

中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析*

黄建平¹ 冉津江^{1,2} 季明霞¹

HUANG Jianping¹ RAN Jinjiang^{1,2} JI Mingxia¹

1. 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州, 730000

2. 四川省气象培训中心, 成都, 610072

1. *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

2. *Sichuan Meteorological Training Center, Chengdu 610072, China*

2014-01-06 收稿, 2014-09-04 改回.

黄建平, 冉津江, 季明霞. 2014. 中国干旱半干旱区洪涝灾害的初步分析. 气象学报, 72(6):1096-1107

Huang Jianping, Ran Jinjiang, Ji Mingxia. 2014. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semi-arid regions in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(6):1096-1107

Abstract Floods can have disastrous effects on the society and environment, and scientific research can help to mitigate these effects. So far, not enough attention has been paid to the floods over the arid and semi-arid regions in China, and the awareness and prevention policy on floods over these regions are relatively weak. The floods over the arid and semi-arid regions are highly associated with the number, intensity and duration of extreme precipitation events, which also determine the number and severity of the flood events and their secondary geological disasters over the regions. In this study, we analyzed the number and characteristics of extreme precipitation events over the arid and semi-arid regions in China, in order to provide some scientific basis for making prevention policy. The results show that the number of days of extreme precipitation events has increased since the 21st century over the arid and semi-arid areas west of 110°E, but decreased to the east of 110°E. The trend of extreme precipitation showed positive sign in the area west of 110°E and negative sign in the one east of it. In addition, the fraction of the extreme precipitation change over the total precipitation one is over 40% in most of the regions, and reached 50% or even 100% to 200% in some areas. The seasonal variation showed that the extreme precipitation increased in spring over the north of the Tian Shan Mountains, southern Xinjiang, northern Dunhuang, northern Gansu, and Inner Mongolia. In summer, the extreme precipitation increased dramatically over the arid and semi-arid regions west of 110°E; in autumn, the extreme precipitation increased over Yulin in northern Shanxi, Erdos, Hohhot, and Baotou in Inner Mongolia, and some other places. Based on the above results, we carried out more basic analysis of the spatial and temporal characteristics of floods over the arid and semi-arid regions.

Key words Arid and semi-arid regions, Flood disaster, Extreme precipitation event

摘要 中国干旱半干旱区的洪涝灾害是一个尚未引起人们重视的重大科学问题,这主要是因为干旱半干旱区对洪涝灾害的防范意识比较薄弱。而极端降水事件的次数、强度和持续时间与干旱半干旱区的洪涝灾害有密切联系,直接影响该区域洪涝灾害及其次生地质灾害的次数与严重程度。以干旱半干旱区的极端降水事件为切入点,分析了中国干旱半干旱区的极端降水事件次数和极端降水量的变化特征,旨在为干旱半干旱区的洪涝灾害研究提供科学依据。结果表明,进入 21 世纪以来,中国 110°E 以西的干旱半干旱区极端降水事件的日数有所增多,而 110°E 以东的区域日数都有所减少。干旱半干旱区极端降水量的变化也呈现出西增东减的分布,大部分干旱半干旱区的极端降水量变化占总降水量变化的 40% 以上,一部分地区能达到 50%,甚至 100%—200%。从季节变化来看,春季天山以北、新疆南部、甘肃敦煌和内蒙古包头以北地区极端降水量增加较

* 资助课题:国家重大科学研究计划(2012CB955301)、国家自然科学基金项目(41175134,41305060)。

作者简介:黄建平,主要从事全球气候变化研究。E-mail: hjp@lzu.edu.cn

多,夏季 110°E 以西的干旱半干旱区极端降水量均增大明显,秋季陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、包头和呼和浩特等地极端降水量增大较明显。

关键词 干旱半干旱区,洪涝灾害,极端降水事件

中图分类号 P426.616

1 引言

洪涝灾害是突发性强、分布广、造成损失较严重的一种自然灾害(黄荣辉等,2010;杨佩国等,2013;黄会平等,2007;Huang, et al,1998)。而中国是世界上洪涝灾害最严重的国家之一,大约 2/3 的国土面积、80%的耕地受到洪水的威胁。据统计 1950—2008 年中国年均受灾面积在 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,每年造成的直接经济损失约占中国各类自然灾害经济损失的 62%,约相当于同期国民生产总值的 1.55%,每年因洪水直接造成 3000 余人死亡(丁一汇等,2009;陈莹等,2011)。

洪涝灾害按照水量过多的程度,可分为洪水和涝害。洪水是指由暴雨、冰雪急骤融化、风暴潮和水库垮坝等自然或人为因素引起的江河湖泊水量迅猛增加及水位急剧上涨的现象,洪水可能引起山洪暴发、山体崩塌和泥石流等造成损失更为严重的次生地质灾害。而涝害则是指因降水较多,土壤含水量过大,田间水分过多,出现“渍”、“淹”、“涝”,致使作物生长受到损害的现象。

中国的暴雨主要发生在湿润半湿润区,包括长江中下游、黄河下游以及东北局部地区,因此对这些地区暴雨的研究较多,防洪治理工程也较完善。而在干旱半干旱区,长期干燥少雨,暴雨出现的次数也远少于湿润地区,因此针对该地区暴雨的研究较少。但是干旱半干旱区地表生态环境脆弱,极易引发次生地质灾害,而水利工程大多也比较陈旧,根本达不到防洪抗灾的目的,再加上对洪涝灾害的防范意识较弱,一次强降水事件,大雨甚至中雨就很有可能引发洪涝和滑坡、泥石流等自然灾害,造成巨大的经济损失(刘琳等,2013;杨莲梅,2003;杨金虎等,2007)。比如,2013 年 7 月 25 日,新疆沙湾县仅 12.8 mm 的降雨就引发了山洪及泥石流,造成了 6 人死亡,直接经济损失达 1800 多万元。甘肃天水在 2013 年 6 月 20 日、7 月 8、21、22 和 25 日接连发生特大暴洪灾害,日降水量分别达 140.4、80、37、62.7 和 25.1 mm,造成 21 人死亡,经济损失达 82.75 亿元。

由此可见,干旱半干旱区的洪涝灾害虽然其发生频率不高,但危害极大,因此也是不容忽视的(杨东等,2012;王志福等,2009)。

最新 IPCC 报告指出,2003—2012 年的全球陆地表面年平均温度比 1880 年上升了 0.85°C ,根据最低排放情景模式,到 21 世纪末温度将升高 1.5°C (Myhre, et al, 2013)。而 Trenberth(1998)指出,地面温度升高将会使地表蒸发加剧,大气保持水分的能力增强。地表蒸发加剧,将更易发生干旱,同时大气水分增多,降水也将增多,从而更易发生洪涝(翟盘茂等,2004;杨素英等,2008;陈勇航等,2005a)。刘九夫等(2008)指出,极端降水事件对全球气候变化的响应十分敏感,在总降水量增大的区域其极端强降水事件有明显增多的趋势,即使平均总降水量减少或不变,极端强降水量及其频次也存在增多的现象。Zhai 等(2005)指出,中国极端强降水的平均强度和极端降水量都有增强的趋势,极端强降水量的比例也趋于增大(李明刚等,2012)。研究表明,干旱半干旱区是全球升温最显著的地区,也是生态环境最脆弱的地区(Wang, et al, 2007, 2010;Huang, et al, 2012;黄建平等,2013;Ji, et al, 2014)。因此,在全球变暖的大背景下,干旱半干旱区的干旱和洪涝可能会同时增多(翟盘茂等,1999;赵庆云等,2005;江志红等,2007)。已有研究(Zhai, et al, 2005;翟盘茂等,2003,2007;陈勇航等,2005b;Zhang, et al, 2013, 吴福婷等,2013)表明,西北地区的总降水量有增多的趋势,而该地区的极端强降水事件也趋于频繁。如果中国干旱半干旱区的总降水增多主要是由于极端强降水量的增多引起的,那么这些增多的降水量虽然一定程度上能缓解干旱,却也加剧了洪涝灾害的发生,这些区域降水的增多也就不一定是“好事”。本研究以极端强降水事件为切入点,分析中国干旱半干旱区极端强降水事件的分布和变化特点,旨在为洪涝灾害的预防提供科学依据。

2 资料与方法

采用全中国 839 个测站的逐日降水资料集,考

考虑到新中国成立初期测站稀疏,部分站点缺测较多,最后选取1971年1月—2013年11月的资料。中国通常将日降水量超过50 mm的降水事件称为暴雨,日降水量25—50 mm的降水事件称为大雨。由于中国幅员辽阔,地形地貌多样,降水具有很强的局地性。对于不同的地区,不能以暴雨作为衡量极端降水事件的标准。特别是对于干旱半干旱区,部分区域一年很少出现大雨以上程度的降水,对于这些地区中雨强度的降水事件可能都有很强的破坏性,很容易造成水土流失和山体滑坡等危害(杨金虎等,2008;封国林等,2009),这就可以认为是极端降水事件,而用50 mm日降水量则检测不到该地区的极端降水事件(杨东等,2012)。因此,本研究根据每一个测站的日降水量定义了该台站极端降水事件的阈值(封国林等,2008)。其具体方法是,依据翟盘茂等(1999)对极端降水事件的定义,将1971—2000年逐年湿日(日降水量 ≥ 0.1 mm)降水量序列的第95个百分位值的30 a平均值定义为极端降水事件的阈值,当某站某日降水量超过这一阈值时,就认为该日发生了极端降水事件。具体参照Bonsal等(2001)的计算方法:如果某个气象要素有 n 个值,将这 n 个值按升序排列 $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$,某个值不大于 x_m 的概率为 $P = (m - 0.31) / (n + 0.38)$ 。其中, m

为 x_m 的序号; n 为某个气象要素的个数。第95个百分位值是指 $P = 95\%$ 所对应的 x_m 的值。

干旱区通常用干燥度(\bar{AI})来定义,即多年平均的年降水量与潜在蒸发的比值小于0.65的地区(Middleton, et al, 1997),并进一步将 $\bar{AI} \leq 0.05$ 划为极端干旱区, $0.05 < \bar{AI} \leq 0.2$ 划为干旱区, $0.2 < \bar{AI} \leq 0.5$ 划为半干旱区, $0.5 < \bar{AI} \leq 0.65$ 划为湿润偏干区。根据此定义,本研究中的中国干旱半干旱区指的就是 $\bar{AI} < 0.65$ 的全部地区。干燥度的计算选取的气候时段是1971—2000年,这里年降水量使用的是美国环境预测中心/气候预测中心(NCEP/CPC)提供的月降水资料(Fan, et al, 2008),空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。潜在蒸散的资料则由Feng等(2013)提供,空间分辨率也为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。其潜在蒸散的计算使用了世界粮农组织(FAO)推荐的彭曼(Penman-Monteith)公式,该计算公式综合考虑了降水、气温、风速、湿度和太阳辐射等的影响,被广大学者广泛应用(Dai, 2011; Donohue, et al, 2010; Sheffield, et al, 2012)。

3 中国干旱半干旱区的洪涝灾害

图1为由于干燥度(\bar{AI})划分的中国干旱半干旱

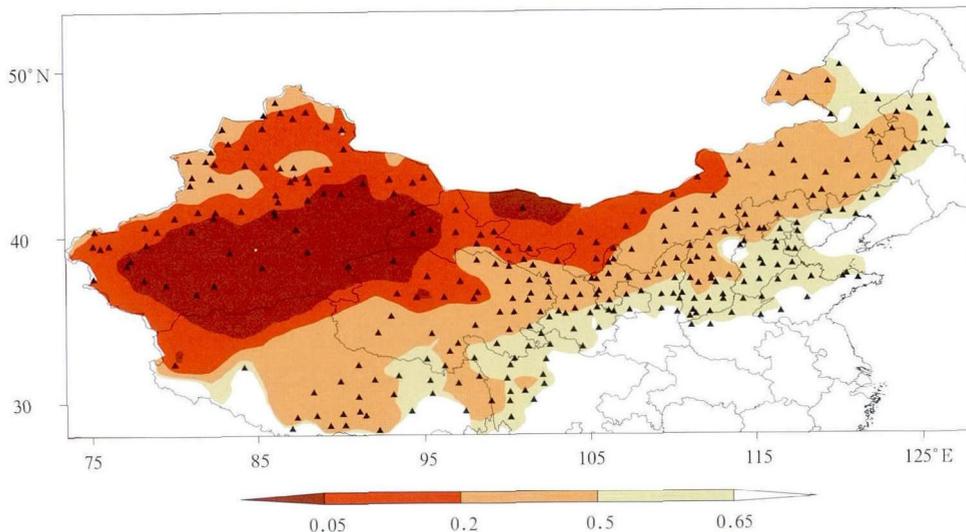


图1 中国干旱半干旱区的分布

($\bar{AI} \leq 0.05$: 极端干旱区, $0.05 < \bar{AI} \leq 0.2$: 干旱区, $0.2 < \bar{AI} \leq 0.5$: 半干旱区, $0.5 < \bar{AI} \leq 0.65$: 湿润偏干区; 黑色三角形代表位于干旱半干旱区的312个台站)

Fig. 1 Distribution of the arid and semi-arid regions in China

($\bar{AI} \leq 0.05$: hyper-arid; $0.05 < \bar{AI} \leq 0.2$: arid; $0.2 < \bar{AI} \leq 0.5$: semi-arid; $0.5 < \bar{AI} \leq 0.65$: dry subhumid; black triangles represent the 312 stations located in the arid and semi-arid areas)

区。中国干旱半干旱区主要包括新疆、西藏、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、山西、河北等 8 省、区的大部分地区,以及陕西延安以北地区、河南和山东北部、东北的局部地区。本研究后面针对中国干旱半干旱区的研究都是基于此区域划分。

根据 2006—2012 年水利部发布的《中国水旱灾害公报》,统计了属于干旱半干旱区的各省、区因洪涝灾害导致的直接经济损失、死亡人口和受灾人口数据(表 1、2、3,其中,河北省的数据包括了北京市)。

近 7 年干旱半干旱区洪涝灾害的直接经济损失为 1859 亿元(表 1),其中 2012 年的洪涝灾害经济损失最为严重,达 853 亿元,占 7 a 总损失的 46%。对比 9 个干旱半干旱区的省、区,河北、陕西、甘肃和内蒙古的经济损失较为严重,7 a 总的直接经济损失均超过了 200 亿元,该 4 省、区的经济损失占干旱半干旱区总经济损失的 85.5%。2010 年甘肃和陕西省的洪涝灾害最严重,直接经济损失分别为 107 亿和 228 亿元,值得注意的是 2010 年 8 月舟曲泥石流和 2010 年 7 月陕西连续两次特大暴雨洪涝灾害都造成了严重的经济损失。2012 年河北、甘肃和内蒙

古的洪涝直接经济损失都超过了 100 亿元,2012 年“7.21”北京特大暴雨、“5.10”甘肃岷县冰雹洪涝和“7.20”内蒙古河套特大暴雨这 3 个极端降水事件造成的损失占了很大比重。

近 7 年干旱半干旱区因洪涝灾害死亡 2916 人(表 2)。其中 2010 年洪涝灾害造成 1835 人死亡,占 7 a 因灾死亡总人数的 62.9%,而舟曲泥石流这一次极端事件就造成了 1481 人死亡。在 9 个干旱半干旱区的省、区里,甘肃、陕西、内蒙古、河北和新疆的死亡人数相对较多,总的死亡人口基本都超过 150 人。

近 7 年中国干旱半干旱区洪涝灾害的总受灾人口为 6972 万(表 3)。其中 2007、2010 和 2012 年干旱半干旱区的受灾人数较多,均超过了 1400 万人,这 3 a 的受灾人数是总受灾人数的 64.3%。对比各省、区的总受灾人口,陕西、河北和甘肃的受灾人口相对较多,均超过了 1000 万人。对于河北、内蒙古和青海等地,2012 年是受灾人口最多的年份,对新疆、甘肃和陕西等省 2010 年是受灾人口最多的年份。由此可见,干旱半干旱区洪涝灾害的发生具有一定的时空差异。

表 1 干旱区各省、区洪涝灾害造成的直接经济损失(亿元)

Table 1 The direct economic losses for the different provinces caused by floods (in hundred million)

年份	西藏	新疆	甘肃	青海	宁夏	内蒙古	山西	陕西	河北	总计
2006	1.23	5.21	11.30	1.90	3.00	9.43	2.90	13.13	2.20	50.30
2007	1.80	12.40	15.00	3.00	1.60	4.30	43.60	52.60	16.30	150.60
2008	2.76	3.33	9.86	3.10	0.46	30.99	0.17	8.08	5.26	64.01
2009	1.30	2.42	36.68	5.90	1.03	19.10	4.50	6.56	2.30	79.79
2010	7.89	35.43	106.93	5.04	2.01	11.97	17.13	228.34	7.90	422.64
2011	2.37	12.33	21.18	2.51	0.85	41.93	24.44	91.87	41.08	238.56
2012	1.94	17.56	125.30	5.25	6.94	117.86	26.16	49.77	502.71	853.49
总计	19.29	88.68	326.25	26.70	15.89	235.58	118.9	450.35	577.75	1859.39

表 2 干旱区各省、区洪涝灾害造成的死亡人数

Table 2 The death tolls for the different provinces caused by floods

年份	西藏	新疆	甘肃	青海	宁夏	内蒙古	山西	陕西	河北	总计
2006	1	26	51	3	11	38	5	9	5	149
2007	4	43	24	9	6	16	35	98	6	241
2008	0	13	10	3	4	35	0	11	14	90
2009	5	8	22	3	16	14	4	11	1	84
2010	10	25	1577	24	1	12	8	174	4	1835
2011	5	14	11	3	0	18	3	87	4	145
2012	6	18	97	11	8	45	10	37	140	372
总计	31	147	1792	56	46	178	65	427	174	2916

表3 干旱区各省、区洪涝灾害造成的受灾人口(万人)

Table 3 The affected population for the different provinces caused by floods (in ten thousand)

年份	西藏	新疆	甘肃	青海	宁夏	内蒙古	山西	陕西	河北	总计
2006	5.11	17.14	158.00	20.72	29.99	93.15	18.00	171.00	61.55	574.66
2007	14.70	47.60	99.50	20.40	12.00	22.10	450.00	539.00	304.00	1509.30
2008	9.93	12.63	69.71	10.40	10.56	117.10	1.07	55.39	77.97	364.76
2009	4.00	13.40	143.48	9.52	29.40	57.70	18.76	67.66	38.10	382.02
2010	9.70	133.18	359.33	13.40	7.02	79.81	145.69	660.10	89.43	1497.66
2011	11.76	25.62	152.65	12.68	14.93	133.61	127.05	424.19	262.71	1165.20
2012	9.36	28.47	239.89	41.34	12.64	185.76	66.91	154.68	739.21	1478.26
总计	64.56	278.04	1222.56	128.46	116.54	689.23	827.48	2072.02	1572.97	6971.86

洪涝灾害受多种因素的制约,其中包括极端降水的强度、频率以及该地区的防灾减灾能力等,直至目前尚未建立一致的反映洪涝灾害的指数。极端降水对洪涝灾害有直接影响,根据《中国水旱灾害公报》统计2006—2012年中国干旱半干旱区9省、区的农作物受灾面积总和随时间的变化及对应的总极端降水量(图2),可见中国干旱半干旱区的洪涝灾害与极端降水量的大小有密切的关系,在极端降水量偏大的年份,一般洪涝受灾面积也较大。中国干旱半干旱区的受灾面积从2008年开始有一个明显的上升趋势,而极端降水量也是从2008年开始有上升趋势。干旱半干旱区的洪涝受灾面积与该区域的极端降水量有很强的一致性,因而在某种程度上可以用极端降水量的变化来分析干旱半干旱区的洪涝灾害演变。

4 中国干旱半干旱区极端降水事件的变化特征

依据第95个百分位值统计的中国极端降水事

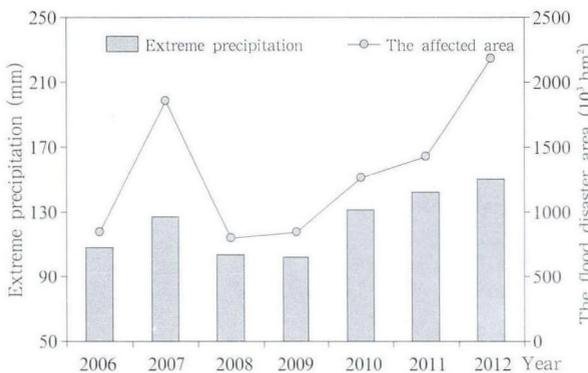


图2 中国干旱半干旱区洪涝受灾面积与极端降水量

Fig. 2 Annual flood disaster areas and extreme precipitations of the arid and semi-arid regions in China between 2006 and 2012

件的阈值分布(图3)可见,不同地区的极端降水事件判断标准有明显差异。新疆、青海和甘肃北部及内蒙古西部均属于干旱或极端干旱区,年降水量在50 mm以内,上述地区日降水量15 mm以上的降水事件很少发生,所以该地区的极端降水事件阈值最低(约为10 mm)。在100°E以西的绝大部分地区,极端降水事件的阈值在15 mm以内。在西藏东南部、四川西部、甘肃南部、宁夏地区和内蒙古河套以东大部分地区的极端降水事件的阈值为15—20 mm。除了河北偏南地区,中国大部分干旱半干旱区极端降水事件的阈值均在35 mm以下。

图4为依据极端降水阈值统计的干旱半干旱区极端降水事件总次数的时间序列(当日降水量大于该站阈值时,即计为发生了一次极端降水事件)。1971—2012年,干旱半干旱区共发生45446次极端降水事件,平均每年发生极端降水事件1082次。去掉缺测值较多的站点,剩下299个台站,平均每站每年发生极端降水事件3.6次。干旱半干旱区发生的极端降水事件自1971年均在不断增多,平均每年增加5次左右。其中,1998年极端降水事件发生次数最多,达到了1409次。

根据各地极端降水事件的阈值统计了中国干旱半干旱区1971—2000年30 a平均的极端降水事件的次数分布(图5)。由图5a可见,位于新疆的极端干旱区是极端降水事件发生最少的地区,平均每年不到1次。新疆天山以北极端降水事件的次数逐渐增多,最多每年可超过6次。昆仑山以南到西藏、青海等地,越往南极端降水事件的次数越多,西藏南部极端降水事件较多,局地可达每年8次,青海东部每年的极端降水事件平均为4—6次。而甘肃、宁夏、内蒙古、山西、河北等地大部分地区的极端降水

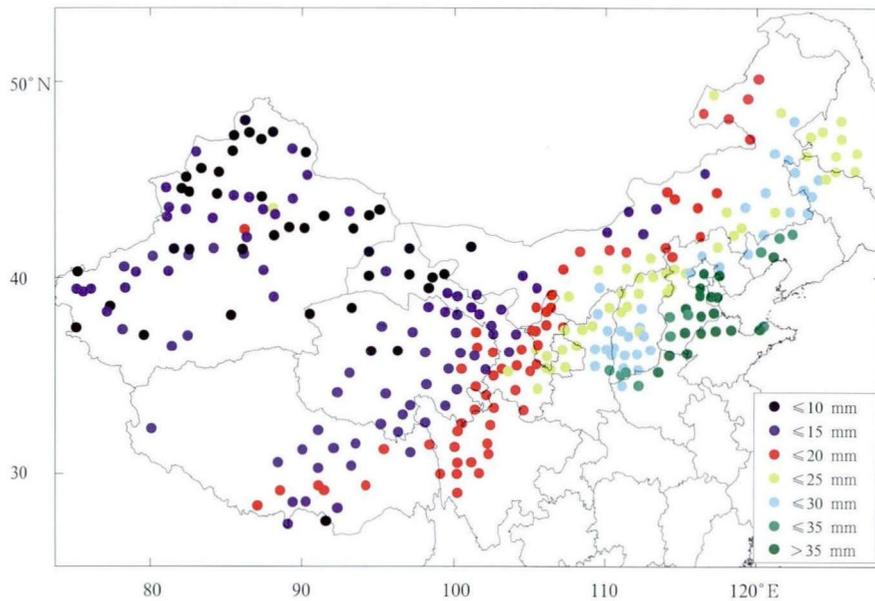


图3 中国干旱半干旱区极端降水事件的阈值分布

Fig.3 Threshold value distribution of extreme precipitation events over the arid and semi-arid regions in China

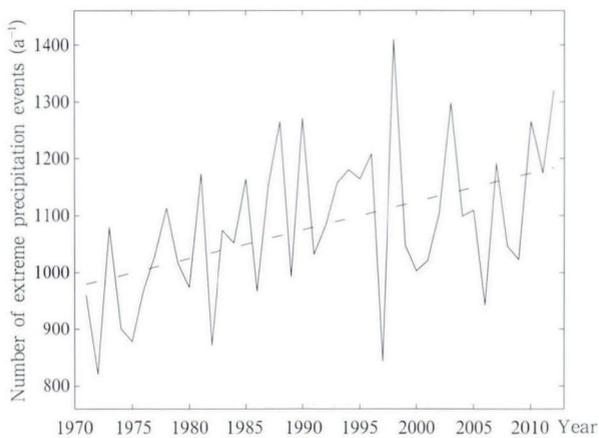


图4 中国干旱半干旱区极端降水事件次数的变化

Fig.4 Changes in the number of extreme precipitation events over the arid and semi-arid regions in China

事件在4次以下,110°E以西的内蒙古地区极端降水事件相对较少,为1—3次。甘肃南部和陕西北部等地平均每年极端降水事件5—6次。四川西部是极端降水事件发生最多的地区,平均每年都能发生7次以上。图5b为进入21世纪以来(2001—2012年)极端降水事件的平均次数分布,可以看出与图5a大体一致,但北疆地区是极端降水事件发生的高值区,发生次数从原来的5次变成了7次以上。在青海西部出现了一个极端降水事件的高值区,平均

每年可发生7次以上的极端降水事件。西藏地区的极端降水事件发生的高值区明显向西移动了,发生次数有所增多。110°E以东的内蒙古地区极端降水事件相对气候态有所减少。图5c为两个时段极端降水事件次数的差值分布,以110°E为界,以西的干旱半干旱区极端降水事件次数都有所增多,除了塔克拉玛干沙漠的局部地区。110°E以东的绝大部分干旱半干旱区的极端降水次数都减少了,仅山西部分地区略有增多。干旱半干旱区进入21世纪以来极端降水次数增多的中心有4个:其中最明显的是青海省的西部,平均每年增加了2.5次;其次比较凸出的还有北疆地区赛里木湖附近,平均每年增加2次左右;另外,在西藏的日喀则和那曲地区分别也有一个极端降水事件增多的中心,平均每年增加2.5次以上。

从两个时段(2001—2012与1971—2000年)极端降水事件次数变化的季节分布(图6)可见,绝大部分干旱半干旱区春季极端降水事件次数都是增多的(图6a)。其中,增多最明显的地区为天山以北和西藏的昌都、林芝等地,最大值在1.5 a⁻¹以上,只有新疆和田、博斯腾湖,新疆、甘肃和内蒙古三省交界的地区,陕北、山西、内蒙古通辽等地春季的极端降水事件有所减少。而中国干旱半干旱区夏季极端降

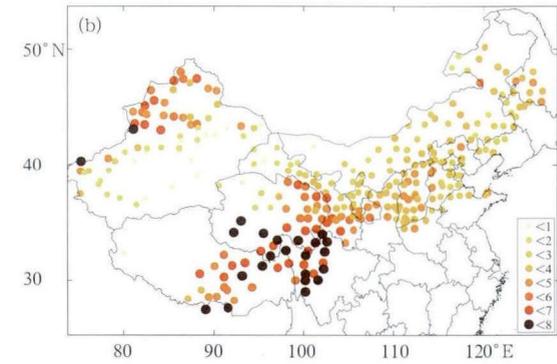
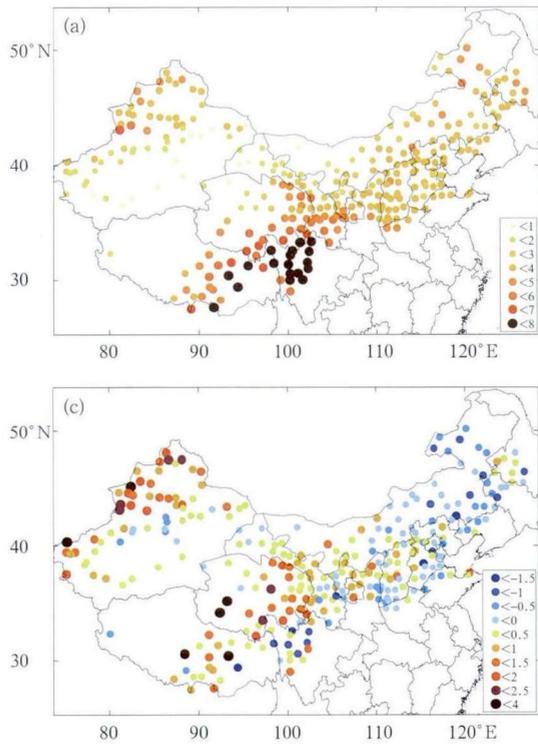


图5 中国干旱半干旱区极端降水事件次数的分布
(a. 气候态(1971—2000年),
b. 21世纪初(2001—2012年), c. 21世纪初与气候态之差)
Fig. 5 Days distribution of extreme precipitation
events over the arid and semi-arid regions in China
(a. climate state (1971—2000), b. early 21st century,
c. the difference between the early 21st century and climate state)

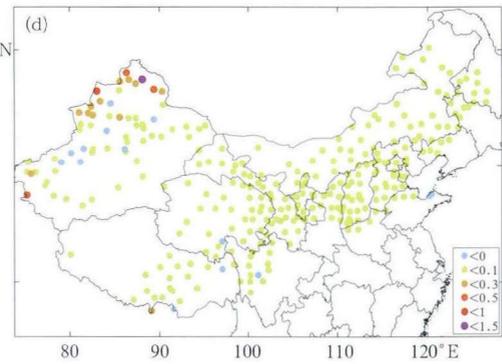
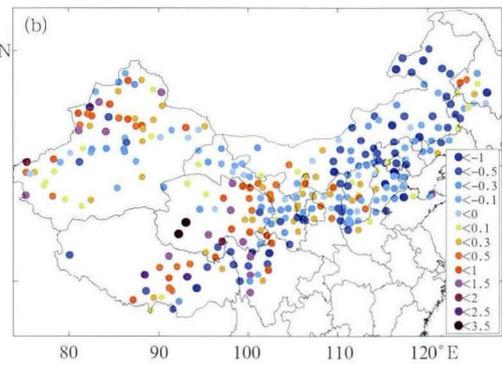
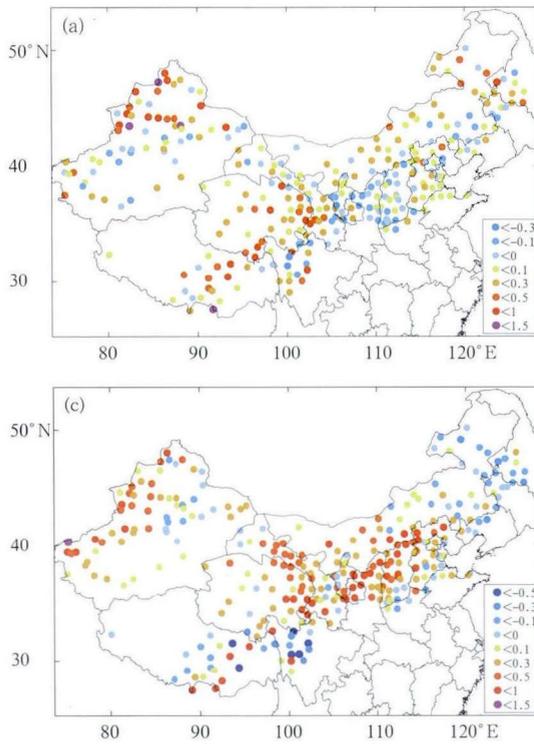


图6 中国干旱半干旱区极端降水事件次数变化的季节分布
(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)

Fig. 6 Different season days distribution of extreme precipitation events over the arid and semi-arid regions in China
(a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

水事件次数的差值分布表现出明显的东西差异(图 6b),110°E 以东极端降水事件次数普遍是减少的,尤其是内蒙古的呼伦贝尔地区,减少率在 $1.2 a^{-1}$ 以上。110°E 以西夏季极端降水事件次数则普遍是增加的,增幅最大位于青海玉树和西藏那曲等地,增加率在 $3.5 a^{-1}$ 以上,只有新疆中部、甘肃北部和西藏东部夏季的极端降水次数是减少的。图 6c 是中国干旱半干旱区秋季极端降水事件次数的差值分布,西藏地区和内蒙古东部地区是减少的,而河套地区、陕甘宁交界区域、甘南地区则是秋季极端降水事件增加比较明显的地区,最大增加率在 $1.5 a^{-1}$ 以上。图 6d 为中国干旱半干旱区冬季极端降水事件的差值分布,由图可见绝大部分地区变化较小,只有新疆最北端冬季极端降水事件次数增加明显,超过了 $1.5 a^{-1}$ 。

从两个时段最大日降水量的差值分布(图 7)可见,中国干旱半干旱区以 110°E 为界,以西的地区最大日降水量基本都是增大的,其中,山西、陕西、宁夏和新疆是最大日降水量增大最凸出的地区,最多可增加 30 mm;以东的地区最大日降水量基本都是减少的,河北和内蒙古东部减少明显,最大可减少 20 mm 以上。从不同季节的最大日降水量变化可知(图略),春季中国干旱半干旱区的最大日降水量都有所增大,其中新疆和河北局地增加 10 mm 以上;夏季内蒙古和河北地区的最大日降水量有所减少,其他干旱半干旱地区的最大日降水量都在增大,山西局地增加 30 mm 左右;秋季东北的干旱半干旱区最大日降水量有所减小,其他干旱半干旱地区都有所增大,其中河套地区的最大日降水量增加最多,

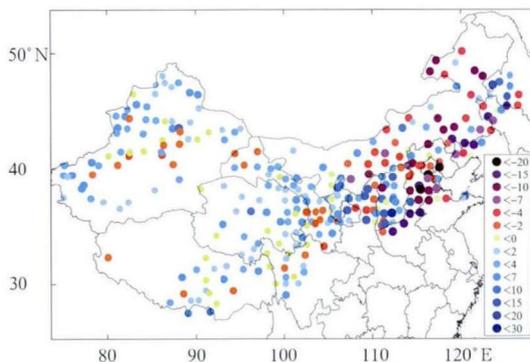


图 7 中国干旱半干旱区最大日降水量的变化(单位:mm)

Fig. 7 Distribution of the maximum daily precipitation changes over the arid and semi-arid regions in China (unit: mm)

可达 15 mm 左右;冬季大部分干旱半干旱区的最大日降水量变化较小,除了新疆地区有一定程度的增加,增加 6 mm 左右。

从两个时段极端降水事件的降水强度差值分布(图 8)可见,中国干旱半干旱区极端降水事件的降水强度变化没有明显的区域特征:华北地区是降水强度增大或减小都非常明显的地区,河北和内蒙古东部降水强度在减小,而在山西西南部、陕西北部、宁夏北部和甘肃青海局地,降水强度均有所增强。从不同季节的降水强度变化可以看出(图略),春季青海地区的降水强度有所增强,夏季山西、陕西地区的降水强度有所增强,秋季主要在河套和河北地区降水强度增强较大,局地增加达 15 mm/d,冬季变化不大。

由中国干旱半干旱区的气候态极端降水量占总降水量的比值分布(图 9a)可知,青海、西藏和四川西部的气候态极端降水量占总降水量的比值最小,基本在 30% 以下,而河北、东北和新疆南部的极端降水量占总降水量的比值较大,一般在 35% 以上,局地超过了 40%。区域平均的干旱半干旱区极端降水量占总降水量的比值为 31%,而近 10 年比值明显增大。中国干旱半干旱区总降水量的变化(图 9b)呈现明显的东西差异,115°E 以东的总降水量主要是减少的,内蒙古的呼伦贝尔地区是降水量减少最多的地区,达到 60 mm。115°E 以西的总降水量普遍是增大的,其中青海和西藏是总降水量增加最多的地区,最多可超过 100mm。而新疆中部、内蒙

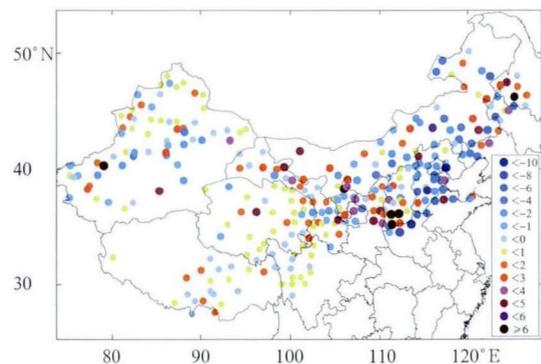


图 8 中国干旱半干旱区降水强度的变化(单位:mm/d)

Fig. 8 Strength distribution of extreme precipitation events over the arid and semi-arid regions in China (unit: mm/d)

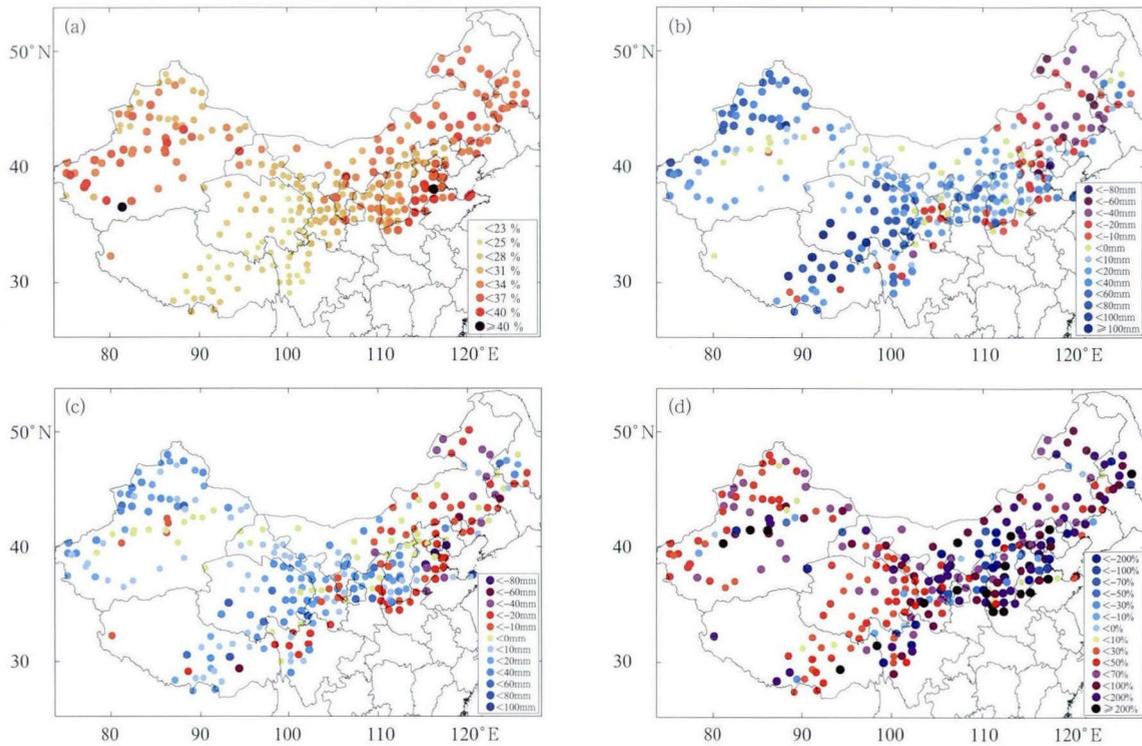


图9 中国干旱半干旱区极端降水量与总降水量的变化分布

(a. 极端降水量占总降水量的比值, b. 总降水量的变化, c. 极端降水量的变化, d. 极端降水量变化与总降水量变化的比值)

Fig. 9 Changes distributions of the extreme precipitation and total precipitation over the arid and semi-arid regions in China

(a. the ratio of extreme precipitation to total precipitation, b. total precipitation changes, c. extreme precipitation changes, d. the ratio of extreme precipitation changes to total precipitation changes)

古最西端、甘肃白银和宁夏固原的降水量则略有减少。中国干旱半干旱区的极端降水量变化(图 9c)与总降水量的变化相似,也呈现明显的东西差异。21 世纪以来 110°E 以东的极端降水量主要是减少的,内蒙古呼伦贝尔、赤峰等地和河北省大部分地区是极端降水量减少最多的地区,最大可超过 60 mm。只有山西省部分地区和黑龙江的齐齐哈尔地区极端降水量有所增大。除了新疆、甘肃和内蒙古交界的地区,以及新疆中部,110°E 以西的极端降水量是普遍增大的,其中青海西南部、西藏日喀则、西藏山南、新疆天山以北、甘肃玛曲和陕西榆林的极端降水量增加最多,可超过 80 mm,青海西南部局地增加超过 100 mm,有的地区极端降水量的增加量甚至超过了总降水量的增加量。根据中国干旱半干旱区极端降水量的变化值与总降水量变化的比值(图 9d),可定量分析该地区极端降水事件对总降水量变化的影响大小。绝大部分地区极端降水量的变化和总降

水量的变化是一致的,即符号为正。但在陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、包头和呼和浩特等地,极端降水量的变化和总降水量的变化是相反的。这些地区极端降水量是减少的,而总降水量却是增加的,即这些地区的小雨降水量增加较多。而在中国干旱半干旱区的大部分地区,极端降水量的变化占总降水量变化的 50% 以上,这说明在大部分的干旱半干旱区总降水量的增加一半以上都是由极端降水量的增加贡献的。有的地区极端降水量的变化能占到总降水量变化的 100%—200%。这意味着,这些地区极端降水量的增加均已超过总降水量的增加。例如,宁夏北部极端降水量增加了 80 mm,而总降水量只增加了 60 mm,则该地区的极端降水量的变化占总降水量变化的 130% 左右。

由中国干旱半干旱区春季极端降水量变化与总降水量变化的比值分布(图 10a)可见,天山以北的春季极端降水量占总降水量变化的 20% 以上,局部

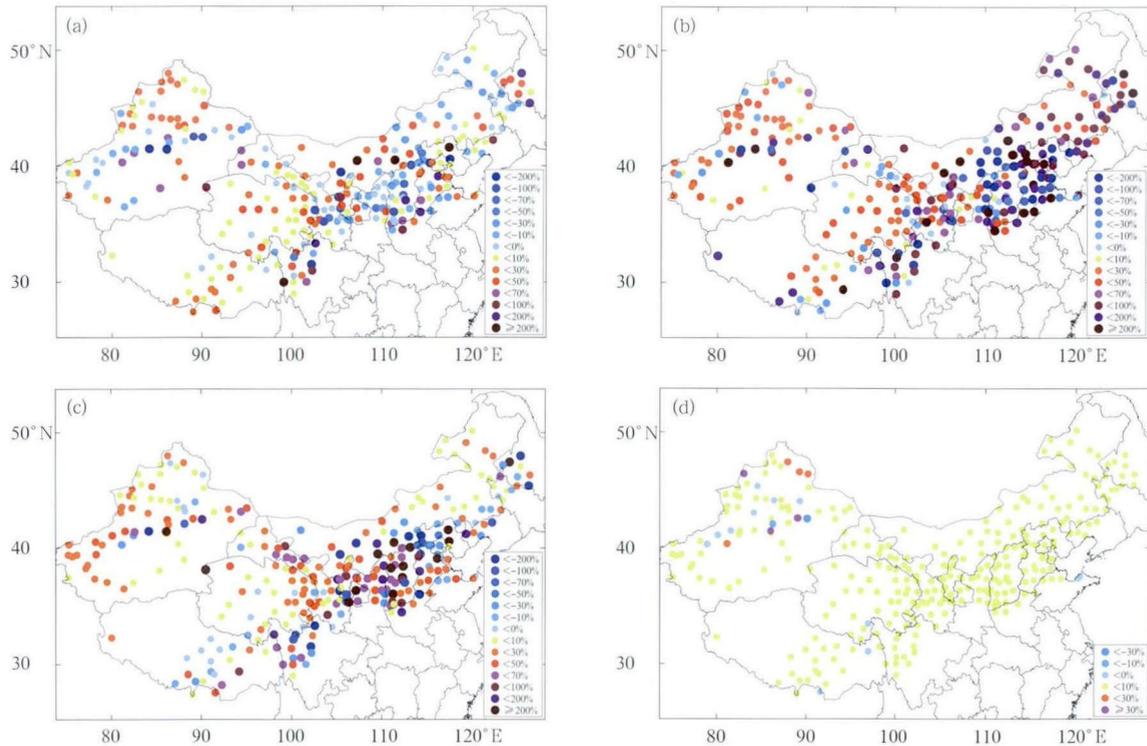


图 10 中国干旱半干旱区四季极端降水量的变化占总降水量变化的比例
(a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)

Fig. 10 Proportions distribution of extreme precipitation changes to total precipitation changes for the different seasons over the arid and semi-arid regions in China
(a. spring, b. summer, c. autumn, d. winter)

能达到 40%，新疆南部、甘肃敦煌、内蒙古包头以北的春季极端降水量的变化能占总降水量变化的 50% 以上，而甘肃南部、陕西北部、山西西部和河北北部的春季极端降水量都是减少的，减少量占总降水量变化的 50% 以上。图 10b 为夏季极端降水量变化与总降水量变化的比值，陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、包头和呼和浩特等地的夏季极端降水量减少得较多，而总降水量是增大的，夏季的变化比总降水量的变化还大，而 110°E 以东地区的总降水减少很大程度上是因为夏季极端降水量减少了，夏季降水量的减少占总降水量减少量的 50%，有的地区甚至为 100% 以上。而 110°E 以西地区的总降水增加很大程度上也是因为夏季极端降水量的增大，大部分地区夏季极端降水量的增加占总降水量增加的 30% 以上，有的地区甚至为 50%。图 10c 为秋季极端降水量变化与总降水量变化的比值，内蒙古呼和浩特和乌兰察布的秋季极端降水量是增加的，因为总降水量是减少的，所以比值为负，其极端降水量增

加的值占总降水量减少的 50% 以上，有的地区为 100% 以上。而陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、包头和呼和浩特等地为秋季极端降水量增加较明显的地区，占总降水量增加的 100% 以上，且这个地区秋季极端降水量远大于夏季极端降水量。甘肃中东部、内蒙古南部、宁夏等地区的秋季极端降水量变化值占总降水量变化较大，基本可超过 50%。图 10d 为冬季极端降水量变化与总降水量变化的比值。除了新疆局部和西藏西部等少数地方，冬季极端降水量占总降水量变化的 50%，其他地区均小于 10%。

5 结论与讨论

中国干旱半干旱区的洪涝灾害与极端降水事件有着非常密切的关系，极端降水事件的次数、强度和持续时间直接影响着该区域洪涝灾害及其次生地质灾害的多少与严重程度。基本结论如下：

(1) 中国干旱半干旱区极端降水事件的阈值，由西北向东南逐渐增大。极端干旱区的极端降水事件

阈值最小,为 10 mm 左右。100°E 以西的绝大部分地区,极端降水事件的阈值为 10—15 mm。在西藏东南部、四川西部、甘肃南部、宁夏和内蒙古河套以北的极端降水事件阈值为 15—20 mm,中国干旱半干旱区的极端降水事件阈值都在 35 mm 以下。

(2)中国干旱半干旱区极端降水事件的次数普遍较少,但在天山以北、西藏东南部和甘肃南部极端降水事件频发,进入 21 世纪以来平均每年为 5 次以上,局部可达到 8 次。110°E 以西的大部分干旱半干旱区极端降水事件的次数有所增多,110°E 以东地区有所减少。

(3)干旱半干旱区春季极端降水事件大部分地区是增多的,增多最多的地区是新疆天山以北和西藏的昌都、林芝等地。夏季 110°E 以西是增多的,青海玉树和西藏那曲等地是极端降水事件增多的高值区;110°E 以东是减少的,减少最多的为内蒙古呼伦贝尔地区。秋季在河套地区、陕甘宁交界区、甘肃南部地区是极端降水事件增多比较明显的区域,西藏地区和内蒙古东部的极端降水事件都是减少的。冬季只有新疆最北部极端降水明显增多了。

(4)进入 21 世纪以来,中国干旱半干旱区极端降水量的变化,呈现出明显的西增东减的分布。与总降水量变化分布一致。大部分干旱半干旱区的极端降水量变化占总降水量变化的 50% 以上,一部分地区甚至能达到 100%—200%。

(5)中国干旱半干旱区春季新疆南部、甘肃敦煌和内蒙古包头以北极端降水量的变化能占总降水量变化的 50% 以上。夏季 110°E 以东的极端降水量的减少占总降水量减少的 50%,110°E 以西的极端降水量的增加占总降水量增加的 30% 以上。秋季陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、包头和呼和浩特等地极端降水量的增加占总降水量增加的 100% 以上,而甘肃中部、内蒙古南部和宁夏等地极端降水量的增加占总降水量增加的 50% 以上。冬季新疆和西藏西部等局部地区的极端降水量增加较多,其他地区冬季极端降水量变化较小。

综上所述,以 110°E 为界,以西的干旱半干旱区总降水量的增多有 50% 以上是来自于极端降水量的增多,这些地区大多地表生态环境脆弱,经济发展水平较低,防灾减灾能力较弱,极端强降水事件的增多往往带来山洪、滑坡和泥石流等自然灾害,根本无法缓解干旱,而是带来了比干旱更严重的灾害。而

该地区的小雨和中雨降水量占总降水量变化的比例较小,对于旱状况的缓解能力较弱。这也是为什么 110°E 以西的干旱半干旱区总降水量增多了,但地表植被状况并没有变化,有的甚至变得更差了。

中国干旱半干旱区自西向东绵延几千千米,跨越 9 个省、区。各区域的生态环境、地形地表差异显著,经济发展和防洪设施也有差距。并且各个典型地区的洪涝灾害也存在一定差异,有各自的高发季节和区域,以及相应的次生地质灾害。比如,新疆洪水灾害春季以融雪洪水为主,而夏季以暴雨洪水为主,偶发冰川融水洪水;甘肃地区洪涝灾害则以局地暴雨洪灾为主,水沙俱下,极易造成滑坡和泥石流,破坏力很大;而内蒙古地区则是以暴雨洪水为主,极易造成山洪灾害。如何综合考虑干旱半干旱区各地气候、地貌、灾害频率、人口和社会经济等条件,建立一个能综合评估洪涝灾害敏感性、危险性和脆弱性的指标,这是一个非常复杂的问题,将在后面的工作中逐步完善这部分工作。

参考文献

- 陈莹,尹义星,陈兴伟. 2011. 19 世纪末以来中国洪涝灾害变化及影响因素研究. 自然资源学报, 26(12): 2110-2120
- 陈勇航,黄建平,陈长和等. 2005a. 西北地区空中云水资源的时空分布特征. 高原气象, 24(6): 905-912
- 陈勇航,黄建平,王天河等. 2005b. 西北地区不同类型云的时空分布及其与降水的关系. 应用气象学报, 16(6): 717-727
- 丁一汇,张建云. 2009. 暴雨洪涝. 北京:气象出版社, 54-67
- 封国林,龚志强,支蓉. 2008. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展. 气象学报, 66(6): 892-905
- 封国林,王启光,侯威等. 2009. 气象领域极端事件的长程相关性. 物理学报, 58(4): 2853-2861
- 黄会平,张昕,张岑. 2007. 1949—1998 年中国大洪涝灾害若干特征分析. 灾害学, 22(1): 73-76
- 黄建平,季明霞,刘玉芝等. 2013. 干旱半干旱区气候变化研究综述. 气候变化研究进展, 9(1): 9-14
- 黄荣辉,杜振彩. 2010. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势. 自然杂志, 32(4): 187-195
- 江志红,丁裕国,陈威霖. 2007. 21 世纪中国极端降水事件预估. 气候变化研究进展, 3(4): 202-207
- 李明刚,管兆勇,韩洁等. 2012. 近 50 a 华东地区夏季极端降水事件的年代际变化. 大气科学学报, 35(5): 591-602
- 刘九夫,张建云,关铁生. 2008. 20 世纪我国暴雨和洪水极值的变化. 中国水利, (2): 35-37
- 刘琳,陈静. 2013. 新疆 1961—2011 年极端降水事件年内非均匀性特征. 沙漠与绿洲气象, 7(1): 53-59
- 王志福,钱永甫. 2009. 中国极端降水事件的频数和强度特征. 水

- 科学进展, 20(1): 1-9
- 吴福婷, 符淙斌. 2013. 全球变暖背景下不同空间尺度降水谱的变化. 科学通报, 58(8): 664-673
- 杨东, 程军奇, 李小亚等. 2012. 甘肃黄土高原各级降水和极端降水时空分布特征. 生态环境学报, 21(9): 1539-1547
- 杨金虎, 江志红, 杨启国等. 2007. 中国西北汛期极端降水事件分析. 中国沙漠, 27(2): 320-325
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征. 气候与环境研究, 13(1): 75-83
- 杨莲梅. 2003. 新疆极端降水的气候变化. 地理学报, 58(4): 577-583
- 杨佩国, 胡俊峰, 于伯华等. 2013. 亚太地区洪涝灾害的时空格局. 陕西师范大学学报(自然科学版), 41(1): 74-81
- 杨素英, 孙风华, 马建中. 2008. 增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征. 地理科学, 28(2): 224-228
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测. 气象学报, 57(2): 208-216
- 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. 地理学报, 58(增刊): 1-10
- 翟盘茂, 章国材. 2004. 气候变化与气象灾害. 科学导报, (7): 11-14
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究. 气候变化研究进展, 3(3): 144-148
- 赵庆云, 张武, 王式功等. 2005. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化. 中国沙漠, 25(6): 904-909
- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristic of daily and extreme temperature over Canada. J Climate, 14(9): 1959-1976
- Dai A G. 2011. Drought under global warming: A review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(1): 45-65
- Donohue R J, McVicar T R, Roderick M L. 2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. J Hydrol, 386(1-4): 186-197
- Fan Y, Van den Dool H. 2008. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948—present. J Geophys Res: Atmos (1984-2012), 113 (D1): D01103, doi: 10. 01029/02007JD008470
- Feng S, Fu Q. 2013. Expansion of global drylands under a warming climate. Atmos Chem Phys Discuss. 13(6): 14637-14665
- Huang J P, Higuchi K, Shabbar A. 1998. The Relationship between the North Atlantic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation. Geophys Res Lett. 25: 27072710
- Huang J P, Guan X D, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. Atmos Chem Phys, 12(12): 5391-5398
- Ji F, Wu Z H, Huang J P, et al. 2014. Evolution of land surface air temperature trend. Nat Clim Change, 4: 462-466. doi: 10. 1038/nclimate2223
- Middleton N, Thomas D. 1997. World Atlas of Desertification, 2nd ed. London, UK; Routledge
- Myhre G, Shindell D, Bréon F M, et al. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing//Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. 659-740, doi: 10. 1017/CBO9781107415324. 018
- Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. 2012. Little change in global drought over the past 60 years. Nature, 491(7424): 435-438
- Trenberth K E. 1998. Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates with climate change. Climate Change, 39(4): 667-694
- Wang X, Huang J P, Ji M X, et al. 2007. Variability of East Asia dust events and their long-term trend. Atmos Environ, 42(13): 3156-3165
- Wang X, Huang J P, Zhang R D, et al. 2010. Surface measurements of aerosol properties over northwest China during ARM China 2008 deployment. J Geophys Res, 115 (D7), doi: 10. 1029/2009JD013467
- Zhai P M, Sun A J, Ren F M, et al. 1999. Changes of climate extremes in China. Climate Change, 42(1): 203-218
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. J Climate, 18(7): 1096-1107
- Zhang D L, Huang J P, Guan X D, et al. 2013. Long-term trends of precipitable water and precipitation over the Tibetan Plateau derived from satellite and surface measurements. J Quant Spectrosc Ra, 122: 64-71