doi:10.11676/qxxb2020.008

中国西北地区东部近546年干旱事件特征分析*

王芝兰[1]　奚立宗[2]　李耀辉[1]　董安祥[1]
WANG Zhilan[1]　XI Lizong[2]　LI Yaohui[1]　DONG Anxiang[1]

1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室，兰州，730020
2. 甘肃省气象局，兰州，730020
1. *Insitute of Arid Meteorology*, *China Meteorological Administration/Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction*, *Gansu Province/Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction*, *China Meteorological Administration*, *Lanzhou* 730020, *China*
2. *Gansu Provincial Meteorological Administration*, *Lanzhou* 730020, *China*

2018-12-04收稿，2019-09-18改回。

王芝兰，奚立宗，李耀辉，董安祥. 2020. 中国西北地区东部近546年干旱事件特征分析. 气象学报，78(1)：72-85
Wang Zhilan, Xi Lizong, Li Yaohui, Dong Anxiang. 2020. Characteristics of droughts in eastern Northwest China over the past 546 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(1):72-85

Abstract　Based on the drought/flood grade data for 17 stations during 1470−2008 and precipitation from May to September during 1958−2015 in eastern Northwest China, the sequence of drought/flood grade during the period of 1470−2015 has been established. Spatial and temporal characteristics of the drought variation are analyzed; extreme drought events occurred during the 546 years and the characteristics of drought persistence are discussed in detail. The results show that the drought/flood grade data can well reflect the spatial and temporal characteristics of drought changes over eastern Northwest China. On the century scale, drought occurred most frequently in the 20th century, and the areas of high occurrence frequency are found in Ningxia and Northern Shaanxi. Drought scale factors indicated that the drought persistence in eastern Ningxia and northern Shaanxi was relatively long. Those drought events that covered a large area with high intensity play an important role in the persistence of drought. The drought persistence was significant during periods of 1470−1500 and 1910−1940, when two "one-hundred-year" and even "two-hundred-year" extreme drought events occurred over eastern Northwest China.

Key words　Long-time sequence，Persistence of drought，Eastern Northwest China

摘　要　以西北地区东部的17个代表站1470—2008年的旱涝等级资料和1958—2015年5—9月气象站降水量数据为基础，建立了546年中国西北地区东部旱涝等级序列，采用经验正交函数分解、滑动*t*检验等统计方法，对其干湿演变规律进行分析，详细讨论了546年极端干旱事件及干旱持续性特征。结果表明：旱涝等级资料能够较好地反映西北地区东部干旱变化的时、空特征；在百年尺度上，20世纪发生旱、偏旱最为频繁，且高值区位于宁夏及陕北；干旱尺度因子的空间分布表明宁夏东部及陕北地区的干旱持续性相对较强，陇南及陕西南部地区的干旱持续性较差；空间范围较大且强度较大的重大干旱事件对干旱的持续发生起重要作用，历史上发生在1470—1500年和1910—1940年的两次西北地区东部百年甚至两百年一遇的极端干旱事件，对该地区干旱持续性的影响较为显著。

关键词　长时间序列，干旱持续性，西北地区东部
中图法分类号　P467

* 资助课题：公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)201506001-1)、国家自然科学基金项目(41975111)。
作者简介：王芝兰，主要从事干旱气候变化、陆面过程等研究。E-mail：wangzhlan2008@163.com

1 引 言

干旱是最主要的自然灾害之一，持续的干旱通常会导致水资源匮乏，生态系统功能退化，社会动荡，甚至影响到人类文明的发展进程（Fye, et al, 2003）。受全球变暖的影响，近几十年，区域极端天气、气候事件日益加剧，尤其20世纪80年代以来，全球范围内极端干旱事件频发，给生态环境、经济发展和人民生活造成了严重的影响和损失，引起各国政府及公众的广泛关注。西北地区东部属于典型干旱半干旱区，地形复杂，降水空间分布差异显著，生态环境脆弱，季节性干旱发生频繁，农作物产量受损严重，给当地经济及人民生活带来了极大影响（黄建平等, 2014）。因此，开展对中国西北地区东部极端干旱事件特征的分析具有重要的现实意义。

研究表明，近50年来，中国西北地区气温显著升高，降水空间差异明显，整体暖干化趋势显著，局部出现暖湿现象（张强等, 2010）。西北5省干旱发生区域随月份存在由南到北，由西向东变化的趋势；干旱面积变化总体表现为20世纪60—70年代干旱发生率较高，80年代干旱面积下降，90年代变化不大，而近年表现出略上升趋势（任余龙等, 2013）；西北地区东部春、夏、秋季干旱呈加剧趋势，冬季干旱呈减轻趋势，其中3—11月重到特旱加剧趋势显著，南部干旱化趋势比北部更加明显（杨建玲等, 2013）。将西北东部地区划分为青藏高原东部区和陕南地区，近百年来，青藏高原东部区有4个干期，而陕南地区出现5个干期（王芝兰等, 2015）。

气候变化研究中，不同的气候转换过程往往伴随着不同时间尺度的变化，探讨这种变化特点及其影响，往往需要较长尺度的时间序列（竺可桢, 1973；郑景云等, 1995）。中国比较完整的气象资料器测数据只有60多年。因此，利用历史文献记载、树木年轮、冰芯、湖泊沉积等代用资料对探索历史时期的气候变化特征及历史灾情重现等研究至关重要（Cook, et al, 2010；葛全胜等, 2013）。早在20世纪50年代末就已开始整理旱涝史料，1974—1980年进行了大规模、系统性查阅相关文献，整理出1470年以来中国旱涝分布图，并建立了一套旱涝等级序列（中央气象局气象科学研究院, 1981）。基于该旱涝等级序列数据集，不少学者开展了大量研究工作。王绍武等（1979）利用中国东部地区25个站的旱涝等级序列作经验正交函数（EOF）展开，并根据前3个经验正交函数空间模态分布把中国东部地区分为6种旱涝空间分布型，诸如北方多雨、南方少雨，华北、华南少雨而长江流域多雨等，并研究不同分布型在不同时段的分布情况。张先恭（1981）利用旱涝等级序列资料计算了逐年干旱指数，指出500多年来中国东部地区的干湿变化可分为3个阶段，其中1479—1691年为干旱期、1692—1890年为湿润期、1891年开始又转入干旱，且干湿期平均持续时间约200年。张德二等（1997）用旱涝史料构建了中国东部地区近1000年的干湿变化序列，并将中国东部分为6个区域分析干湿变化特征，指出在500年间中国夏半年雨量的变化主要在南北方向上差异明显，且存在空间的超前滞后性，南方和西部旱涝的发生往往早于北方和东部，东部各区域多次出现过世纪尺度和10—20年尺度的干湿气候跃变。Zhu等（2001）讨论了基于降水等级序列确定的东亚夏季风指数与中国东部夏季降水的关系，并得到中国东部华北、东北南部、长江中下游及江南地区夏季降水存在明显的80年振荡周期。朱亚芬（2003）利用中国东部地区530年来100个站旱涝等级序列深入讨论了中国北方季风边缘地带的旱涝演变特征。对中国地区近500年的持续特大干旱及旱灾个案进行分析，并针对严峻旱情给出减灾对策及建议（谭徐明, 2003；Zhang, et al, 2010）。侯威等（2008）利用旱涝等级研究了河北、山西、黄河中下游、江淮和西北东部地区531年极端干旱事件的概率，并从古里雅冰芯δ18氧含量、太平洋年代际振荡（PDO）及火山活动等因子分析了发生极端干旱的成因。

受限于观测资料的长度、站点选取及资料可靠性，长时期旱涝特征分析研究主要集中在中国东部地区，而对西北地区的研究仍较匮乏。在中国气象局气候变化专项“西北极端干旱事件个例库及干旱指标数据集”的支持下，2009年兰州干旱气象研究所组织西北4省（区）气象工作者对《中国近五百年旱涝分布图集》中西北12个站点的旱涝序列进行修订和增补，归纳整理出《中国西北地区近500年旱涝分布图集》（白虎志等, 2010）。该图集资料不仅是对《中国近五百年旱涝分布图集》资料在时、空尺度上很好的补充，同时也利用更为详细的史料（如地方志、石刻碑文等）及树轮等代用资料进行补充和修正。本研究基于该资料，对西北地区东部近546年

干旱变化及持续性特征进行分析,揭示西北地区东部从古至今的干旱时、空演变规律,有助于更好地理解人为变率和自然变率共同作用下及全球变暖背景下对西北地区东部的影响,为该地区更准确的气候预测提供参考依据。

2 资料与方法

2.1 旱涝等级资料

所用旱涝等级资料是以《中国近五百年旱涝分布图集》为基础,以历史文献为主,参考树木年轮、河流流量、内陆湖泊水位等代用资料,在确定历史数据判别原则的基础上,对《中国近五百年旱涝分布图集》中西北地区 12 个站点的旱涝序列进行修订和增补,增加了陕西宝鸡、甘肃武都、宁夏盐池和固原,青海玉树、兴海和刚察 7 个站点,共建立西北四省 19 个站点资料(白虎志等, 2010)。这套资料的旱涝等级分为 5 级(表 1),主要依据史料记载评定,但在有降水量记录时,则采用实测降水量换算,并和地方志进行对比修订而确定。表 2 是本研究建立的旱涝等级与《中国近五百年旱涝分布图集》刊布及续补(张德二等, 2003)的 1470—2000 年旱涝等级在增补及修订的对比,可以看出此处建立的旱涝等级在格尔木、兰州、平凉、天水及银川等台站增补了上百年资料,但仍不可避免存在资料缺失现象,尤其是西宁、张掖两站,在 1470—1700 年间(共 231 年),分别增补了 17 和 29 年的资料,但仍缺失 154 和 142 年。其余台站在增补后缺失资料年份不足 5%。

降水量换算的旱涝等级:

1级 $(\overline{R}+1.17\sigma)<R_i$ (1)

2级 $(\overline{R}+0.33\sigma)<R_i\leqslant(\overline{R}+1.17\sigma)$ (2)

3级 $(\overline{R}-0.33\sigma)<R_i\leqslant(\overline{R}+0.33\sigma)$ (3)

4级 $(\overline{R}-1.17\sigma)<R_i\leqslant(\overline{R}-0.33\sigma)$ (4)

5级 $R_i\leqslant(\overline{R}-1.17\sigma)$ (5)

式 (1)—(5) 中,$\overline{R}$为 5—9 月年平均降水量,R_i 为逐年 5—9 月降水量,σ 为标准差。这种用降水量评定旱涝等级的分级标准是为了与史料所得的旱涝等级频率保持一致(中央气象局气象科学研究院, 1981),是经过长时间的探索、改进,集思广益形成的,经统计检验分析认为其结果也是可靠的(张德二, 1983)。在续补 2009—2015 年旱涝等级资料时,取 1971—2000 年降水量的标准差,即《中国西北地区近 500 年旱涝分布图集》降水量换算为旱涝等级的标准,来延续 2009—2015 年的等级值,这和原五百年旱涝等级序列(1470—1979)使用的方差值有些差异。

由于西北西部台站稀少,可能会造成对西北西部干旱的代表性较差的影响,选取西北地区东部(约 31°—41°N, 100°—111°E)17 个台站(西宁、刚察、兴海、张掖、兰州、平凉、天水、武都、银川、盐池、固原、榆林、延安、西安、宝鸡、汉中、安康)为研究区域(图 1),对西北地区东部干旱的时、空特征进行分析。

为了检验旱涝等级资料的可靠性,利用祁连山中部地区(38°26'N, 99°56'E)采集祁连圆柏建立的 521 年树轮宽度指标(Liu, et al, 2005, 2007)与该点邻近的张掖及刚察站平均旱涝等级进行比较。祁连山中部属高寒干旱半干旱区及湿润区的过渡区,树木生长对气候变化响应敏感,海拔 2600—3500 m 处,祁连圆柏保存较好,利用树轮宽度对过去百年至千年尺度的温度及降水变化进行重建和分析是目前重要及有效的手段(Cook, et al, 2010)。

表 1 史料记载旱涝等级划分

Table 1 Ranks of flood/drought from historical records

旱涝等级		划分标准	史料描述
涝	1级	持续时间长且强度大的降水、大范围大水等。	“春夏霖雨”“夏大雨浹旬,降水溢出”“春夏大水溺死人畜无数”“大雨连日”“数县大水”“飓风大雨,漂没田庐”等。
偏涝	2级	春、秋单季成灾不重的持续降水、局地大水、成灾稍轻的飓风大雨。	“春霖雨伤禾”“秋霖雨害稼”“四月大水,饥”“局地大水”“暴雨,山洪,局地水河暴涨”等;涨水且有本地下雨记载。
正常	3级	年成丰稔,无水旱可记载。	“大稔”“大有年”“有秋”等;无下雨及旱灾记录。
偏旱	4级	单季、单月成灾较轻的旱、局地旱。	“春旱”“秋旱”“旱”“晚造雨泽稀少”“旱饥”“旱蝗”“夏禾旱歉收”“旱,钱粮暂行停征收”等。
旱	5级	持续数月干旱或跨季度旱,大范围严重干旱,社会经济影响大。	“春夏旱,赤地千里人食草根树皮”“夏秋旱,禾尽槁”“夏亢旱”“四月至八月不雨,百谷不登”“全区大旱饥,人相食”“饥荒,人相食,野无菱草”“旱,蝗为灾,禾稼殆尽”等。

表2 1470—2000年增补及修订对比

Table 2 Additions and revisions of data for the period 1470−2000

	增补年数	修订年数	增补后缺测年数
格尔木	484	40	0
西宁	34	26	206
张掖	95	81	142
兰州	139	89	25
平凉	151	68	3
天水	197	64	11
银川	110	219	0
榆林	0	34	0
延安	0	26	0
西安	0	36	0
汉中	0	16	0
安康	0	23	0

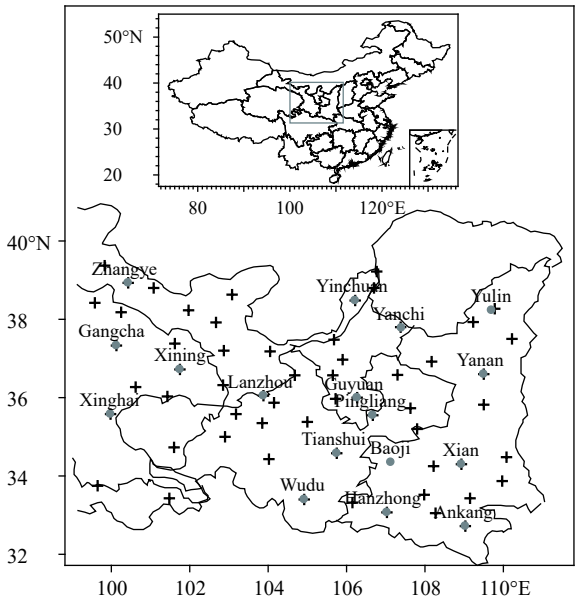


图1 研究区域及站点

Fig. 1 Spatial distribution of stations and research area

2.2 分析方法

主要运用统计诊断方法对西北地区东部546年干旱特征进行分析。经验正交函数分解(EOF)能够把随时间变化的要素场分离出空间分布结构和时间演变特征，并把要素场的信息集中在几个模态上。

参考龚志强等(2008)的研究，从旱(涝)群发性特征的角度定义某一时间窗口的干湿等级，分别取不同的窗口宽度，对于某一窗口内4—5级所占的比例越高则干旱的群发性越强，干旱的程度越强；并通过定义干旱尺度因子，表征干旱的持续性，对西北地区近546年旱涝的持续性进行分析。对于某一宽度的窗口(窗口宽度可取2—15)，g为某一窗口内4—5级所占的年数与窗口宽度的比值。当窗口宽度为2，且$g\geqslant 1/2$时为干旱一级；当窗口宽度为3，且$g\geqslant 2/3$时为干旱二级；当窗口宽度为4，且$g\geqslant 3/4$时为干旱三级；……；当窗口宽度为N，且$g\geqslant (N-1)/N$时为干旱$N-1$级。显然，干旱等级越高，对应的窗口宽度越长，窗口内4—5级的比重越高，极端干旱事件越重大。因此，该方法可作为重大干旱极端事件的一种可能定义，也可对干旱的群发性特征、重大极端事件和持续性特征进行分析。

此处对干旱面积(A)、旱涝平均等级(C)、旱涝发生频率(F)定义如下

$$A=\frac{N_4+N_5}{\sum_{i=1}^{5}N_i}\times 100\% \qquad (6)$$

$$C=\sum_{i=1}^{5}X_i\Big/\sum_{i=1}^{5}N_i \qquad (7)$$

$$F_i=\frac{T_i}{T_{ij}}\times 100\% \qquad (8)$$

式中，$i=1,2,\cdots,5$; $j=1,2,\cdots,16$; N、X、T分别为发生某一等级的台站数、等级值及发生次数。

3 旱涝等级资料可靠性的检验

在进行近546年长时间干旱特征的分析之前，先对旱涝等级资料的代表性、可靠性进行分析，以说明旱涝等级是否能反映夏季降水的变化。具体来说：(1)与降水量观测记录对比，(2)研究旱涝空间分布特征的稳定性(王绍武等，1979)，(3)与代用资料对比。对西北地区东部1958—2015年59个站点5—9月降水量及17个站点旱涝等级进行经验正交函数分解，对比降水量和旱涝等级的差异。采用经验正交函数分解的方法时需要完整的记录，考虑到资料缺测问题，且又要反映长时间序列的特征，选取1799—1950年的旱涝资料也进行经验正交函数分解，对比58年与152年旱涝等级确定的西北地区东部旱涝空间分布的差异。

表3是对1958—2015年降水量、旱涝等级及1799—1950年旱涝等级进行经验正交函数分解的前10个特征向量所占的方差百分比，可以看出，59个站点降水量和17个站点旱涝等级分解的前10个特征向量的方差贡献均十分一致，第1特征向

表 3 前 10 个特征向量总方差百分比(%)

Table 3 The first 10 eigenvalues and their contributions to the total variance (%)

时段	站数	对象	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1958—2015年	59	降水量	30.7	14.0	8.5	5.3	4.5	3.8	3.2	3.0	2.4	2.3
1958—2015年	17	旱涝等级	29.5	17.1	10.7	7.2	5.8	5.4	4.4	4.2	3.0	2.7
1799—1950年	17	旱涝等级	33.4	14.0	9.3	7.4	6.5	5.5	5.3	4.4	3.7	3.2

量方差百分比约为 30%,占总方差的三分之一,说明第 1 特征向量是西北地区东部旱涝的主要空间分布型。近 58 年的降水量与旱涝等级的特征向量方差百分比均非常接近,说明用 17 个站点的旱涝等级资料能反映西北地区东部 5—9 月降水量的情况,用旱涝等级资料来分析 5—9 月降水的长期变化是有依据的。近 58 年的旱涝等级与 152 年的旱涝等级结果对比,发现两者前 10 个特征向量的方差贡献率也非常一致,这也说明,西北地区东部旱涝的空间分布比较稳定。

前 3 个特征向量的总方差贡献率占 50% 以上,且均通过 95% 的显著性滑动 t 检验(North, et al, 1982),所以对前 3 个特征向量的空间分布型进行分析。

从 1958—2015 年 59 个站点降水量和 17 个站点旱涝等级经验正交函数分析(图 2)可以看出,前 3 个特征向量的空间分布型完全一致,分别为全区一致型、西北—东南反向型及陇东—陇南为中心与周围地区反向的空间分布的旱涝特征,这说明 17 个站点的旱涝等级可以代表西北地区东部 5—9 月降水量的分布。1958—2015 年旱涝等级与 1799—1950 年旱涝等级经验正交函数分解(图 2)可以看出,第 1 特征向量的空间分布基本一致,全区一致为正,方差贡献率超过 30%,说明西北地区东部地属季风边缘地带的半干旱半湿润地区,大背景下的气候形态一致,旱涝的主要空间分布型为全区一致型;1799—1950 年的高值区在陕南地区,而 1958—2015 年的高值区位于甘肃中东部—宁夏南部—陕西北部一带。第 2 特征向量为西北—东南反向型分布,即以陇中、宁夏及陕北为代表的西北部与陇南、陕南为代表的东南部的反向,主要表现为西北地区东部的“东南涝西北旱”或“西北涝东南旱”;1799—1950 年西北—东南反向分界线更偏于南北,为甘肃中东部—宁夏地区与陕西地区的反向分布。第 3 特征向量是以陇东—陕南为中心,与周围地区反向的旱涝空间分布型;1799—1950 年的负值区范围较 1958—2015 年大,从陇东—陇南地区扩展到陕南地区。以上可以看出,1958—2015 年的旱涝等级空间分布与 1799—1950 年的旱涝等级分布虽高值中心存在差异,但分布形态基本一致,说明西北地区东部旱涝空间分布受大气候背景影响,变化较为稳定。

采用代用资料与利用史料记载重建的旱涝等级资料进行对比,是验证旱涝等级资料可靠性的重要手段(郑景云等, 2014)。将祁连山中部地区样本的树轮宽度与刚察、张掖站平均旱涝等级时间序列进行对比(图 3)可以看出,旱涝等级的 11 年滑动平均与树轮宽度存在反相关关系,这是由于树轮宽度越窄说明树木生长环境越旱,则对应的旱涝等级越高。1470—2000 年的去趋势后的树轮宽度与旱涝等级滑动平均序列的相关系数高达 0.35,通过了 99% 的显著性滑动 t 检验,这进一步说明利用史料记载重建的旱涝等级资料分析干旱变化特征是可靠的。

4 结果分析

4.1 干旱发生频率的空间特征

统计了旱(5 级)、偏旱(4 级)的发生频率(图略),可以看出,发生旱的频率较高的地区位于青海中部、宁夏南部及陕西北部,陇南及陕西南部发生旱的频率较低。发生偏旱等级的频率较高地区位于宁夏到陕北一带。

进一步统计了 16 世纪至 20 世纪发生旱、偏旱的频率(图 4),总体来说,发生偏旱的频次要高于发生旱的频次,这也符合旱、偏旱的等级规律。从发生旱的情况看,16 世纪干旱主要发生在宁夏南部、陕西北部地区,17 世纪主要发生在甘肃中部及陕西南部地区,18 世纪主要发生在青海中东部、甘肃中部和陕北及陕西中部地区,19 世纪主要发生在青海中东部及甘肃陇东至陕西中部地区,20 世纪发生旱的频率增多,是干旱频次最多的时期,基本都在 10 次以上,最多的区域位于宁夏及陕西西北部地区,达到 24 次,不到 5 年就发生一次比较严重的干旱。发生

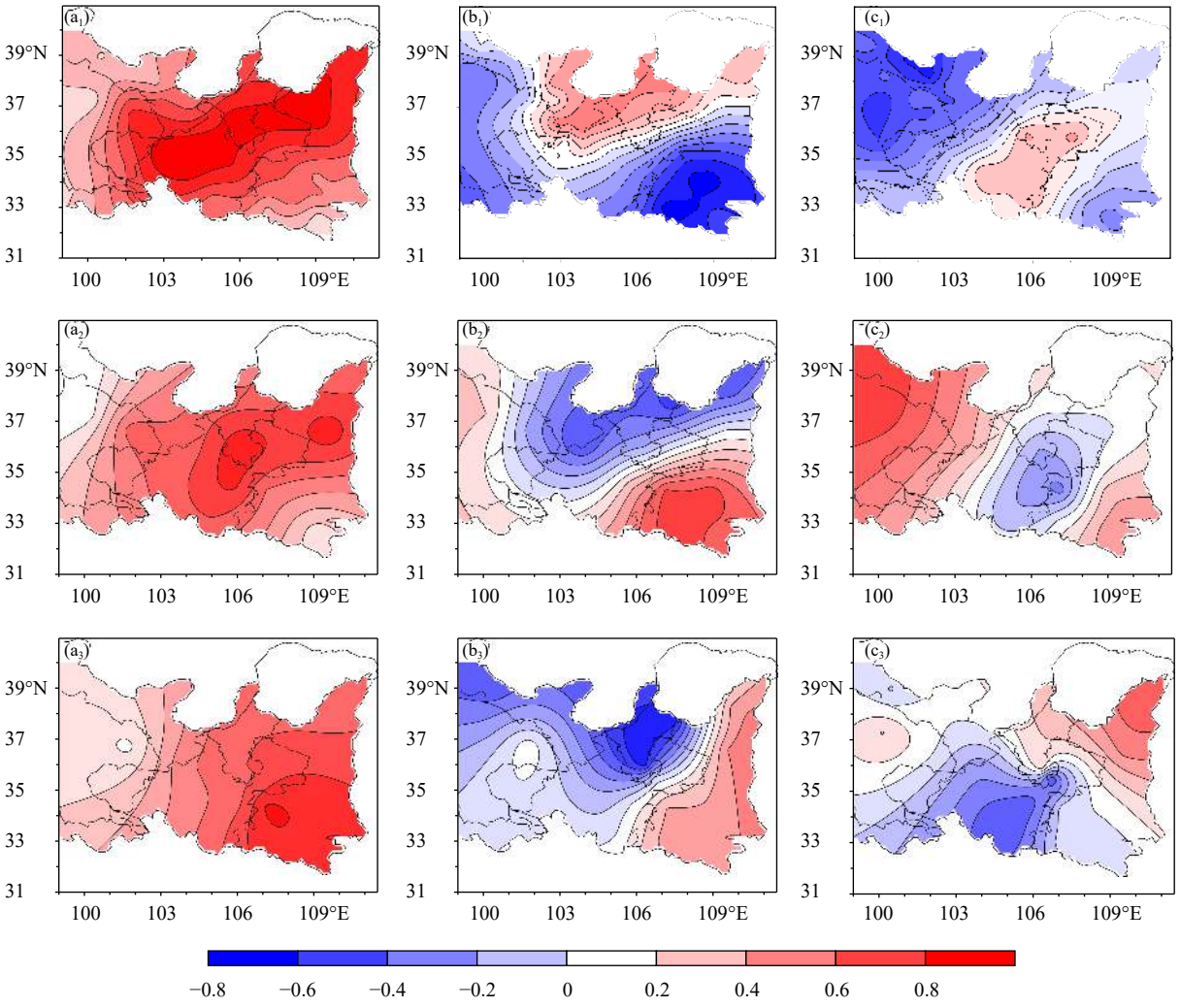


图 2　前 3 个特征向量的空间分布

(a_1—c_1. 1958—2015 年 59 站降水量, a_2—c_2. 1958—2015 年 17 站旱涝等级, a_3—c_3. 1799—1950 年 17 站旱涝等级)

Fig. 2　Spatial distributions of the first three eigenvalues

(a_1–c_1. precipitation at 59 stations from 1958 to 2015, a_2–c_2. drought/flood grade series at 17 stations from 1958 to 2015, a_3–c_3. drought/flood grade series at 17 stations from 1799 to 1950)

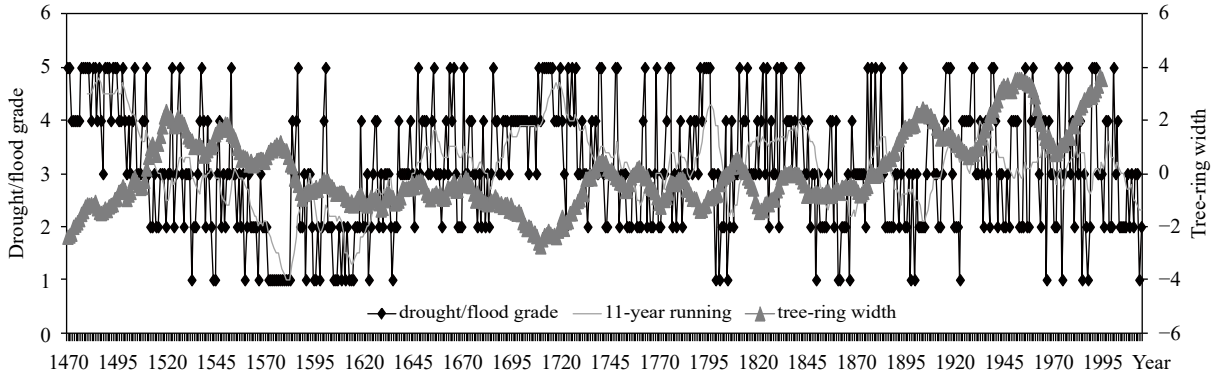


图 3　1470—2000 年祁连圆木树轮宽度指数与旱涝等级对比

Fig. 3　Comparison of drought/flood grades and tree ring index in Qilian from 1470 to 2000

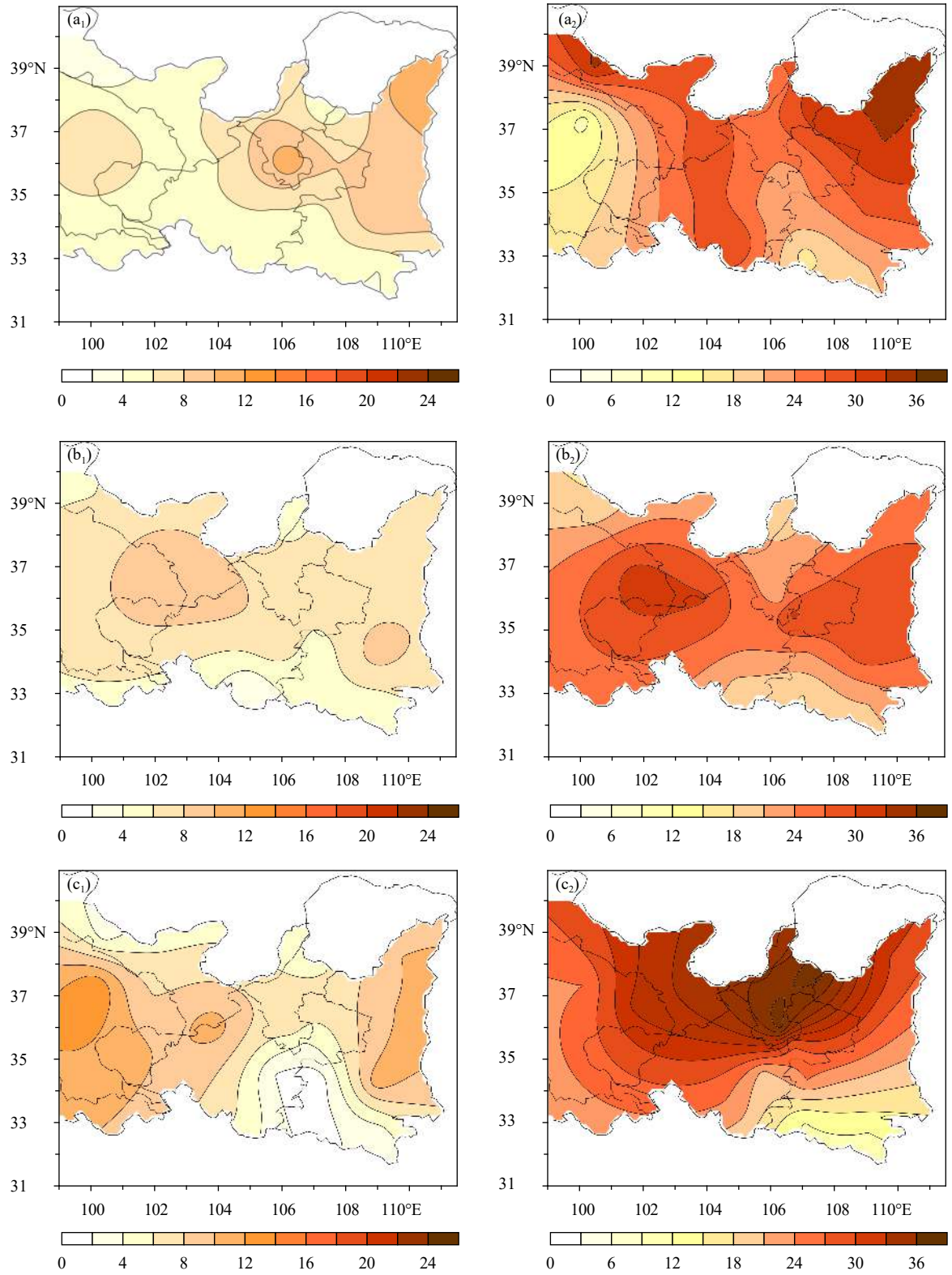
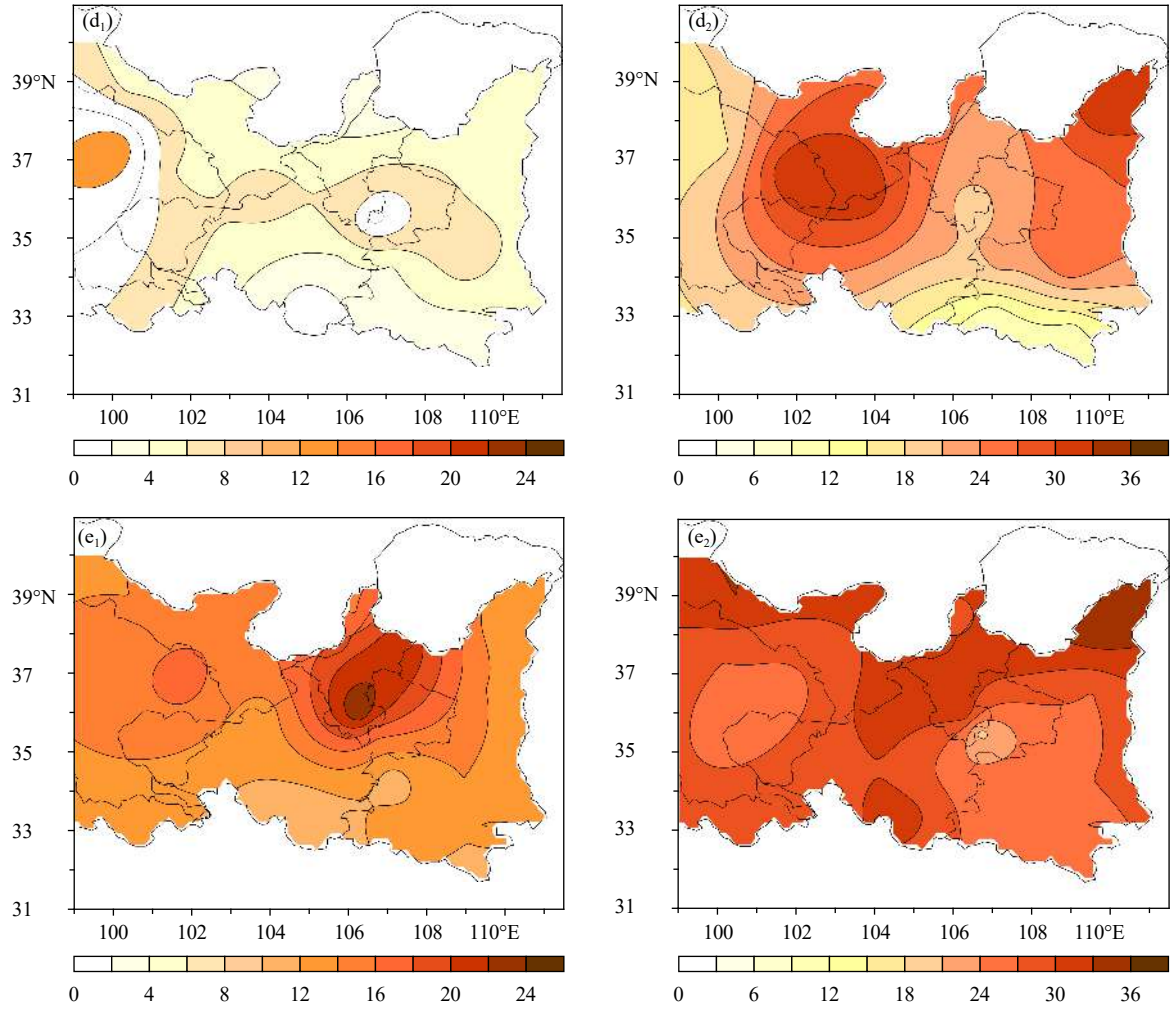


图 4 16—20 世纪（a—e）发生旱（a_1—e_1）、偏旱（a_2—e_2）等级的频率（单位:%）分布

Fig. 4 Frequency distribution (unit: %) of drought from the 16th to 20th centuries (a–e)

(a_1–e_1. the frequencies of drought in each century (level 5),
a_2–e_2. frequencies of partial drought in each century (level 4))



续图 4

Fig. 4 Continued

偏旱的情况为，16世纪主要在甘肃和陕西北部，17世纪甘肃中部至陕西中部一带，18世纪偏旱频率最高的时期，主要发生在以宁夏为中心并扩展到甘肃中部和陕西北部等区域，最多达到36次，平均3年一旱，19世纪主要发生在甘肃中部、陕西北部，20世纪偏旱频率较高且范围广，宁夏、陕北是高值中心区域。

总体来说，20世纪发生旱、偏旱的频率最高，18世纪次之；空间分布上，宁夏、陕北频率较高，最易发生干旱。

4.2 极端干旱事件的统计

根据干旱发生的强度、范围、持续时间，定义出西北地区东部十年一遇、五十年一遇、百年一遇及两百年一遇的极端干旱事件。定义如下(白虎志等，2010)：

十年一遇：当一次干旱事件的全区平均等级≥3.5或偏旱面积≥50%，时间持续2年时；或全区平均等级≥4.0或全区平均等级≥3.5且偏旱面积≥75%，时间持续1年。

五十年一遇：当一次干旱事件的全区平均等级≥3.5，或偏旱面积≥50%，时间持续3—4年。

百年一遇：当一次干旱事件的全区平均等级≥3.5，或偏旱面积≥50%，时间持续5年以上；或全区平均等级≥4.0，或偏旱面积≥80%，时间持续3年以上，人口及牲畜死亡惨重。

西北地区东部近546年十年一遇的极端干旱事件发生28次，五十年一遇的极端干旱事件发生9次，百年一遇的极端干旱事件共发生4次(表4)。其中发生在明思宗崇祯七年至十四年(1634—1641年)的极端干旱事件是西北地区东部近546年间连旱事

表 4 西北地区东部极端干旱事件统计

Table 4 Statistics of extreme drought events in eastern Northwest China

分类	发生次数	发生时段
十年一遇	28	1500、1521—1522、1531、1568、1581—1582、1609—1610、1616—1617、1656—1657、1690—1691、1750、1758—1759、1764—1765、1776—1777、1796—1797、1801、1813—1814、1857、1862、1892、1922、1924、1939、1941—1942、1965—1966、1971—1972、1986、1991、1997年
五十年一遇	9	1493—1495、1509—1512、1528—1529、1586—1587、1627—1630、1711—1714、1719—1722、1899—1901、1915—1916年
百年一遇	4	1481—1490、1634—1641、1876—1878、1926—1930年

件长,受旱范围广的一次最为严重的旱灾(白虎志等,2010)。

4.3 干旱年代际变化特征

为了进一步揭示西北地区东部 546 年干旱灾害在时间上的变化特征,分析干旱灾害的发生频次,并与洪涝灾害进行对比,统计了每 10 年的十年一遇及以上的旱涝频次及该时段的距平演变,距平值越大说明旱涝灾害发生的频率越大,相反,距平值越小说明旱涝灾害发生的频率越小。从图 5a 中可以看出,1480—1489 年干旱发生的频率最高,达 9 次,其次是 1580—1589 年及 1630—1639 年,均为 7 次。1480—1549 年这一阶段基本没有偏涝情况发生,进入 20 世纪,每年代旱、涝发生频次相当。546 年平均发生十年一遇及以上的旱灾频次约 2.9 次/(10 a),发生十年一遇及以上的涝灾频次约 1.8 次/(10 a),这也说明西北地区东部长时间以来,发生旱灾的频率要高于涝灾。由图 5b 可以看出,1470—1649 年以旱为主,基本无涝发生;1650—1679 年以涝为主;1680—1709 年旱、涝均不显著;1710—1739 年以旱为主;1740—1769 年以涝为主;1800—1900 年这一阶段是发生涝害的高频期;1900 年至今旱、涝频次相当,且距平为正,是旱、涝灾害的高频期。

4.4 干旱持续性研究

干旱的连续发生经常会导致灾害频发,损失严重,而干旱的持续使得损失加重、瘟疫流行、蝗害猖獗,使人们的生存受到威胁,对干旱持续性研究的重要性不言而喻(龚志强等,2008;封国林等,2012)。文中从干旱群发性特征的角度,分别取不同的窗口宽度,对于某一窗口内 4—5 级所占的比例进行统计,对西北地区近 546 年干旱的持续性进行分析。

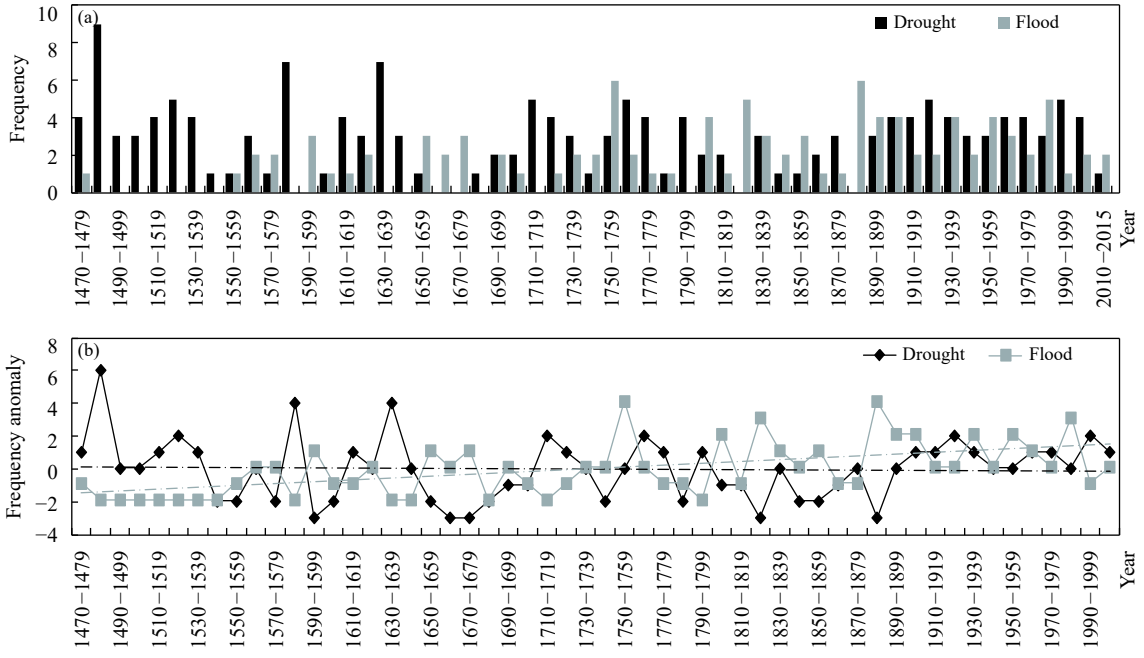


图 5 旱涝频次的年代际变化(a)及旱涝频次距平(b)

Fig. 5 Annual variations of drought and flood frequencies (a) and anomaly (b)

取窗口宽度为 2，滑动步长为 1 年，滑动统计 546 年旱涝等级指数序列中干旱一级的出现次数，即为 $P_i(2)$；取窗口宽度为 3，滑动步长为 1 年，滑动统计 546 年旱涝等级指数序列中干旱二级的出现次数，即为 $P_i(3)$；取窗口宽度为 4，滑动步长为 1 年，滑动统计 546 年旱涝等级指数序列中干旱三级的出现次数，即为 $P_i(4)$；依此类推，计算出各个干旱等级的出现次数 $P_i(N)$，对西北地区东部 17 个站点分别进行类似处理，发现各等级出现的次数与其窗口宽度呈指数分布，即遵循分布

$$P_i(x) = A\mathrm{e}^{-\gamma x} \quad i = 1,2,\cdots,17,\ x = 2,3,\cdots,15 \qquad (9)$$

式中，$P_i(x)$为不同干旱等级的出现次数，i 表示站点，x为窗口宽度，γ为指数分布特征值，A 为常系数。各站点旱涝指数序列，其不同干旱等级出现的次数与其对应的窗口宽度满足指数分布，说明各种不同等级的干旱事件的发生具有一定的随机性，但各种不同等级的干旱事件出现的次数在一个较长的时间段内是遵循一定规律的，并且时间越长，这种规律越明显。

结合式(9)中指数分布的数理意义，指数特征值γ越大，则表示等级较高的干旱事件发生的次数越少，不同等级干旱事件发生的次数从低到高的衰减速度较快，即连续或多次发生干旱事件的可能性较小；指数特征值γ小则相反。因此，定义干旱尺度因子为

$$\lambda = 1/\gamma \qquad (10)$$

用于描述干旱发生的持续性特征。从式(10)可以看出，干旱尺度因子λ大则表示干旱发生的持续性较好，干旱尺度因子λ越小则表示干旱发生的持续性相对较差。图 6 为 4 个代表站不同干旱等级 ln$p$-窗口宽度的散点分布。从图 6 可以看出，4 个代表站 ln$p$ 与窗口宽度均呈现较好的线性分布。代表站中，西安(λ=2.31)的干旱持续性较好，兰州(λ=2.07)次之，之后是银川(λ=2.01)，西宁(λ=1.23)的干旱持续性较差。

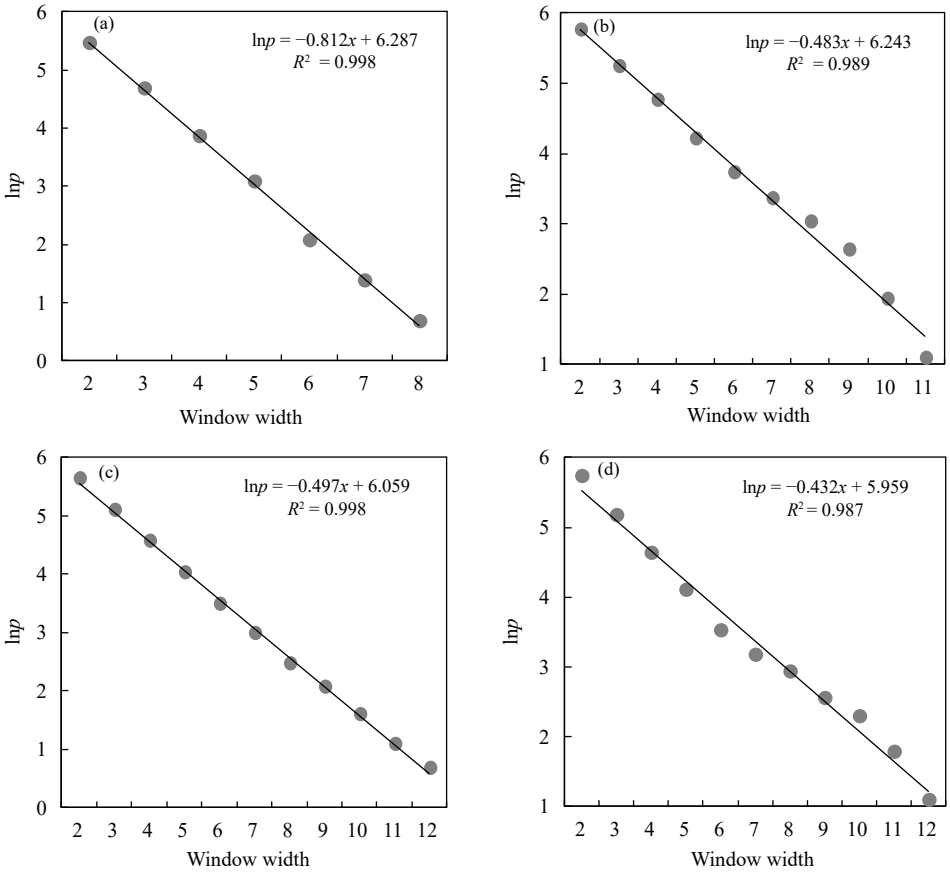


图 6　4 个代表站（a. 西宁，b. 兰州，c. 银川，d. 西安）不同干旱等级出现次数的对数 ln p-窗口宽度散点分布

Fig. 6　Logarithmic of the occurrence times of different drought levels-the window width at four representative stations in the scattered plot (a. Xining, b. Lanzhou, c. Yinchuan, d. Xi'an)

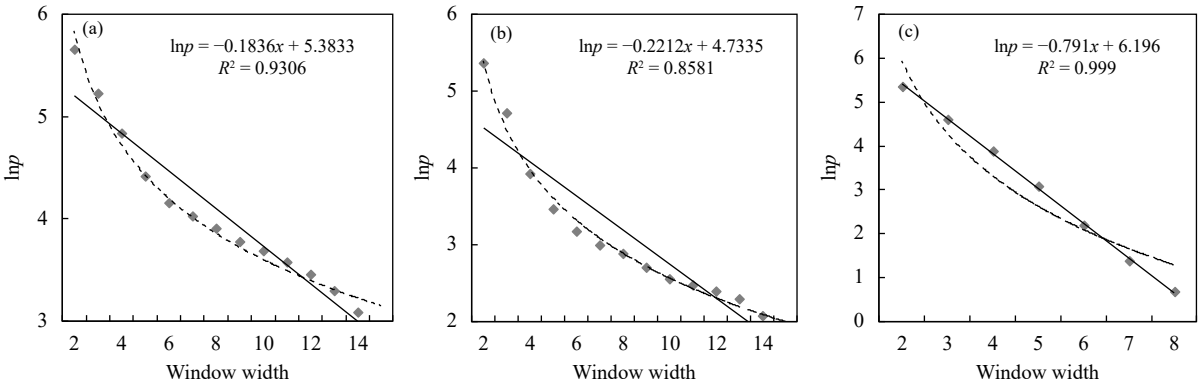


图 7 3 个代表站（a. 刚察, b. 张掖, c. 安康）的不同干旱等级出现次数的对数 ln*p*-窗口宽度散点分布

Fig. 7 Logarithmic of the occurrence times of different drought levels-the window width at three representative stations in the scattered plot (a. Gangcha, b. Zhangye, c. Ankang)

从刚察、张掖、安康代表站不同等级 ln*p* 与窗口宽度的散点(图 7)可以看出，刚察、张掖站的不同等级出现次数的对数与窗口宽度的散点分布近似于对数分布，而非线性分布，安康站的线性拟合较好。刚察站的干旱尺度因子为 5.45，张掖站的干旱尺度因子为 4.52，安康站的干旱尺度因子为 1.26，这说明，对于干旱尺度因子较大，即干旱持续性较好的地区更接近于对数分布，反之，对于干旱尺度因子较小，干旱持续性较差的地区线性拟合较好。在之后的研究中(图略)也发现，取不同时段时也符合以上结论。

从 17 个台站对应的干旱尺度因子的空间分布(图 8)可以看出，干旱尺度因子在甘肃河西、宁夏东部及陕西北部为大值区，说明这些区域干旱的持续性较好；青海东部、甘肃南部及陕南地区的干旱尺度因子相对较小，表明这些区域的干旱持续性较差。

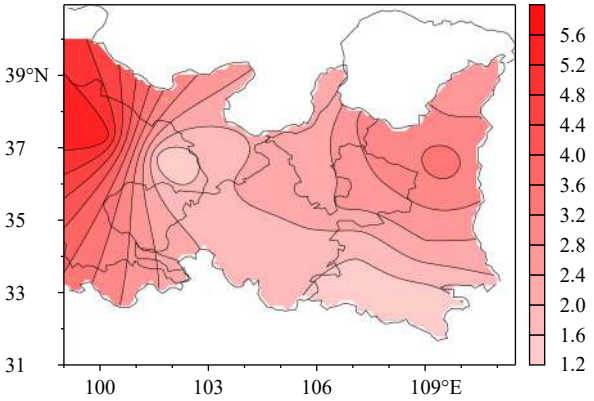


图 8 西北地区东部 546 年干旱尺度因子的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of drought scale factor during 546 years in eastern Northwest China

对于西宁站来说，地处研究区西部的干旱地区，但其干旱尺度因子相对较小，说明该地区干旱持续性较差，这可能与该地区人为因素有关。

进一步研究哪一时段的旱涝等级指数对干旱尺度因子的影响最大，取窗口长度为 20 年，在 546 年的指数序列中，第 1 次仅仅去除 1—20 年的旱涝等级指数，然后计算 17 个台站的干旱尺度因子。为了放大由于去除这一窗口的旱涝指数而产生的影响，计算了 17 个台站干旱尺度因子之和；第 2 次仅仅去除 21—40 年的旱涝等级指数，然后计算 17 个台站干旱尺度因子之和；……；依此类推直至旱涝等级指数序列末尾，由此得出每次去除某一时段旱涝等级指数值后干旱尺度因子之和

$$\lambda(i)=\sum_{j=1}^{16}\frac{1}{\gamma_j}\qquad i=1,2,\cdots,N/W_{\text{win}} \tag{11}$$

$$\overline{\lambda}=\frac{1}{N/W_{\text{win}}}\sum_{i=1}^{N/W_{\text{win}}}\lambda(i) \tag{12}$$

$$\Delta\lambda(i)=\lambda(i)-\overline{\lambda} \tag{13}$$

式中，W_{win} 为窗口宽度，N 为序列长度，$\Delta\lambda$为干旱尺度因子的距平值。为了进一步验证计算结果的可靠性及干旱持续性的多尺度性，分别取窗口长度为 30 和 40 年进行上述分析。

窗口长度分别取 20、30、40 年时，从西北地区东部干旱尺度因子和的距平值分布(图 9)可以看出，取 20 年窗口长度时，干旱尺度因子之和出现 4 个时段的距平负值期，分别为 1470—1500、1630—1640、1750—1780 和 1910—1960 年；取 30 年窗口长度

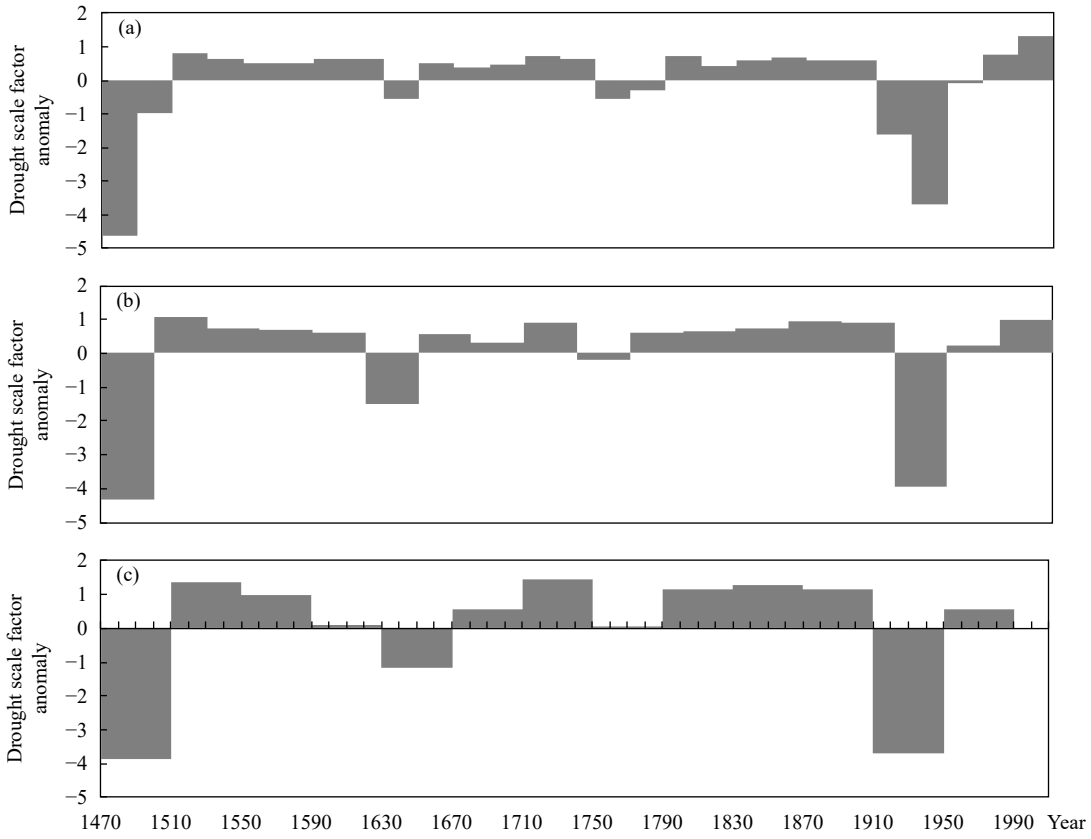


图 9　西北地区东部干旱尺度因子距平值

（a. 窗口长度取 20 年, b. 窗口长度取 30 年, c. 窗口长度取 40 年）

Fig. 9　Anomalies of drought scale factor in eastern Northwest China

（a. the window length is 20 years, b. the window length is 30 years, c. the window length is 40 years）

时，干旱尺度因子之和出现 4 个时段的距平负值期，分别为1470—1490、1620—1640、1740—1760 和1920—1930 年；取 40 年窗口长度时，干旱尺度因子之和出现 3 个时段的距平负值期，分别为 1470—1500、1630—1660 和 1910—1940 年。某一时段干旱尺度因子之和的距平为负时表明该时期对西北地区东部干旱尺度因子影响较大。从图 9 可以看出，1470—1500 和 1910—1940 年对干旱尺度因子影响最为明显，这两个时期恰好与前文统计的历史上出现在西北地区东部两次百年甚至两百年一遇的极端干旱事件（1481—1490 年持续 10 年的干旱、1926—1930 年的极端干旱）对应。因此，这也说明空间范围较大，且强度较强的重大干旱事件对干旱的持续发生起至关重要的作用。

综上所述，对干旱的持续性特征进行分析可以看出，空间分布上，甘肃河西—青海北部、陕西北部地区的干旱持续性较强；年代际变化上，1470—1500、1630—1660 和 1910—1940 年这 3 个时期对干旱持续性的影响较为显著。龚志强等（2008）的研究结果表明，1470—1510、1600—1680 及 1960—2000 年华北地区的干旱持续性影响显著，这也说明，重叠时段 1470—1500 和 1630—1660 年发生了持续性强且范围广的干旱事件。例如，发生在明朝末年（1634—1641 年）的连年干旱，以持续时间之长，受旱范围之大为近 500 多年来最严重的极端干旱事件，中国北、南方 23 个省（区）相继遭受严重旱灾，其中河北、河南、陕西、山西及山东连旱 5 年以上，灾情严重导致川竭井枯，颗粒未收，树皮食尽，人相残食的景象（张德二, 2004；白虎志等, 2010）。

5　结论与讨论

使用西北地区东部 17 个代表站 1470—2008 年的旱涝等级资料和 1958—2015 年 5—9 月气象站降水量数据，建立了 546 年中国西北地区东部旱

涝等级序列,采用经验正交函数分解、滑动 t 检验等统计方法,对其干湿演变规律进行分析,详细讨论了546年极端干旱事件及干旱持续性特征,研究结论如下:

(1)历史旱涝等级资料能够很好地反映出西北地区东部旱涝时、空分布特征,该地区旱涝的主要空间分布为全区一致型、西北—东南反向型及陇东—陇南为中心,与周围地区反向。

(2)从百年尺度来讲,20世纪发生旱、偏旱的频率最高,18世纪次之;空间分布上,宁夏、陕北频率较高;1900至今旱涝频次相当,是旱涝灾害的频发期。

(3)宁夏东部及陕西北部的干旱持续性相对较长,陇南及陕南地区的干旱持续性较差;1470—1500年和1910—1940年对干旱尺度因子影响最为明显,即干旱持续性较强,这两个时段分别对应着西北地区东部在历史上出现的两次百年甚至两百年一遇的极端干旱事件。这也说明,空间范围较大且在时间上同步的重大干旱事件对干旱的持续发生起至关重要的作用。

参考文献

白虎志, 董安祥, 郑广芬. 2010. 中国西北地区近500年旱涝分布图集: 1470-2008. 北京: 气象出版社, 2-20. Bai H Z, Dong A X, Zheng G F. 2010. Yearly Charts of Dryness/Wetness in Northwest China in the Last 500 Years (1470-2008). Beijing: China Meteorological Press, 2-20 (in Chinese)

封国林, 侯威, 支蓉等. 2012. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究. 北京: 科学出版社, 2-5. Feng G L, Hou W, Zhi R, et al. 2012. Detection, Diagnosis and Predictability Research of Extreme Climate Events. Beijing: Science Press, 2-5 (in Chinese)

葛全胜, 刘健, 方修琦等. 2013. 过去2000年冷暖变化的基本特征与主要暖期. 地理学报, 68(5): 579-592. Ge Q S, Liu J, Fang X Q, et al. 2013. General characteristics of temperature change and centennial warm periods during the past 2000 years. Acta Geogr Sinica, 68(5): 579-592 (in Chinese)

龚志强, 封国林. 2008. 中国近1000年旱涝的持续性特征研究. 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. Acta Phys Sinica, 57(6): 3920-3931 (in Chinese)

侯威, 杨萍, 封国林. 2008. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因. 物理学报, 57(6): 3932-3940. Hou W, Yang P, Feng G L. 2008. The decadal variability and its cause of the extreme drought in China. Acta Phys Sinica, 57(6): 3932-3940 (in Chinese)

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 J P, Ran J J, Ji M X. 2014. Preliminary analysis of the flood disaster over the arid and semi-arid regions in China. Acta Meteor Sinica, 72(6): 1096-1107 (in Chinese)

任余龙, 石彦军, 王劲松等. 2013. 1961-2009年西北地区基于SPI指数的干旱时空变化特征. 冰川冻土, 35(4): 938-948. Ren Y L, Shi Y J, Wang J S, et al. 2013. Spatial and temporal variation characteristics of drought in Northwest China during 1961-2009 with standardized precipitation index. J Glaciol Geocryol, 35(4): 938-948 (in Chinese)

谭徐明. 2003. 近500年我国特大旱灾的研究. 防灾减灾工程学报, 23(2): 77-83. Tan X M. 2003. Study of major drought catastrophes in China in recent 500 years. J Dis Prev Mitigat Eng, 23(2): 77-83 (in Chinese)

王绍武, 赵宗慈. 1979. 近五百年我国旱涝史料的分析. 地理学报, 34(4): 329-341. Wang S W, Zhao Z C. 1979. An analyses of historical data of droughts and floods in last 500 years in China. Acta Geogr Sinica, 34(4): 329-341 (in Chinese)

王芝兰, 李耀辉, 王素萍等. 2015. 1901-2012年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征. 中国沙漠, 35(6): 1666-1673. Wang Z L, Li Y H, Wang S P, et al. 2015. Characteristics of drought at multiple time scales in the east of northwest China from 1901 to 2012. J Des Res, 35(6): 1666-1673 (in Chinese)

杨建玲, 冯建民, 穆建华等. 2013. 西北地区东部季节干旱的时空变化特征分析. 冰川冻土, 35(4): 949-958. Yang J L, Feng J M, Mu J H, et al. 2013. An analysis of the characteristics of temporal and spatial variation of seasonal drought in the east of Northwest China. J Glaciol Geocryol, 35(4): 949-958 (in Chinese)

张德二. 1983. 我国近500年各区域旱涝变化及其与冬季冷暖的关系//国家气象局气象科学研究院. 气象科学技术集刊(四). 北京: 气象出版社, 40-46. Zhang D E. 1983. The variation of drought/flood for different regions and their relationship to winter temperature during the last 500 years in China//Academy of Meteorological Sciences, National Meteorological Administration. Collected Papers of Meteorological Science and Technology (IV). Beijing: China Meteorological Press, 40-46 (in Chinese)

张德二, 刘传志, 江剑民. 1997. 中国东部6区域近1000年干湿序列的重建和气候跃变分析. 第四纪研究, (1): 1-11. Zhang D E, Liu C Z, Jiang J M. 1997. Reconstruction-of six regional dry/wet series and their abrupt changes during the last 1000 years in east China. Quat Sci, (1): 1-11 (in Chinese)

张德二, 李小泉, 梁有叶. 2003.《中国近五百年旱涝分布图集》的再续补(1993-2000年). 应用气象学报, 14(3): 379-384. Zhang D E, Li X Q, Liang Y Y. 2003. Yearly charts of dryness/wetness in China during 1993 to 2000. J Appl Meteor Sci, 14(3): 379-384 (in Chinese)

张德二. 2004. 中国历史气候记录揭示的千年干湿变化和重大干旱事件. 科技导报, (8): 47-49. Zhang E R. 2004. Variation of dry-wet climate and severe drought events as revealed in the climate records of China over the past 1000 years. Sci Technol Rev, (8): 47-49 (in Chinese)

张强, 张存杰, 白虎志等. 2010. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的

影响: 总体暖干化, 局部出现暖湿迹象. 干旱气象, 28(1): 1-7. Zhang Q, Zhang C J, Bai H Z, et al. 2010. New development of climate change in northwest China and its impact on arid environment. J Arid Meteor, 28(1): 1-7 (in Chinese)

张先恭. 1981. 中国东半部近500年干旱指数的分析//全国气候变化学术讨论会文集. 北京: 科学出版社, 46-51. Zhang X G. 1981. Analysis of drought index for the last 500-year in East China//Bulletin of Climatic Change in China. Beijing: Science Press, 46-51 (in Chinese)

郑景云, 张丕远. 1995. 近500年冷暖变化对我国旱涝分区的影响. 地理科学, 15(2): 101-108. Zheng J Y, Zhang P Y. 1995. The impact of tempersture change for the last 500 years on the regional division of drought/flood in China. Sci Geogr Sinica, 15(2): 101-108 (in Chinese)

郑景云, 葛全胜, 郝志新等. 2014. 历史文献中的气象记录与气候变化定量重建方法. 第四纪研究, 34(6): 1186-1196. Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X, et al. 2014. Paleoclimatology proxy recorded in historical documents and method for reconstruction on climate change. Quat Sci, 34(6): 1186-1196 (in Chinese)

中央气象局气象科学研究院. 1981.中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1-332. Academy of Meteorological Science. 1981. Yearly Charts of Dryness/Wetness in China for the Last 500-Year Period. Beijing: Cartographic Publishing House, 1-332 (in Chinese)

竺可桢. 1973. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. 中国科学, 3(2): 168-189. Zhu K Z. 1973. A preliminary study on climate change in China for the past 5000 years. Sci China, 3(2): 168-189 (in Chinese)

朱亚芬. 2003. 530年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变. 地理学报, 58(S1): 100-107. Zhu Y F. 2003. The regional division of dryness/ wetness over eastern china and variations of dryness/ wetness in northern China during the last 530 Years. Acta Geogr Sinica, 58(S1): 100-107 (in Chinese)

Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. Science, 328(5977): 486-489

Fye F K, Stahle D W, Cook E R. 2003. Paleoclimatic analogs to twentieth-century moisture regimes across the United States. Bull Amer Meteor Soc, 84(7): 901-910

Liu X H, Qin D H, Shao X M, et al. 2005. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium. Sci China Ser D: Earth Sci, 48(4): 521-529

Liu X H, Shao X M, Zhao L J, et al. 2007. Dendroclimatic temperature record derived from tree-ring width and stable carbon isotope chronologies in the Middle Qilian Mountains, China. Arctic Antarct Alpine Res, 39(4): 651-657

North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Mon Wea Rev, 110(7): 699-706

Zhang D E, Liang Y Y. 2010. A long lasting and extensive drought event over China in 1876-1878. Adv Climate Change Res, 1(2): 91-99

Zhu J H, Wang S W. 2001. 80a-oscillation of summer rainfall over the east part of China and East-Asian summer monsoon. Adv Atmos Sci, 18(5): 1043-1051