



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.009

曹永强, 张亮亮, 朱明明. 辽西北地区干旱时空变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 49-54, 131. CAO Yong qiang, ZHANG Liang liang, ZHU Ming ming. Spatial and temporal variation characteristics of drought in Northwestern Liaoning Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 49-54, 131. (in Chinese)

## 辽西北地区干旱时空变化特征分析

曹永强, 张亮亮, 朱明明

(辽宁师范大学 城市与环境学院, 辽宁 大连 116029)

**摘要:** 利用辽西北地区14个气象站与水文站1971年-2010年的基础数据, 得到降水量距平值、连续无雨日数、河道来水量距平值和相对湿度, 并以这四项指标为基础, 利用可变模糊评价法得到辽西北地区综合干旱级别特征值, 再结合线性倾向估计法、Mann-Kendall趋势检验与反距离权重法对辽西北地区的气象、水文综合干旱时空分布特征进行分析。结果表明: 辽西北整体旱情呈显著加重趋势, 1971年-1980年以轻度干旱为主, 旱情较严重的时期为20世纪80年代后, 1981年-1990年干旱程度最为严重, 1980年-2010年是重度干旱高发期, 但特大干旱少有发生; 辽西北东北部和西南部地区旱情较为严重, 且随时间变化呈现出加重趋势, 而中部地区干旱较轻, 因此抗旱减灾的重点应集中在该区的东北部和西南部地区。

**关键词:** 辽西北; 综合干旱; 可变模糊; 时空变化; 级别特征值

**中图分类号:** S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0049-06

### Spatial and temporal variation characteristics of drought in northwestern Liaoning Province

CAO Yong qiang, ZHANG Liang liang, ZHU Ming ming

(School of Urban Planning and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** Based on the basic data of 1971-2010 at 14 meteorological stations in northwestern Liaoning province, this paper selected four indexes (the precipitation anomaly, number of consecutive days without rain, river runoff anomaly, and relative humidity), and obtained the comprehensive drought level characteristic value of northwestern Liaoning province using the variable fuzzy evaluation method. Then it used the linear trend estimation method and Mann-Kendall test method to analyze the trend of drought and used the IDW method to analyze the spatial variation characteristics of comprehensive drought. The results show that the drought is growing significantly more serious. During 1971-1980, the drought was mostly mild, but was aggravated after the 1980s, and became the most serious during 1981-1990. The period of 1980-2010 witnessed a high incidence of severe droughts but few extremely severe droughts. The drought was more serious and was aggravated with time in the northeast and southwest of northwestern Liaoning province, but was less serious in the central region. Therefore, drought resistance and disaster reduction efforts should be mainly concentrated on the northeast and southwest of the region.

**Key words:** northwestern Liaoning province; comprehensive drought; variable fuzzy; temporal and spatial variation; the level characteristic value

IPCC 第五次评估报告指出, 全球气候变暖已经 是毋庸置疑的事实, 由于气候变暖而引发的气候异

收稿日期: 2016-01-06 修回日期: 2016-04-22 网络出版时间: 2017-01-03  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170103.2039.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279072); 中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室开放基金(IAM201511)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51279072); Open Fund of Drought Climate Change and Disaster Reduction Key Laboratory, China Meteorological Administration (IAM201511)

作者简介: 曹永强(1972-), 男, 内蒙古乌盟人, 教授, 博士, 从事水文水资源方面研究。E-mail: caoyongqiang@lnu.edu.cn

常时常发生<sup>[1]</sup>。气候异常变化已经使我国产生了大范围的干旱<sup>[2]</sup>,并且造成了严重的社会经济损失。当前,干旱问题已经引起社会各界的广泛关注并成为水资源科学的研究热点<sup>[3]</sup>,干旱具体是指水分的收与支或供与求不平衡而形成的水分短缺现象<sup>[4]</sup>,干旱程度严重的将转为旱灾,旱灾是主要的自然灾害之一,造成的危害非常严重<sup>[5]</sup>。旱灾的频发,不仅较其他自然灾害影响范围广而且危害巨大,严重影响和制约了当地农业生产和社会经济的可持续发展<sup>[6,7]</sup>,因此,掌握研究区的干旱变化规律与特征,对于分析研究区是否存在干旱风险,以及对相关部门进行防灾减灾规划与管理等方面都有指导作用。目前,已有不少专家和学者对辽西北地区的干旱情况进行了分析:葛岩<sup>[8]</sup>等利用修正后的 Z 指数对辽西北地区干旱时空特性进行了分析,结果表明朝阳市为干旱高发区。董婷婷<sup>[9]</sup>构建了辽西北地区的干旱监测预警与评估系统,从而实现了对该区域旱灾发展过程的监测、预警工作。张继权<sup>[10]</sup>等绘制的农业干旱灾害风险区划图与 2006 年辽西北受干旱影响粮食减产系数区划图匹配良好。

对于干旱的研究方法主要有 Z 指数、标准化降水指数(SPI)、帕默尔干旱指数(PDSI)、综合气象干旱指数(CI)等,多数方法只针对某一种干旱类型进行分析。本文选取可变模糊评价法,建立基于气象、水文干旱的综合评价指标体系,继而对研究区旱情进行时空分析,该方法弥补了目前大多仅对单一类型干旱问题研究中的不足。本研究可为辽西北地区干旱风险分析以及相关部门进行抗旱减灾规划等方面提供理论依据。

## 1 研究区概况及数据方法

### 1.1 研究区概况及数据来源

不同的学者对辽西北范围的划定不同,本文中辽西北地区的范围包括:朝阳、阜新、锦州、葫芦岛四个地级市及所辖市县区及沈阳的康平、法库和铁岭的昌图县。该地区主要为低山丘陵区,所辖范围内主要有大凌河、小凌河、老哈河、表龙河等几大水系,但径流量均较小,土地瘠薄,旱情严重并且发生频率比较高<sup>[11]</sup>。气候条件属于暖温带半湿润、半干旱气候,受季风影响较大,春季蒸发快且多大风天气,很容易形成春旱。此外辽西北是棕壤与褐土的过渡地带,相互间呈镶嵌分布,全区土壤组合有 3 种类型:努鲁儿虎山和松岭山地西麓低山丘陵区,土壤呈以褐土为主的枝状分布;医巫闾山和松岭山地东麓低山丘陵区,土壤呈以棕壤为主的枝头分布;阜新、北

票等山间盆地,由盆地中心而外依次出现沼泽土、潮土、潮褐土、褐土或石灰性褐土。全区土壤质地以壤土和砂壤土为主,砂土和黏土零星分布。

本文所用数据来自中国气象科学数据共享服务网提供的“中国地面气候资料日值数据集”。数据资料包括:日降水、日平均温度、日最高温度、日最低温度、日照时数、2 m 高处风速等。水文站数据为辽宁西北部地区河道来水量的逐日资料。选取数据较为完整且分布均匀并具有代表性的 14 个站点。考虑到整体数据的完整性,将数据时间序列定为 1971 年—2010 年,共 40 年。辽西北地区地理位置及所选气象站点分布见图 1。

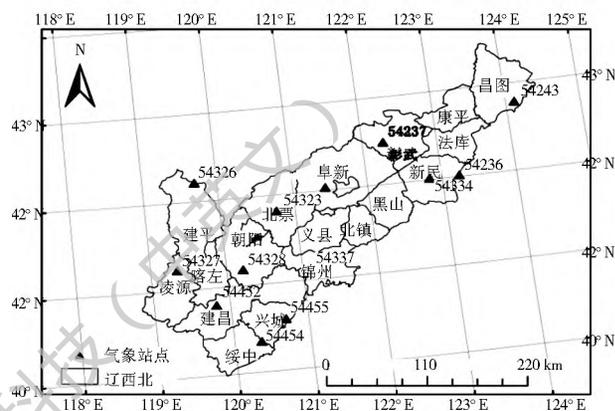


图 1 辽西北地区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in northwestern Liaoning province

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 可变模糊评价法

可变模糊集理论是以工程模糊集理论为基础,以相对隶属度、相对差异度和模糊可变集合为核心的一个比较系统的可变模糊集体系<sup>[12]</sup>,它能够量化的描述事物的质变与量变,在模型变化和模型参数的选择上选取了多组进行分类分析,提高了评价识别的可靠性,增加了决策的可信度。计算方法及步骤详见文献[13-14]。本文采用该方法选定合适的指标体系对辽西北地区旱情进行等级划定与分析。

选用降水距平值、连续无雨日数、河道来水量距平值以及相对湿度作为评价指标,并依据确定的指标体系的干旱等级标准值<sup>[15]</sup>(表 1),建立辽西北地区气象、水文综合干旱评价标准。基于可变模糊评价法计算得到的干旱级别特征值范围在 1~5 之间分别对应五个干旱等级,划定干旱级别特征值:1~1.5 为不干旱,1.5~2.5 为轻度干旱,2.5~3.5 为中度干旱,3.5~4.5 为重度干旱,4.5~5 为特大干旱。

表1 干旱等级评价指标及标准值  
Tab.1 Drought grade evaluation standards

评价指标	不干旱	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	特大干旱
降水距平值(%)	(-20, 0]	(-30, -20]	(-50, -30]	(-80, -50]	[-100, -80]
连续无雨日数/d	[0, 5)	[5, 9)	[9, 14)	[14, 20)	[20, 31]
相对湿润度	(-0.4, 0]	(-0.65, -0.4]	(-0.8, -0.65]	(-0.95, -0.8]	[-1, -0.95]
河道来水量距平值(%)	(-10, 0]	(-30, -10]	(-50, -30]	(-80, -50]	[-100, -80]

### 1.2.2 趋势分析法

线性倾向估计:用 $x_i$ 表示样本为 $n$ 的某一变量,用 $t_i$ 表示 $x_i$ 所对应的时间,建立 $x_i$ 与 $t_i$ 之间的一元线性回归方程如下:

$$x_i = a + bt_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其含义是表示一个变量 $x$ 与时间 $t$ 的线性关系, $a$ 代表线性回归常数, $b$ 表示回归系数, $a$ 和 $b$ 一般用最小二乘法进行估计。

Manr Kendall 非参数检验法,广泛应用于检测降水时间序列的趋势分析中,该方法计算简便,而且不受少数异常值的干扰<sup>[16]</sup>,鉴于线性倾向估计仅能反映辽西北地区旱情整体时间序列的趋势变化情况,然而对阶段性的旱情趋势表现不足,因此本文应用这两种方法相结合,确保辽西北地区旱情趋势变化的准确性。

### 1.2.3 反距离权重插值法

反距离权重插值(IDW)是基于“相似相近”原理的一种常用的空间插值方法,以插值点与样本间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本赋予的权重越大<sup>[17-19]</sup>。本文运用该方法对辽西北地区综合干旱级别特征值,及其变化倾向率进行空间插值,并通过对连续时间序列的插值结果进行对比分析,得到研究区干旱等级与干旱范围的空间变化情况。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 辽西北地区综合干旱时间序列变化特征分析

#### 2.1.1 辽西北干旱年际变化趋势

根据划分的干旱等级依次对1971年-2010年间的干旱、轻度、中度、重度、特大干旱范围进行40年较长时间序列的变化分析。由UF曲线可以看出,40年里不干旱的范围(图2(a))呈现出明显的缩小趋势,且从1988年左右开始超过0.05显著性水平,趋势显著。1991年不干旱情况发生范围最广,达到45%,其余年份均低于30%。自1996年至2010年只有2007年有不干旱的情况发生,但不干

旱范围也低于10%,且在14个测站中只发生过一次不干旱;辽西北地区整体时间序列轻度干旱范围(图2(b))都很大,均在30%以上。其中1982年和2000年发生范围最小,为35.7%,2010年发生范围最大,高达92.9%。UF曲线显示,轻度干旱范围整体趋势性不显著,但从2000年起直至2010年,轻度干旱范围正逐年增大。中度干旱范围(图2(c))在1971年-1980年呈现波动上升趋势,在1980年-1994年呈现明显的减小趋势,1994年-1999年趋势再次回升,之后除2004年范围有所扩大之外,其余年份均低于15%。1980年中度干旱范围最大,该区有7个县市出现中度干旱;重度干旱范围(图2(d))经历先变小后变大的趋势,1971年-1980年是重度干旱低发期,之后的30年里重度干旱频繁发生,年平均发生范围为15%;40年里特大干旱(图2(e))少有发生,范围逐渐缩小的趋势显著,只有7年(1972年、1977年、1984年、1988年、1989年、1992年、2000年)。1988年、2000年特大干旱范围超过了20%,1972年超过了30%,旱情非常严重,其余的4年里均在7%左右,表明这几年里少部分区域遭受特大干旱。

整体来看,1971年-1980年辽西北地区以轻度干旱为主,中度干旱在整个时间序列里经历了由缓慢上升到缓慢下降,再快速回升最后又开始下降且趋于平稳的变化趋势,1980年-2010年是重度干旱高发期,特大干旱少有发生。由于不干旱与轻度干旱对辽西北地区的影响较小,故将中度干旱,重度干旱和特大干旱发生范围超过30%的典型年份和发生地区进行提取分析,希望得到辽西北地区干旱较为严重的区域。该地区共有5个年份受旱情比较严重,分别为1972年、1980年、1982年、1983年、1989年、1999年,基本集中在20世纪80年代后,与辽宁省农作物旱灾成灾较严重的时期较为一致<sup>[20]</sup>。旱情严重区域主要集中在辽西北的东北部和西南部地区,中部地区中度以上旱灾少有发生。

#### 2.1.2 辽西北干旱年代际变化特征

将4个连续时期的各测站级别特征值绘制成时

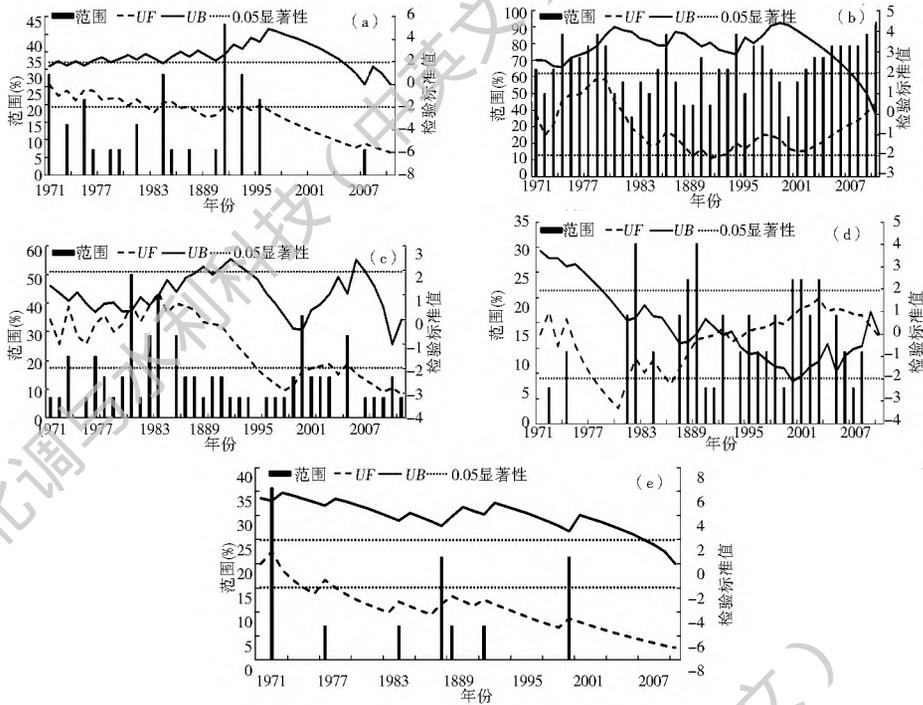


图 2 辽西北地区干旱范围分析

Fig. 2 Analysis of the scope of drought in northwestern Liaoning province

间序列变化曲线见图 3。除了北票、义县、黑山、锦州、兴城五地级别特征值呈现较小的降低趋势以外，其余监测站点的级别特征值均呈现不同程度的增大趋势，呈现增大趋势的站点占到了所有监测站点的 64.29%，并且彰武、建平、凌源以及绥中回归系数都在 0.1 以上。其中绥中超过了 0.3，是增大变化最为显著的区域，其次是建平和凌源。在 5 个呈现减小趋

势的地区中，回归系数的绝对值只有北票和锦州超过了 0.1，减少变化的趋势相对缓慢。在此基础上，对各条曲线的线性趋势进行显著性检验见表 2，结果除了阜新与义县两个测站未通过显著性检验外，其余测站均通过了 0.05 显著性水平检验，并且有部分测站通过了 0.01 显著性水平检验，线性趋势显著。整体可以看出，辽西北地区干旱程度正在逐年加重。

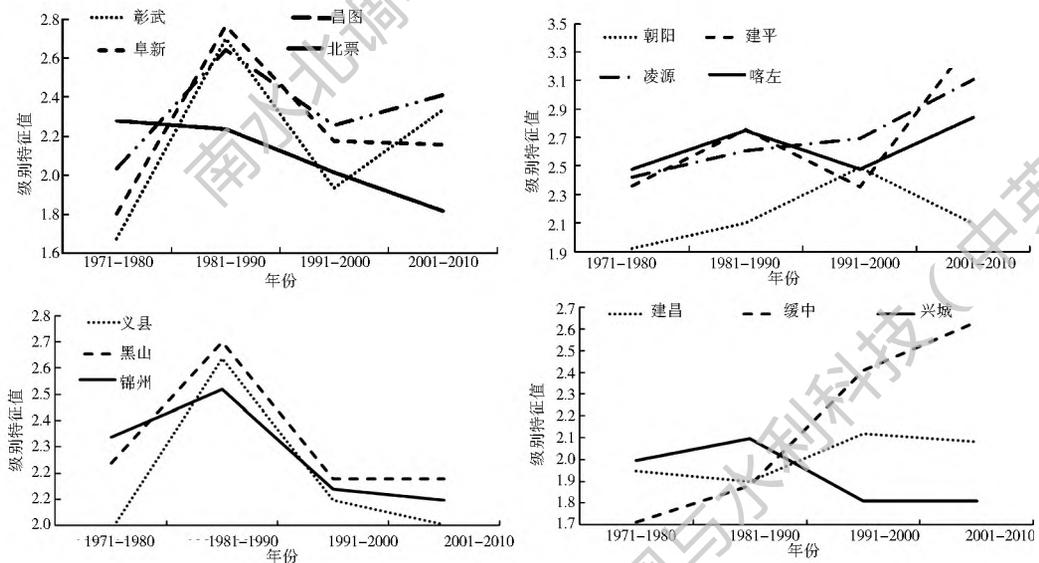


图 3 级别特征值线性倾向估计

Fig. 3 Linear trend estimation of the level characteristic value

## 2.2 辽西北综合干旱空间分布特征分析

### 2.2.1 辽西北干旱空间展布与空间趋势变化

借助 ArcGIS 软件的 IDW 对辽西北地区的干

旱级别特征值及变化倾向率进行空间插值，得到辽西北地区干旱的空间展布(图 4(a)) 和变化倾向率的空间分布(图 4(b))。整体可以看出，辽西北地区

表2 线性趋势显著性检验

Tab. 2 Linear trend test of significance

站点	站名	回归系数	相关系数  r	显著性检验
54236	彰武	0.1221	0.35	显著*
54237	阜新	0.0479	0.16	不显著
54243	昌图	0.0749	0.38	显著*
54323	北票	-0.1611	0.97	显著**
54324	朝阳	0.0905	0.49	显著*
54326	建平	0.2719	0.71	显著**
54327	凌源	0.2143	0.95	显著**
54328	喀左	0.0829	0.57	显著**
54334	义县	-0.0478	0.20	不显著
54335	黑山	-0.0702	0.36	显著*
54337	锦州	-0.1103	0.73	显著**
54452	建昌	0.0624	0.76	显著**
54454	绥中	0.3289	0.98	显著**
54455	兴城	-0.0845	0.76	显著**

注: \* 代表通过 0.05 显著性水平检验, \*\* 代表通过 0.01 显著性水平检验

西南部的凌源、建平、喀左一带干旱级别特征值最大,东北部次之,旱情较为严重;东南部的绥中、建昌以及朝阳、义县和彰武等地的部分区域干旱级别特征值比较小,干旱程度较轻。结合变化倾向率的空间分布情况可以看出,西南部地区变化倾向率最大,东北部相对较小且均为正值,说明西南部和东北部地区的干旱情况随时间变化有加重的趋势。此外,中部地区的北票、锦州和兴城一带的变化倾向率均为负值,说明该地区的干旱程度有减轻的趋势,与上文趋势分析结果相一致。

辽西北地区干旱空间分布情况主要受该地区的地形与气候特点的影响,该地区东部地势较为平缓,西部地势较高,当东南季风带来的水汽由辽宁省中部平原输送至辽西北时,受到西部山地阻挡从而使该区东部降水相对较多,因此旱情相对较轻,然而西部地区常年处于少雨状态从而导致了该区旱情较为严重。

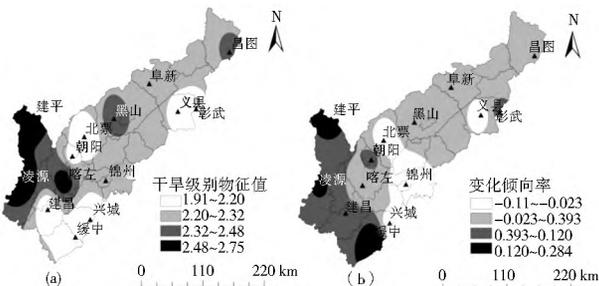


图4 辽西北干旱及变化倾向率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution and variation trend of drought in northwestern Liaoning province

## 2.2.2 辽西北干旱空间演化规律

将40年的时间序列划分为4个阶段,以各测站各期级别特征值为基础,同样运用IDW空间插值得到辽西北地区各阶段的空间分布状况,以期对比分析

辽西北地区旱情空间演变规律,结果见图5((a)为1971年-1980年旱区空间分布,(b)为1981年-1990年旱区空间分布,(c)为1991年-2000年旱区空间分布,(d)为2001年-2010年旱区空间分布)。

对比图5中的(a)、(b)、(c)、(d)可知,1971-1980年辽西北地区整体都处于轻度干旱范围,只有昌图县西北部小范围内出现中度干旱现象;1981年-1990年比前10年的干旱程度有所加重,其中东北部地区直至中部地区干旱等级由轻度干旱转变为中度干旱,此外在建平、凌源、喀左、锦州四地的部分地区也出现了小范围的中度干旱,轻度干旱并未向不干旱的情况转变;1991年-2000年干旱程度相比1981年-1990年有所缓解,对比分析可以看出辽西北大范围中度干旱区域已经变为轻度干旱,旱情有所缓解,但凌源县附近中度干旱范围有所扩大,图5(a)和图5(c)相比较,昌图县西北部中度干旱范围有所扩大;2001年-2010年旱情继续扩大,此时整个昌图县几乎完全转变成中度干旱并且延伸到康平、法库的东北部地区,此外建平、凌源、喀左、绥中的部分地区也开始变为中度干旱。

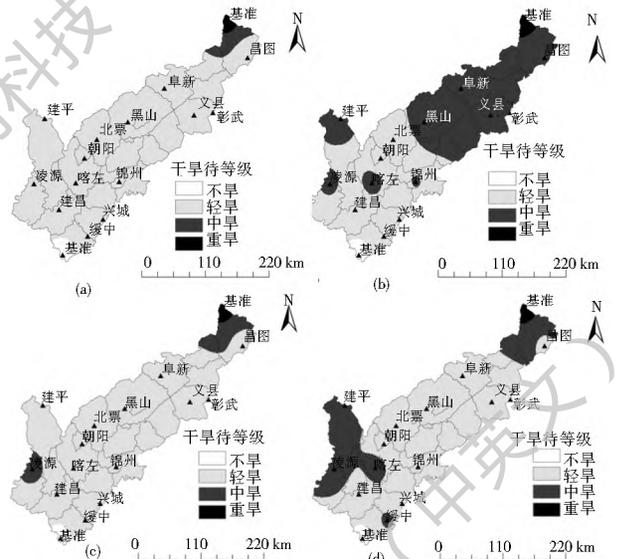


图5 辽西北干旱空间演化规律

Fig. 5 Spatial evolution of drought in northwestern Liaoning province

综合40年来的整体情况,在1981年-1990年辽西北地区干旱程度最为严重,以凌源西北部和昌图西北部地区为中心,由轻度干旱逐渐转变为中度干旱并且范围正在逐年扩大,整体旱情加重的趋势显著,与葛岩等认为辽西北干旱频率呈现上升趋势的结论一致。

## 3 结论

(1) 辽西北整体旱情加重的趋势显著。旱情较

严重的时段集中在 20 世纪 80 年代后, 1971 年—1980 年以轻度干旱为主, 中度干旱在整个时间序列里经历了由缓慢上升到缓慢下降再快速回升最后又开始下降且趋于平稳的变化趋势, 1980 年—2010 年是重度干旱高发期, 1981 年—1990 年是辽西北地区干旱程度最为严重的时期, 重度干旱范围经历先变小后变大的趋势, 特大干旱少有发生。

(2) 辽西北中部以及东南部地区的干旱程度较轻, 北票、锦州、兴城以及朝阳、义县一带旱情呈现出减轻趋势。东北部和西南部地区旱情较为严重, 且随时间变化呈现出加重趋势, 因此抗旱减灾重点应集中在辽西北的东北部和西南部地区。

(3) 辽西北旱情随时间变化的空间演化趋势为, 以凌源西北部和昌图西北部地区为中心, 由轻度干旱逐渐转变为中度干旱并且干旱范围正在逐年扩大。

#### 参考文献(References):

- [1] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013(5): 1068-1076. (SHEN Yongping, WANG Guoyu. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013(5): 1068-1076. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0120
- [2] 袁云, 李栋梁, 安迪. 基于标准化降水指数的中国冬季干旱分区及气候特征[J]. 中国沙漠, 2010(4): 917-925. (YUAN Yun, LI Dongliang, AN Di. Winter aridity division in China based on standardized precipitation index and circulation characteristics[J]. Journal of Desert Research, 2010(4): 917-925. (in Chinese))
- [3] 梁忠民, 酆建强, 常文娟, 等. 抗旱能力研究理论框架[J]. 南水北调与水利科技, 2013(1): 23-28. (LIANG Zhongmin, LI Jianqiang, CHANG Wenjuan, et al. Research on the theoretical framework of drought resistance capacity[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(1): 23-28. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01023
- [4] 倪深海, 顾颖, 王会容. 中国农业干旱脆弱性分区研究[J]. 水科学进展, 2005(5): 705-709. (NI Shenhai, GU Ying, WANG Huirong. Study on fragility zoning of agricultural drought in China[J]. Advances in water science, 2005(5): 705-709. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2005.05.016
- [5] 韩兰英, 张强, 姚玉璧, 等. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报, 2014(5): 632-639. (HAN Lanying, ZHANG Qiang, YAO Yubi, et al. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014(5): 632-639. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlx201405006
- [6] 徐建文, 居辉, 刘勤, 等. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2014(2): 460-470. (XUN Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al. Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014(2): 460-470. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201301240148
- [7] 沈彦军, 李红军, 雷玉平. 干旱指数应用研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013(4): 128-133, 186. (SHEN Yanyun, LI Hongjun, LEI Yurping. Research review on application of drought index[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(4): 128-133, 186. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.04128
- [8] 葛岩, 李趋, 褚丽妹, 等. 基于修正 Z 指数辽西北地区干旱时空特性分析[J]. 灌溉排水学报, 2013(5): 133-136. (GE Yan, LI Qu, CHU Limei, et al. Temporal and spatial analysis on drought events in northwest of Liaoning based on adjusted Z index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013(5): 133-136. (in Chinese))
- [9] 董婷婷. 辽西北干旱监测预警与评估系统建设研究[J]. 中国防汛抗旱, 2014(3): 41-43. (DONG Tingting. Construction of Liaoning Northwest drought monitoring and early warning and assessment system[J]. China Flood and Drought Management, 2014(3): 41-43. (in Chinese))
- [10] 张继权, 严登华, 王春乙, 等. 辽西北地区农业干旱灾害风险评估与风险区划研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012(3): 300-306. (ZHANG Jiquan, YAN Denghua, WANG Chunyi, et al. A study on risk assessment and risk regionalization of agricultural drought disaster in Northwestern Regions of Liaoning Province[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012(3): 300-306. (in Chinese))
- [11] 路广平, 郁凌峰, 梁立章. 2009 年辽西北地区特大干旱的分析[J]. 东北水利水电, 2011(10): 50-51. (LU Guangping, YU Lingfeng, LIANG Lizhang. Analysis of the severe drought in the northwest of Liaoning Province in 2009[J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 2011(10): 50-51. (in Chinese)) DOI: 10.14124/j.cnki.dbslsd22-1097.2011.10.008
- [12] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (CHEN Shouyu. Engineering fuzzy set theory and application[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese))
- [13] 雷江群, 黄强. 基于可变模糊评价法的渭河流域综合干旱分区研究[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 574-584. (LEI Jiangqun, HUANG Qiang. Variable fuzzy evaluation on comprehensive divisions of drought in the Wei River basin[J]. Journal of hydraulic engineering, 2014, 45(5): 574-584. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slx.2014.05.009
- [14] 曹永强, 李香云, 马静, 等. 基于可变模糊算法的大连市农业干旱风险评价[J]. 资源科学, 2011(5): 983-988. (CAO Yongqiang, LI Xiangyun, MA Jing, et al. Agricultural drought risk evaluation in Dalian based on the variable fuzzy method[J]. Resources Science, 2011(5): 983-988. (in Chinese))
- [15] GB/T 20481-2006. 气象干旱等级[S]. (GB/T 20481-2006. Meteorological Drought Grade[S]. (in Chinese))

(下转第 131 页)

- 分析[J]. 岩土力学, 2014( S1): 285-291. (SONG Bo, NIU Li chao, HUANG Shuai, et al. Research on dynamic response of pier column structures in ice plagued area under highly seismic action [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(S1): 285-291. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s1.041
- [6] 贾玲玲. 波浪力对深水桥墩结构在地震和冰荷载作用下的响应影响分析[J]. 震灾防御技术, 2010, 05(2): 263-269. (JIA Ling ling. Seismic and ice response analysis of bridge pier in deep water with the wave effect [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2010, 05(2): 263-269. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-5722.2010.02.015
- [7] 吴云凤. 黄河海勃湾水利枢纽施工期防凌设计[J]. 人民黄河, 2013(11): 90-92. (WU Yur feng. Ice prevention design during construction of Haibowan water control project on the Yellow River [J]. Yellow River, 2013(11): 90-92. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2013.11.032
- [8] Timco G W, Johnston M. Ice Loads on the Molikpaq in the Canadian Beaufort Sea [J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 37: 51-68. DOI: 10.1016/S0165-232X(03)00035-1
- [9] Brown T G, Mtnen M. Comparison of Kemf I and Confederation Bridge Cone Ice Load Measurement Results [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55: 3-13. DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.04.005
- [10] Brown T G, Tibbo J S, Tripathi D, et al. Extreme ice load events on the Confederation Bridge [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60: 1-14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.08.004
- [11] Qu Y, Yue Q, Bi X, et al. A random ice force model for narrow conical structures[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45: 148-157. DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.05.008
- [12] Yue Q, Bi X. Ice induced jacket structure vibrations in Bohai Sea [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14: 81-92. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-381X(2000)14:2(81)
- [13] 岳前进, 毕祥军, 于晓, 等. 锥体结构的冰激振动与冰力函数[J]. 土木工程学报, 2003, 36: 16-19. (YUE Qiarr jin, BI Xiang jun, YU Xiao, et al. Ice induced vibration and ice force function of conical structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36: 16-19. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2003.02.004
- [14] K<sup>3/4</sup>rn<sup>3/4</sup> T, Kamesaki K, Tsukuda H. A numerical model for dynamic ice structure interaction [J]. Computers & Structures, 1999, 72: 645-658. DOI: 10.1016/S0045-7949(98)00337-X
- [15] Withalm M, Hoffmann N P. Simulation of full scale ice structure interaction by an extended matlock model [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60: 130-136. DOI: 10.1016/j.coldregions.2009.09.006
- [16] Yue Q, Guo F, K<sup>3/4</sup>rn<sup>3/4</sup> T. Dynamic ice forces of slender vertical structures due to ice crushing [J]. Cold Regions Science & Technology, 2009, 56(2-3): 77-83. DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.11.008
- [17] 季顺迎, 李紫麟, 李春花, 等. 碎冰区海冰与船舶结构相互作用的离散元分析[J]. 应用力学学报, 2013(4): 520-526. (JI Shur ying, LI Zi lin, LI Chur hua, et al. Discrete element modeling of ice loads on ship hulls in broken ice fields [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013(4): 520-526. (in Chinese)) DOI: 10.11776/cjam.30.04.D032
- [18] Hopkins M A. Discrete element modeling with dilated particles [J]. Engineering Computations, 2004, 21: 422-430. DOI: 10.1108/02644400410519866
- [19] Hopkins M A, Shen H H. Simulation of pancake ice dynamics in a wave field [J]. Annals of glaciology, 2001, 33: 355-360. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.02.003
- [20] Hansen E H, Lset S. Modelling floating offshore units moored in broken ice: model description [J]. Cold Regions Science and Technology, 1999, 29: 97-106. DOI: 10.1016/S0165-232X(99)00023-3
- [21] Lau M, Lawrence KP, Rothenburg L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures [J]. Ships and Offshore Structures, 2011, 6(3): 211-221. DOI: 10.1080/17445302.2010.544086
- [22] Lu W, Lubbad R, Lset S. Simulating ice sloping structure interactions with the cohesive element method [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2014, 136: 031501. DOI: 10.1115/1.4026959

(上接第 54 页)

- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. (WEI Fengying. The statistical diagnosis and prediction technology of modern climate[M]. Beijing: Meteorological Press, 1999: 63-65. (in Chinese))
- [17] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (TANG Guo an, YANG Xin. The experimental tutorial of Geographic information system spatial analysis[M]. Beijing: China: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [18] 蔡福, 于慧波, 矫玲玲, 等. 降水要素空间插值精度的比较—以东北地区为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 73-79. (CAI Fu, YU Hui bo, JIAO Ling ling, et al. Comparison of precision of spatial interpolation of precipitation factors: A case study in northeastern China [J]. Resources Science, 2006, 28(6): 73-79. (in Chinese))
- [19] 孔云峰, 全文伟. 降雨量地面观测数据空间探索与插值方法探讨[J]. 地理研究, 2008, 27(5): 1097-1108. (KONG Yur feng, TONG Wer wei. Spatial exploration and interpolation of the surface precipitation data [J]. Geographical Research, 2008, 27(5): 1097-1108. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国农业部. 新中国农业统计 60 年[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009. (The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Agricultural Statistics of China in 60 Years [M]. Beijing, China: China Agriculture Press, 2009. (in Chinese))