics of waterlogging by rain over southern China in the last half century[J]. J Nat Dis, 14(3):56-60(in Chinese).
- 魏凤英,2007.现代气候统计诊断与预测技术:第2版[M].北京:气象出版社. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistics Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd. ed. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 吴洪宝,吴蕾,2005.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社. Wu H B, Wu L, 2005. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability[M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese).
- 肖潺,叶殿秀,陈昊明,2017.中国大陆雨涝时空特征[J].灾害学,32(1):85-89. Xiao C, Ye D X, Chen H M, 2017. Temporal and spatial characteristics of waterlogging over mainland China[J]. J Catastrophol, 32(1):85-89(in Chinese).
- 邢峰,韩荣青,李维京,2018.夏季黄河流域降水气候特征及其与大气环流的关系[J].气象,44(10):1295-1305. Xing F, Han R Q, Li W J, 2018. Spatio-temporal variations of summer rainfall over Yellow River Valley and its association with atmospheric circulation[J]. Meteor Mon, 44(10):1295-1305(in Chinese).
- 于宏敏,刘玉莲,高永刚,等,2012.松花江流域气候变化影响评估报告[M].北京:气象出版社. Yu H M, Liu Y L, Gao Y G, et al, 2012. China Climate Change Impact Report: Songhua River Basin[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 袁媛,高辉,柳艳菊,2017.2016年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J].气象,43(1):115-121. Yuan Y, Gao H, Liu Y J, 2017. Analysis of the characteristics and causes of precipitation anomalies over eastern China in the summer of 2016[J]. Meteor Mon, 43(1):115-121(in Chinese).
- 张丰启,郝燕,张凯静,2017.青岛市汛期降水阶段划分及其环流背景特征[J].气象,43(8):962-972. Zhang F Q, Hao Y, Zhang K J, 2017. The stage division of flood season in Qingdao and associated circulation background[J]. Meteor Mon, 43(8):962-972 (in Chinese).
- 翟建青,曾小凡,姜彤,2011.中国旱涝格局演变(1961—2050年)及其对水资源的影响[J].热带地理,31(3):237-242. Zhai J Q, Zeng X F, Jiang T, 2011. Evolution of drought and flood pattern and its effect on water resources in China from 1961 to 2050[J]. Trop Geogr, 31(3):237-242(in Chinese).
- 翟盘茂,潘晓华,2003.中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,58(s7):1-10. Zhai P M, Pan X H, 2003. Change in extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th Century[J]. Acta Geogr Sin, 58(s7):1-10(in Chinese).
- Buffoni M, Maugeri M, Nanni T, 1999. Precipitation in Italy from 1833 to 1996[J]. Theor Appl Climatol, 63(1/2):33-40.
- IPCC, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC, 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change: Fifth Assessment Report (AR5) [R]. Cambridge, U K; London Cambridge University Press.
- Kite G W, 1978. Frequency and Risk Analysis in Hydrology[M]. Water Colorado: Resources Publication.
- Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al, 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific, 1961—1998[J]. Int J Climatol, 21(3):269-284.