

近50年川中丘陵区季节性干旱时空变化特征

龙贻东^{1,2}, 梁川^{1,2}, 詹存^{1,2}

(1. 四川大学 水利水电学院 成都 610065; 2. 四州大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 近年来川中丘陵区季节性干旱频繁发生, 对四川省农业生产造成严重影响。根据川中丘陵区8个气象站点1960年—2011年的逐日气象资料, 选用国家标准中相对湿度指数作为干旱指标, 采用线性趋势法、morlet小波及反距离加权插值法, 研究川中丘陵区季节性干旱频率和强度的时空分布特征。研究结果表明: 川中丘陵区不同季节干旱频率和强度差异大, 春冬两季的干旱频率和强度显著大于夏秋两季, 干旱发生主要集中在春冬两季; 时间上, 春旱和秋旱呈加重趋势, 夏旱和冬旱呈减轻趋势, 其中春旱有3个周期演变规律, 冬旱有2个周期演变规律; 空间上, 春夏两季川中丘陵区中部为干旱高发区, 秋冬两季川中丘陵区北部为干旱高发区。该研究可为川中丘陵区制定防旱减灾措施提供理论依据。

关键词: 川中丘陵区; 相对湿度指数; 干旱; 时空分布; 小波变换

中图分类号: S42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1045-06

Spatial and temporal distribution of seasonal drought in hilly area of central Sichuan in recent 50 years

LONG Yr dong^{1,2}, LIANG Chuan^{1,2}, ZHAN Cun^{1,2}

(1. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In recent years, seasonal droughts occur frequently in the hilly area of central Sichuan, resulting in serious impacts on the agricultural production in Sichuan. According to the daily meteorological data of eight meteorological stations from 1960 to 2011 in this area, the relative humidity index in the national standards was selected as the drought index, and linear trend method, Morlet wavelet, and inverse distance weighting interpolation method were used to investigate the spatial and temporal distribution of seasonal drought frequency and intensity. The results indicated that (1) drought frequency and intensity have large differences in different seasons, and they are significantly higher in spring and winter than those in summer and autumn, and drought occurs mainly in spring and winter; (2) on the temporal distribution, drought in spring and autumn tends to be worse while drought in summer and winter alleviates. Drought in spring has three cycle evolutions while drought in winter has 2 cycle evolutions; and (3) on the spatial distribution, the central hilly area of central Sichuan has high incidence of drought in spring and summer, while the northern hilly area of central Sichuan has the high incidence of drought in autumn and winter. This study can provide a theoretical basis for the drought control and mitigation measures in the hilly area of central Sichuan.

Key words: hilly area of central Sichuan; relative moisture index; drought; spatial and temporal distribution; wavelet transform

1 研究背景

干旱是影响我国农业生产的主要气象限制因子之一^[1]。四川省是我国重要的农业种植区, 但随着全球气候的变暖, 年内降水时空分布不均, 省内季节性干旱发生频率高、影响范围广、经济损失大^[2]。例如2006年川渝地区百年特大伏

旱^[3]、2009年秋至2010年春西南地区秋冬连旱等^[4], 因此季节性干旱已严重制约了四川省的农业发展。

目前, 国内学者对干旱已经做了大量的研究, 干旱的研究方法和评价指标已逐渐趋于完善。任培贵等^[5]利用SPEI干旱指标分析了西北地区的气象干旱变化趋势, 发现西北地区普遍存在干旱现象; 张振伟等^[6]采用帕默尔干旱指数(PD

收稿日期: 2015-02-01 修回日期: 2015-10-12 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2100.046.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51009101); 水利部公益性资助项目(201101038); 四川省科技项目(14H1172)

作者简介: 龙贻东(1988-), 男, 重庆人, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: longyidong8810@hotmail.com。

通讯作者: 梁川(1957-), 男, 四川雅安人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: lchester@sohu.com。

SI) 研究甘肃省的干旱时空变化特征,发现甘肃全省旱情地域差别较大,呈现微弱缓解趋势;李红英等^[7]计算 CI 干旱指数分析宁夏干旱致灾因子特征,研究发现近 30 年宁夏干旱频率和干旱强度均呈增加趋势;翟禄新等^[8]采用 SPI 干旱指标分析了西北地区气候干湿变化,发现西北地区干旱发生的地域持续在改变,但干旱频次总体呈下降的趋势。

总体而言,干旱研究主要集中在中国北方干旱、半干旱地区^[5-10],而西南的川中丘陵区是我国重要的农业种植区,全面系统地分析其季节性干旱时空分布特征的研究相对较少。由于干旱的影响因素多,形成原因复杂^[11],本文采用综合考虑降水与蒸发气象因子的相对湿度指数作为干旱评价指标^[12],系统分析四川省川中丘陵区季节性干旱时空演变特征,对当地科学制定防旱减灾措施具有重要意义。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

川中丘陵区位于 103° 15' E- 108° 30' E, 27° 35' N- 32° 52' N (图 1),海拔为 300~ 600 m,地势自东南向西北逐渐增高,是一个典型的以农业为主导产业的地区^[13]。区内的地形和气候条件特殊,春季多低温寒潮,秋季多绵雨,季节性干旱频发。

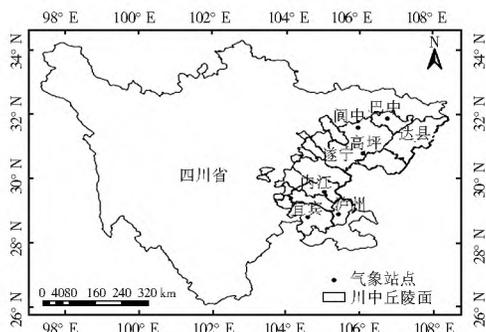


图 1 川中丘陵区代表站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the hilly area of central Sichuan

2.2 资料来源及处理

本文使用的地面观测站气象数据来源于中国气象数据共享网,主要资料为 8 个站点(图 1) 1960 年- 2011 年的逐日数据,包括降水量、平均气温、日照时数、平均风速、空气相对湿度、空气水汽压等实测数据,以计算日值为基础累积到月、年值。

2.3 研究方法

相对湿度指数(M)同时综合降水与需水要素,适用于旬以上尺度的干旱评估,其计算公式^[14]如下:

$$M = \frac{P - PE}{PE} \quad (1)$$

式中: P 为降水量(mm); PE 为可能蒸散量(mm), $PE = ET_0$, ET_0 计算采用联合国粮农组织(FAO) 1988 年修正的 Penman Monteith 模型,通过下式计算:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \frac{900}{T + 273} \quad (2)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线

在气温为 T 时的斜率(kPa/°C); R_n 为净辐射(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)); γ 为干湿常数(kPa/°C); T 为平均气温(°C); U_2 为距地面 2 m 高处的风速(m/s); e_a 为饱和水汽压(kPa); e_d 为实际水汽压(kPa)。

参考国家标准《气象干旱等级》^[14]中提出的干旱分级指标并结合川中丘陵区的实际情况,采用王明田^[15]对相对湿度指数分级所做的订正,见表 1。

表 1 相对湿度指数干旱等级划分

Tab. 1 Drought classification base on relative humidity index

等级	类型	年尺度(12个月)	季尺度(3个月)
1	无旱	- 0.15 < M	- 0.30 < M
2	轻旱	- 0.30 < $M \leq - 0.15$	- 0.50 < $M \leq - 0.30$
3	中旱	- 0.40 < $M \leq - 0.30$	- 0.65 < $M \leq - 0.50$
4	重旱	- 0.45 < $M \leq - 0.40$	- 0.80 < $M \leq - 0.65$
5	特旱	$M \leq - 0.45$	$M \leq - 0.80$

为了更好地反映研究区域干旱发生程度,采用干旱频率(P_i)和干旱强度(S_{ij}) 2 种干旱指标,通过线性趋势法在季尺度上分析年平均相对湿度指数的多年变化趋势;在 ArcGis 环境下通过反距离加权(Inverse Distance Weighted, IDW)插值法绘制空间分布图,进而对干旱的空间差异进行分析;采用 morlet 小波进行周期波动分析,从发生频率和强度角度反映川中丘陵区季节性干旱时空演变规律。

3 结果与讨论

3.1 干旱时间分布特征

3.1.1 干旱年际变化

计算川中丘陵区 8 个站点各个季节的相对湿度指数平均值,采用线性趋势法得到季尺度上 1960 年- 2011 年相对湿度指数的年际变化,见图 2。

(1) 春季。图 2(a) 显示,近 52 年川中丘陵区相对湿度指数在 - 0.437~ 0.358 之间变化,多年平均值为 - 0.056。20 世纪 60 年代到 80 年代初,相对湿度指数呈略下降的趋势(干旱强度略微上升);20 世纪 80 年代初到 90 年代初,相对湿度指数呈明显的上升趋势(干旱强度显著下降),1992 年达到最大值 0.358,为干旱强度最小的年份;20 世纪 90 年代初到 20 世纪末,相对湿度指数又呈明显下降趋势(干旱加强),其中 2001 年达到最小值 - 0.437,为干旱强度最大的一年;2000 年以来,相对湿度指数呈略微下降趋势。总体趋势来看,春季湿润指数呈略微下降趋势,表明干旱强度略有加强。

(2) 夏季。图 2(b) 显示,夏季相对湿度指数在 - 0.447~ 1.173 之间变化,多年平均值为 0.395。其中,相对湿度指数在 1965 年达到最大值 1.173,在 2006 年达到最小值 - 0.447。总体趋势来看,夏季相对湿度指数呈显著上升趋势,年际变化率为 0.03/(10a),表明干旱强度明显下降。

(3) 秋季。图 2(c) 显示,秋季相对湿度指数在 - 0.455~ 1.622 之间变化,多年平均值为 0.308。20 世纪 60 年代到 80 年代中期,相对湿度指数以正距平为主,其中在 1964 年达到最大值 1.622(干旱强度相对较弱);20 世纪 80 年代至今,相对湿度指数以负距平为主,其中在 1998 年达到最小值 - 0.455(干旱强度相对较强)。总体趋势来看,秋季相对

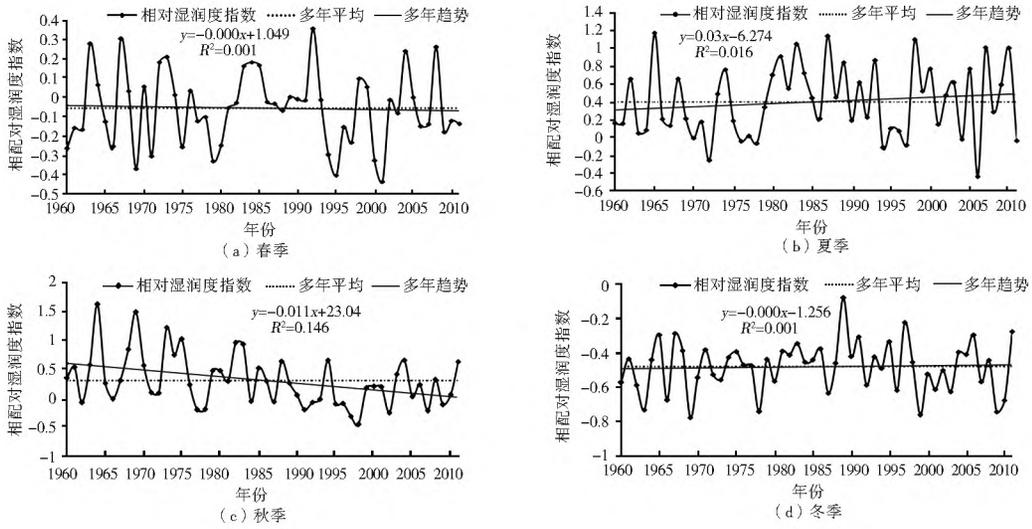


图2 川中丘陵区年相对湿度指数年际变化

Fig. 2 Annual variation trends of the relative humidity index in different seasons and years in the hilly area of central Sichuan

湿度指数呈显著下降趋势,年际变化率为 $-0.11/(10a)$,说明该区秋季干旱强度呈明显上升趋势。

(4) 冬季。图2(d)显示,冬季相对湿度指数在 $-0.079 \sim -0.776$ 之间变化,多年平均值为 -0.480 。其中,在1969年达到最小值 -0.776 ,相当于重旱,在1989年达到最大值 -0.079 。总体趋势来看,冬季相对湿度指数略呈上升趋势,表明干旱强度有所缓和,但不明显。

3.1.2 干旱周期分析

对比不同季节相对湿度指数,春季和冬季的相对湿度指数明显较小,表明这两个季节川中丘陵区干旱尤为严重。为了进一步分析川中丘陵区干旱的周期性变化,运用morlet小波变换得到春冬两季的相对湿度指数小波变换系数实部时频分布(图3)和小波方差(图4)。

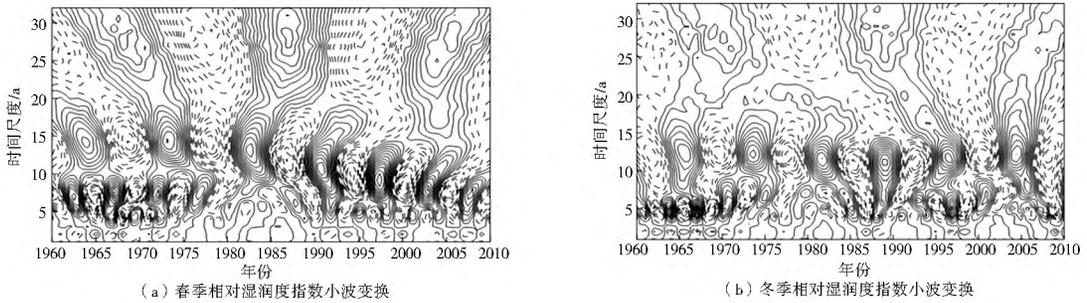


图3 相对湿度指数小波变换系数实部时频分布

Fig. 3 Time frequency distribution of real part of wavelet coefficients of relative humidity index

图3显示:春季相对湿度指数分别有8a、13a和29a 3个周期,其中8a周期在20世纪60年代到70年代中期振荡最为显著,变化相对稳定;13a和29a周期的相对湿度指数出现增大和减小交替振荡的次数分别为7次和3次,周期变化具有全域性特征,并且这两个周期在近52a都

表现非常稳定(图3(a))。冬季相对湿度指数分别出现5a和12a的2个周期变化规律,其中5a周期在20世纪60年代振荡较明显;12a周期的相对湿度指数出现增大和减小交替的6次振荡,变化特征稳定且具有全域性(图3(b))。

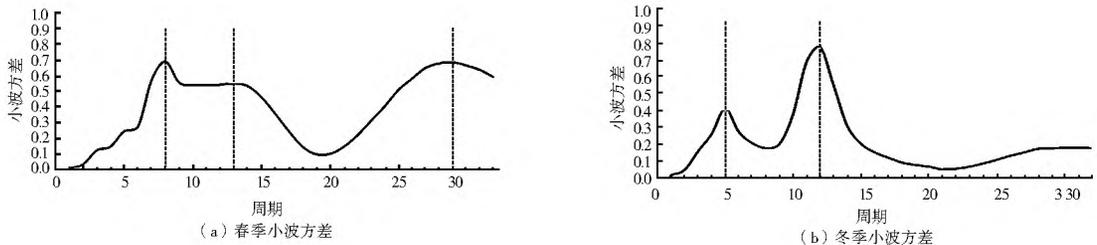


图4 相对湿度指数小波方差

Fig. 4 The wavelet variance of relative humidity index

图4显示:春季相对湿度指数在8a、13a、29a出现峰值,其中8a周期振荡最为明显,为第一主周期(图4(a))。冬季相对湿度指数的12a周期为第一主周期,其次是5a周期(图4(b))。

3.2 干旱空间分布特征

3.2.1 干旱频率空间分布

把代表站点不同季节发生的干旱次数除以总年份数作为干旱发生的频率,然后利用ArcGis进行空间插值,以此来

分析川中丘陵区干旱频率的空间分布特征。

(1) 春旱。图 5(a) 所示, 川中丘陵区春旱频率在 5.77% ~ 44.23% 之间, 平均为 21.39%, 呈显著的带状分布。干旱高发区主要分布在阆中和内江地区, 频率多在 40% (5 年 2 遇) 以上。此外, 巴中和遂宁地区春旱频率也多在 20% (5 年 1 遇) 以上。高坪和泸州地区春旱发生频率最低, 在 10% 以下。

(2) 夏旱。图 5(b) 所示, 川中丘陵区夏旱总体较轻, 发生频率在 1.92% ~ 13.46% 之间, 平均仅为 6.49%, 呈显著的集中性分布。夏旱发生频率较高的地区主要分布在北部的达县和中部的的高坪, 频率在 10% (10 年 1 遇) 以上。巴中、内江和泸州夏旱发生频率最低, 在 5% 以下。

(3) 秋旱。图 5(c) 所示, 川中丘陵区秋旱频率介于春旱和夏旱之间, 平均为 10.10%, 也呈显著的带状分布。其中, 达县是秋旱高发地区, 频率多在 25% (4 年 1 遇) 以上, 内江秋旱频率为 17.31%, 泸州频率最低为 3.85%。除此之外, 其他地区秋旱发生频率在 5% ~ 10% 之间。

(4) 冬旱。图 5(d) 所示, 川中丘陵区冬旱最为严重, 发生频率在 26.93% ~ 98.08% 之间, 平均高达 75.0%, 呈显著的北高南低的分布。其中北部的达县地区为冬旱高发区, 频率在 90% (10 年 9 遇) 以上。阆中、巴中、遂宁和内江地区冬旱频率多在 80% (5 年 4 遇) 以上, 宜宾冬旱频率也为 50% (2 年 1 遇)。此外, 南部的泸州地区为冬旱低发区, 频率在 25% (4 年 1 遇) 以上。

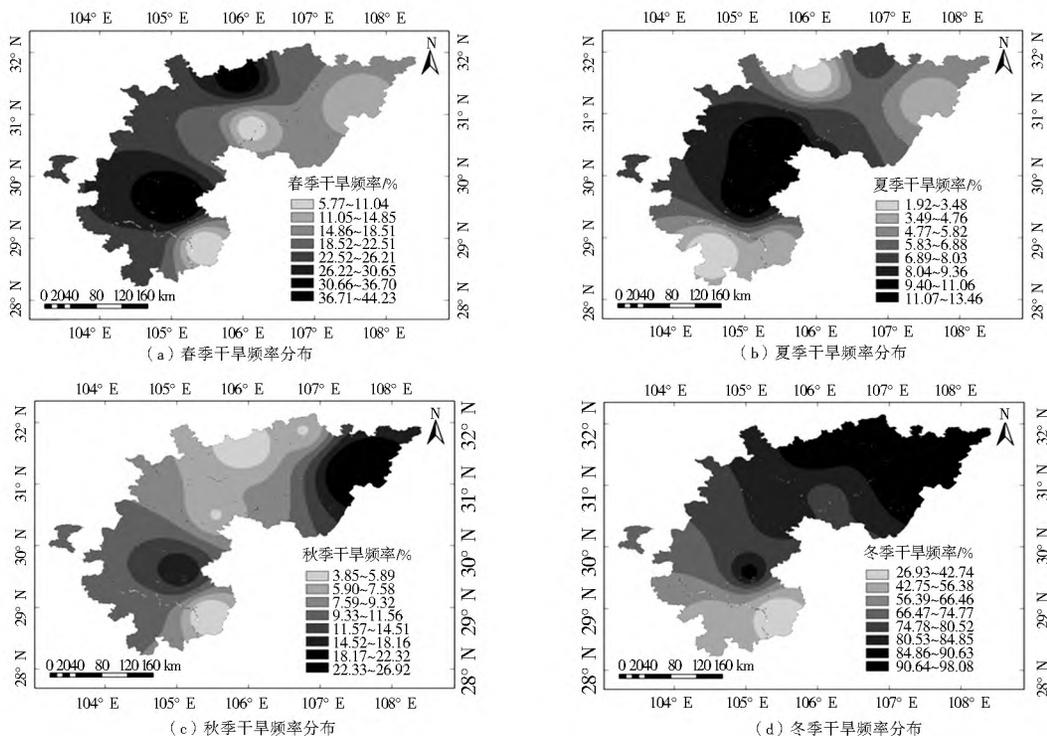


图 5 川中丘陵区各季节干旱频率空间分布

Fig.5 Spatial distribution of drought frequency in different seasons in the hilly area of central Sichuan

3.2.2 干旱强度空间分布

计算各站点不同季节的相对湿度指数的多年平均值表示干旱强度, 然后利用 ArcGis 进行空间插值, 以此来研究川中丘陵区干旱强度的空间分布特征。

(1) 春旱。图 6(a) 所示, 川中丘陵区春季干旱强度空间分布与春季干旱频率空间分布不一致。北部的达县、巴中和阆中, 中部的遂宁和内江, 南部的宜宾春季相对湿度指数在 -0.4 以下, 表示干旱以轻旱为主。此外, 高坪和泸州地区的相对湿度指数在 -0.4 以上, 干旱以轻度偏弱为主。

(2) 夏旱。图 6(b) 所示, 夏季干旱强度空间分布与夏季干旱频率空间分布基本一致, 呈显著的集中性分布。中部的遂宁和高坪地区相对湿度指数较小, 北部的宜宾和泸州地区相对湿度指数次之, 都在 -0.4 以下, 干旱以轻旱为主。其他地区的相对湿度指数都在 -0.4 以上, 干旱以轻度偏弱为主。

低分布, 北部的内江地区相对湿度指数最小在 -0.4 以上, 干旱以轻度偏弱为主。除此之外, 其他地区的秋季相对湿度指数都在 -0.4 以下, 表明干旱以轻旱为主。

(4) 冬旱。图 6(d) 所示, 冬季干旱强度空间分布与冬季干旱频率空间分布一致, 也就是说干旱频率高的地方, 干旱强度也高, 且冬季相对湿度指数为四季中最小, 表明冬季干旱最为严重。其中, 北部的达县地区相对湿度指数在 -0.65 以下, 表示干旱以重旱为主。阆中、宜宾、巴中、遂宁和内江地区的相对湿度指数在 -0.5 以下, 干旱以中旱为主。此外, 泸州和高坪地区的相对湿度指数在 -0.4 以下, 干旱以轻旱为主。

4 结论

(1) 在干旱频率方面, 冬旱频率最高, 高发区主要在川中丘陵区北部的达县附近; 春旱频率次高, 高发区主要在北部的阆中和中部的内江附近; 秋旱频率较低, 多发区与冬旱类

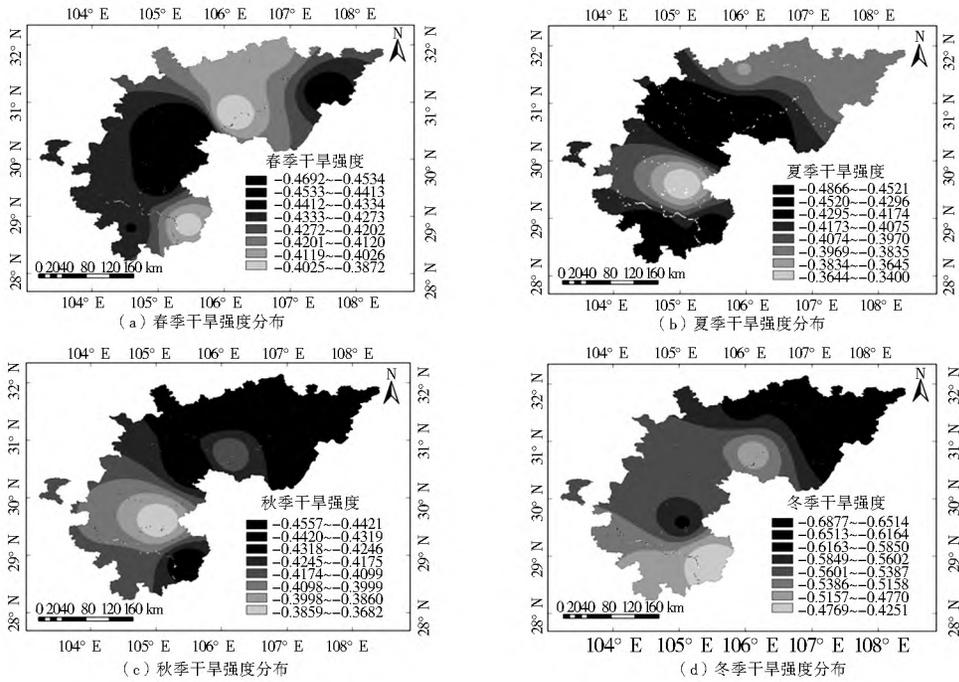


图6 川中丘陵区各季节干旱强度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought intensity in different seasons in the hilly area of central Sichuan

似,但频率和范围都不及冬旱;夏旱频率最低,高发区主要集中在川中丘陵区中部的高坪和北部的达县附近。

(2)在干旱强度方面,冬旱强度最高且与干旱频率空间分布一致,周期性强,其中12 a为第一主周期;夏旱强度最小,与干旱频率空间分布基本一致;春秋两季干旱强度介于夏旱和冬旱强度之间,其中,春旱强度周期性强,8 a为第一主周期。

(3)秋旱发生频率和强度在四季中次之,但从年际变化来看,秋季相对湿度指数呈显著的下降趋势,年际变化率为-0.11/(10a),对冬旱强度有增加的趋势。从冬旱发生频率和强度来看,达县为川中丘陵区干旱最为严重的地区,相关部门应加强意识,采取积极防旱措施。

本文仅从气候角度分析川中丘陵区季节性干旱时空分布特征,农业生产中干旱是否发生还与地形地势、土壤状况及作物种类等多种因子有关,需要综合研究。

参考文献(References):

[1] 王东,张勃,安美玲,等.基于SPEI的西南地区近53a干旱时空特征分析[J].自然资源学报,2014,29(6):1003-1016. (WANG Dong, ZHANG Bo, AN Mei ling, et al. Temporal and spatial distributions of drought in southwest China over the past 53 years based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 1003-1016. (in Chinese))

[2] 刘定辉,刘永红,熊洪,等.西南地区农业重大气象灾害危害及监测防控研究[J].中国农业气象,2011,32(增刊1):208-212. (LIU Ding hui, LIU Yong hong, XIONG Hong, et al. Research on the harmfulness prevention and control of main agricultural weather disaster in southwest China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(Supp. 1): 208-212. (in Chinese))

[3] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季

节性干旱近58a演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59. (HU ANG Warr hua, YANG Xiao guang, LI Ma song, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 50-59. (in Chinese))

[4] 刘建刚,谭徐明,万金红,等.2010年西南特大干旱及典型场次旱灾对比分析[J].中国水利,2011(9):17-20. (LIU Jian gang, TAN Xu ming, WAN Jin hong, et al. Comparative analysis between the 2010 severe drought in southwest China and typical drought disasters[J]. China Water Resources, 2011(9): 17-20. (in Chinese))

[5] 任培贵,张勃,张调风,等.基于SPEI的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J].水土保持通报,2014,34(1):182-187. (REN Pei gui, ZHANG Bo, ZHANG Tiao feng, et al. Trend analysis of meteorological drought change in northwest China based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 182-187. (in Chinese))

[6] 张振伟,韩曦.基于PDSI的甘肃省干旱时空变化特征分析[J].人民黄河,2014,36(3):49-51. (ZHANG Zhen wei, HAN Xi. Temporal and spatial variation feature analysis of drought in Gansu province based on PDSI method[J]. Yellow River, 2014, 36(3): 49-51. (in Chinese))

[7] 李红英,张晓煜,王静,等.基于CI指数的宁夏干旱致灾因子特征指标分析[J].高原气象,2014,33(4):995-1001. (LI Hong ying, ZHANG Xiao yu, WANG Jing, et al. Analysis of drought disasters causing factors in Ningxia based on CI index[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 995-1001. (in Chinese))

[8] 翟禄新,冯起.基于SPI的西北地区气候干湿变化[J].自然资源学报,2011,26(5):847-857. (ZHAI Lu xin, FENG Qi. Dryness/wetness climate variation based on standardized precipitation index in northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 847-857. (in Chinese))

[9] 冉津江,季明霞,黄建平,等.中国北方干旱区和半干旱区近60

- 年气候变化特征及成因分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 46-53. (RAN Jir jiang, JI Ming-xia, HUANG Jiarr ping, et al. Characteristics and factors of climate change in arid and semi-arid areas over northern China in the recent 60 years[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(1): 46-53. (in Chinese))
- [10] 王金红, 吕娟, 刘和平, 等. 1470-2008 年中国西北干旱地区旱涝变化特征分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 625-631. (WAN Jing-hong, LV Juan, LIU He ping, et al. Drought-flood variation characteristics and trends in arid northwestern China during 1470 to 2008[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 625-631. (in Chinese))
- [11] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65. (WANG Jir song, GUO Jiang yong, ZHOU Yue wu, et al. Progress and prospect on drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 60-65. (in Chinese))
- [12] 孙智辉, 雷延鹏, 曹雪梅, 等. 气象干旱精细化监测指数在陕西黄土高原的研究与应用[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 142-149. (SUN Zhi hui, LEI Yan peng, CAO Xue mei, et al. Study and application of prices index of meteorological drought to the loess plateau in Shanxi[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(1): 142-149. (in Chinese))
- [13] 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 川中丘陵区参考作物蒸发蒸腾量近 60 年变化成因研究[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 183-189. (ZHAO Lu, LIANG Chuan, CUI Ning bo, et al. Attribution analyses of ET0 change in hilly area of central Sichuan in recent 60 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 183-189. (in Chinese))
- [14] GB/T 20481-2006. 气象干旱等级[S]. GB/T 20481-2006. Classification of Meteorological Drought[S]. (in Chinese)
- [15] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿润指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 85-92. (WANG Mingtian, WANG Xiang, HUANG Wanhua, et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in southwest of China based on relative moisture index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19): 85-92. (in Chinese))
- (上接第 1030 页)
- [53] 高洋. WRF 模式对 2008 年 1 月我国南方冻雨极端天气过程的数值模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011. (GAO Yang. WRF simulations of the freezing weather in Jan 2008 over the southern China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2011)
- [54] Jimenez P A, Dudhia J. Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(2): 300-316.
- [55] 文小航, 廖小罕, 袁文平, 等. 中国东北半干旱区能量水分循环的同化模拟[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2014, 44(12): 2768-2784. (WEN Xiaohang, LIAO Xiaohan, YUAN Wenping, et al. Numerical simulation and data assimilation of the water-energy cycle over semiarid northeastern China[J]. Sci China Earth Sci, 2014, 44(12): 2768-2784. (in Chinese))
- [56] 崔琳琳, 胡松, 杨红, 等. 绿潮早期聚集期间天气过程分析[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 941-946. (CHUI Linlin, HU Song, YANG Hong, et al. Weather process analysis for the period during the early aggregation of green tide[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(6): 941-946. (in Chinese))
- [57] 侯爱中, 倪广恒, 丛振涛, 等. 耦合城市冠层模型对暴雨模拟精度的影响[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 31-35. (HOU Aizhong, NI Guangheng, CONG Zhengtao, et al. Impacts of coupling urban canopy model on storm simulation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 31-35. (in Chinese))
- [58] 朱坚, 杨涛, 黄丹青, 等. 基于 WRF-NoahLSM 耦合模型的江苏省淮北区土壤旱情评估[J]. 水电能源科学, 2014, 32(10): 10-13. (ZHU Jian, YANG Tao, HUANG Danqing, et al. Soil drought assessment of Huaibei regions in Jiangsu province based on WRF-NoahLSM coupled model[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(10): 10-13. (in Chinese))
- [59] 赵求东. WRF+DHSVM 融雪径流预报模式研究[D]. 新疆: 新疆大学, 2008. (ZHAO Quidong. The study of WRF+DHSVM snowmelt runoff forecasting model[D]. Xinjiang: Xinjiang University, 2008. (in Chinese))
- [60] 邱辉, 瞿丽. WRF 模型在山洪灾害预警预报中的试验应用[J]. 人民长江, 2013, 44(13): 5-9. (Qiu Hui, Qi Li. Trial application of WRF model in early warning and forecast of mountain torrent disaster[J]. Yangtze River, 2013, 44(13): 5-9. (in Chinese))
- [61] 郑子彦, 张万昌, 徐精文. 山区流域暴雨洪水的数值模拟[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 222-229. (ZHENG Ziyang, ZHANG Wan Chang, XU Jingwen. Numeric simulation of torrential rainfall and flash flood in a mountainous basin[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(2): 222-229. (in Chinese))
- [62] Warner J C, Armstrong B, He R, et al. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system[J]. Ocean Modeling, 2010, 35: 230-244.