

塔里木河流域干旱风险评估与区划*

孙鹏¹, 张强¹, 邓晓宇¹, 白云岗², 张江辉²

- (1. 中山大学水资源与环境系//广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室//华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘要: 选取不同尺度的标准化降水指数为危险度指标和9个干旱易损度指标建立塔河流域的干旱风险评估模型, 并分析了塔河流域干旱危险度、干旱易损性及干旱风险度的空间变化特征, 研究结果表明: 1) 塔河流域北部和西部地区的SPI3的干旱危险度高, 南部和东部地区干旱危险度低; 塔河流域中部和西北部地区SPI12的干旱危险度高。塔河流域西北部和西南部地区的干旱易损度高于其他地区, 其中西南部地区的干旱易损度最高。农业人口比重、总抚养比和因旱农业经济损失占GDP比重与干旱易损度的相关性最高。2) 塔河流域中部地区和西部地区的女性与男性比、人口密度、文盲率、抚养比、农业人口比重、灌溉面积比重大于其他地区; 中部地区和西部地区的粮食产量低于塔流域其他地区。3) 塔河流域西部的干旱风险等级是最高的, 其次塔河南部和西北部地区的干旱风险等级较高, 东北地区 and 东南地区的县市的干旱风险度较低。

关键词: 干旱危险度; 干旱易损性; 干旱风险评价; 塔里木河

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2014)03-0121-07

The Risk Evaluation and Division of the Tarim River Basin

SUN Peng¹, ZHANG Qiang¹, DENG Xiaoyu¹, BAI Yungang², ZHANG Jianghui²

- (1. Department of Water Resources and Environment // School of Geography and Planning, Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation // Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830049, China)

Abstract: A multi-index drought risk assessment model was developed to combine the strengths of standard precipitation index at different time steps for drought hazard index and composite drought vulnerability indices in the Tarim River Basin (TRB). The spatial-temporal patterns of drought hazard, drought vulnerability and drought risk are analyzed. The results indicate that: (1) Drought hazard is higher in northern and eastern TRB than other areas at 3 month step. It is high in central and northwestern parts at a 12-month time scale. Drought vulnerability index in northwestern and southwestern TRB is higher than other areas. Moreover, drought vulnerability is the highest in southwestern TRB. The correlation coefficients between drought vulnerability index and percentage of agricultural population, dependency ratio, percentage of agricultural economic loss are higher than other drought vulnerability indices. (2) The vulnerability indices including F , P , I , D , A and I in middle and western TRB are higher than indices in eastern and northern TRB, while F is opposite. (3) Droughts pose the highest risk to the western districts of the

* 收稿日期: 2013-09-17

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划(201331104), 国家自然科学基金(41071020), “中山大学博士研究生创新人才培养基金”联合资助项目

作者简介: 孙鹏(1986年生), 男, 研究方向: 区域水文循环与水资源演变, 通讯联系人: 张强; E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

TRB, while drought risk is the lowest in northeastern and southeastern TRB.

Key words: drought hazard; drought vulnerability; drought risk assessment; tarim river basin

干旱灾害是最复杂且又是被人们了解得最少的自然灾害,是造成经济损失最为严重的气象灾害,由于干旱灾害具有发生频率高、持续时间长和影响范围广特点、对环境及农业的危害非常大^[1-2]。塔里木河流域(下文简称塔河流域)地处欧亚大陆腹地,是世界上少数极端干旱气候区之一,干旱对塔河流域的经济建设、人民生活特别是对农业生产危害极大。据统计^[3-4],旱灾影响范围和旱灾成灾面积呈逐年增加趋势。塔河流域是中国重要的植棉基地、甜菜基地、重要特种果品生产基地、商品粮基地和能源基地^[5]。因此,正确客观地评估干旱对塔河农业的影响,准确有效的区划塔河流域农业干旱风险,具有十分重要的实践意义,为制定防灾减灾对策提供科学依据。

旱灾风险评价及其风险管理研究是水资源管理和灾害学领域的热点问题之一^[6-8],国内外的相关文献主要对旱灾风险特别是农业旱灾风险进行量化和评估,但是针对塔河流域干旱指标和干旱风险的研究甚少。以往的研究大多数比较重视致灾因子的风险度分析,对于承灾体易损性(即脆弱性)评价因子的分析过于薄弱,人类活动的抗灾减灾作用对干旱风险的影响并没有得到充分的考虑。基于此,本文选取标准化降水指数作为干旱危险度指标和人口密度、灌溉面积比重、粮食单产等 9 个干旱

易损度指标建立塔河流域的干旱风险评估。该研究为塔河地区抗灾减灾、农业生产规划和进行科学决策提供有价值的依据。

1 数据

本文所分析数据为塔河流域 21 个气象站 1960-2008 年的月降水量(图 1),数据由国家气象中心提供;另外还搜集 42 个县市 2010 年的人口、男性人口、女性人口、农业人口、文盲人口占 15 岁及以上人口比例、0-14 岁人口、15-59 岁人口、60 岁以上人口、耕地面积、有效灌溉面积、受旱面积、粮食产量、干旱造成农业直接经济损失、地区生产总值资料,此资料由塔木流域管理局和统计年鉴提供^[9-10]。降水量的部分数据缺测,缺测资料不超过样本的 1%,具有较好代表性,本文选取该数据的前后天的数据平均值作为该天的数据^[11]。

2 方法

风险是某一灾害发生的概率和期望损失的乘积,根据定义可以将风险评估分为危险度和易损性的乘积^[12]。与其他自然灾害风险相同,干旱风险主要受到实际干旱程度和承灾体容易受到干旱影响的程度共同决定的。因此,本文主要从干旱危险度和承灾体的易损度进行分析。

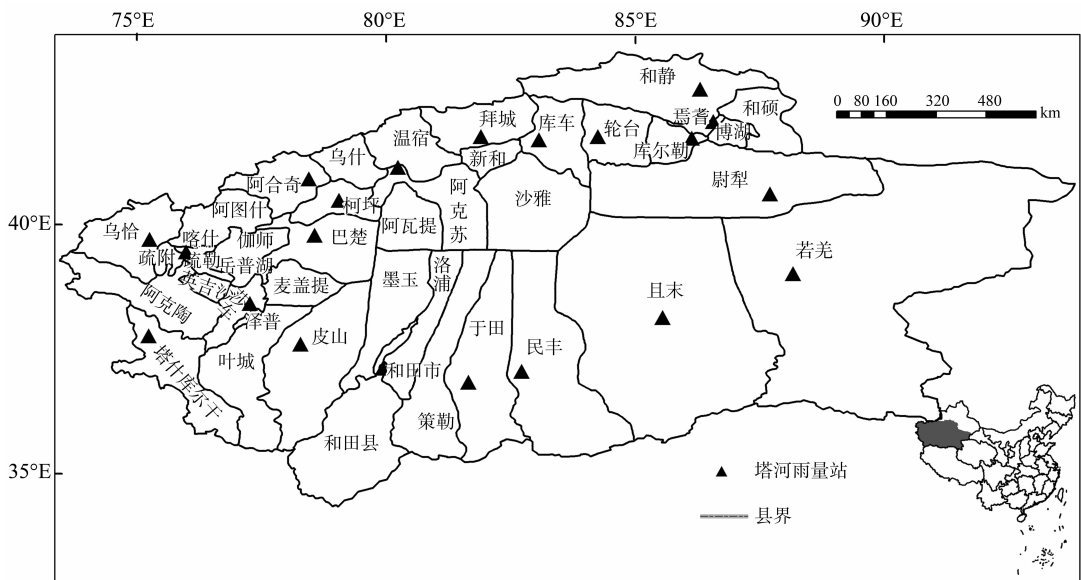


图 1 塔里木河流域气象站点位置示意图

Fig. 1 Location of the meteorological stations in the Tarim River Basin

2.1 干旱危险度评价

本文运用标准化降水指数来分析塔河流域干旱等级和干旱时空分布，标准降水指标由 Mc Kee 等在 1993 年提出^[13]，由于标准化降水指标具有资料获取容易，计算简单，能够在不同地方进行干旱程度对比等优点，因而得到广泛应用^[14]。标准化降水指标基于标准正态分布，因此不同等级标准化降水指数的干旱具有对应的理论发生概率，其等于特定干旱等级中标准化降水指数上下限值的标准正态分布累积概率之差。标准化降水指数值对应的干旱等级以及发生概率见表 1。

表 1 标准降水指标干旱等级

Table 1 Classification scales for SPI

标准降水指标	干旱等级	发生概率
(-1.0, 0]	轻度干旱	0.341
(-1.5, -1.0]	中度干旱	0.092
(-2.0, -1.5]	重度干旱	0.044
≤ -2.0	极端干旱	0.023

由于前期降水对于干旱有较大的影响，因而标准化降水指数考虑不同时间尺度的值，将不同时间尺度的前期降水纳入计算，考虑它们对水资源盈缺状况的影响。不同时间尺度的标准化降水指数具有不同的物理意义。时间尺度较短的标准化降水指数能一定程度反映短期土壤水分的变化，这对于农业生产是有重要意义的。短期干旱对于农业耕作具有很大的负面影响，能很好的揭示春旱、夏旱和秋旱对于塔河地区农业生产的影响。时间尺度较长的标准化降水指数能反映较长时间的径流量变化情况，对于水库管理有重要作用^[15]，为了全面反映塔河流域的干旱，本文选择时间尺度为 3 月和 12 月的标准化降水指数（简称为 SPI3 和 SPI12）对塔河流域的干旱危险度进行分析。

根据表 1 中标准化降水指数干旱等级划分标准，计算 3 个月尺度和 12 个月尺度的干旱等级实际发生的概率，同时赋予不同干旱等级权重系数，根据各个干旱等级的实际发生干旱的概率再细分为四个等级，具体见表 2。定义干旱危险度指数 (Drought Hazard Index) 为：

$$DHI = (L_r \times L_w) + (M_r \times M_w) + (S_r \times S_w) + (E_r \times E_w) \quad (1)$$

其中， L_r 表示轻度干旱的等级， L_w 表示轻度干旱的权重； M_r 表示中度干旱的等级， M_w 表示中度干旱的权重； S_r 表示重度干旱的等级， S_w 表示重度干旱的

权重； E_r 表示极端干旱的等级， E_w 表示极端干旱的权重。

表 2 干旱程度的权重和等级的划分

Table 2 Weights and ratings assigned to drought severity themes and features of the themes

干旱程度	权重	不同等级的实际发生概率			
		1	2	3	4
轻度	1	(0, 16.0]	(16.0, 18.0]	(18.0, 20.0]	(20.0, +∞)
中度	2	(0, 9.0]	(9.0, 10.0]	(10.0, 11.0]	(11.0, +∞)
重度	3	(0, 3.5]	(3.5, 4.5]	(4.5, 5.5]	(5.5, +∞)
极端	4	(0, 1.5]	(1.5, 2.0]	(2.0, 2.5]	(2.6, +∞)

2.2 干旱易损度评价

本文根据搜集的资料选取了 9 个易损度指标，运用 Natural breaks 方法分别将 9 个干旱易损度指标分为 4 个等级，Natural breaks 方法是按照数据固有的自然组别分类，使得类内差异最小，类间的差异最大，并得到广泛的应用^[15]。9 个干旱易损性指标中，粮食单产和灌溉面积比重数值越大，代表地区的农业生产力高，抗旱能力强，其干旱易损性的等级越低；其他 7 个指标的干旱易损性等级随着指标数值的增大而增大。在本文计算中为了保持一致性，将粮食产量和灌溉面积比重等级与指标数值反向排列，其他指标的等级与指标数值成正向排列。塔河流域综合干旱易损性的指标 (DVI) 的公式如下：

$$DVI = \frac{G_r + F_r + P_r + I_r + D_r + A_r + L_r + P_r + B_r}{9} \quad (2)$$

其中， G_r 表示因旱农业经济损失占 GDP 比重的干旱易损性等级； F_r 表示女性与男性比的易损性等级； P_r 表示人口密度的易损性等级； I_r 表示文盲率的易损性等级； D_r 表示抚养比的易损性等级； A_r 表示农业人口比重的易损性等级； L_r 表示灌溉面积比重的干旱易损性等级； P_r 表示粮食产量，即每 hm^2 耕地全年所生产的粮食数量的干旱易损性等级； B_r 表示干旱受灾率的易损性等级。

根据联合国 1991 年^[16]提出的风险表达式，塔河流域干旱风险评估 (DRI) 的表达式为：

$$DRI = DHI \times DVI \quad (3)$$

其中，DHI 表示各县市干旱危险度，DVI 表示各县市的干旱的易损度，如果某一地区没有干旱发生或者易损性极低，那该地区的干旱风险为 0。比如塔

河流域的沙漠和高山地区，特别是沙漠地区的干旱发生概率极高，但是该地区人类活动非常少，其易损性极低，这些地区的干旱风险为 0。因为并不是流域的每个县市都有相应的干旱危险度，县市没有干旱危险度的情况下，本文我们采用相近的气象站的干旱危险度为该县的干旱危险度。

3 结果与讨论

3.1 干旱危险度分析

由图 2a 知，塔河流域的西南部地区的轻度干旱发生的频率大于其他地区，干旱发生概率最高的地区集中在西南部地区；中度干旱发生频率高的地区主要分布在塔河流域的东北部，其他地区重度干旱发生频率低（图 2b）。重度干旱发生频率高的地区主要分布在塔河流域的中部地区和西北部小部分

地区（图 2c）；极端干旱发生频率较高的区域则分布在塔河流域的北部地区，其他地区重度干旱发生频率低（图 2d）。随着时间尺度的增大，SPI 的不同干旱等级发生干旱频率较高的区域面积也随着增大，塔河流域东部地区的 SPI12 轻度干旱发生频率高，塔河流域南部和西部轻度干旱发生频率低（图 3a）；与 SPI12 轻度干旱相比，SPI12 中度干旱发生频率高的地区则进一步扩大，主要分布在塔河流域东部、北部、西北部（图 3b）；SPI12 重度干旱发生频率高的区域由东部往西部转移，主要集中在北部和西部，干旱发生概率小的地区分布在南部地区，但是面积进一步缩小（图 3c）；SPI12 极端干旱发生概率最高的空间分布与 SPI12 其他等级干旱的空间分布相似，主要分布在南部、西部地区和东北的部分地区（图 3d）。

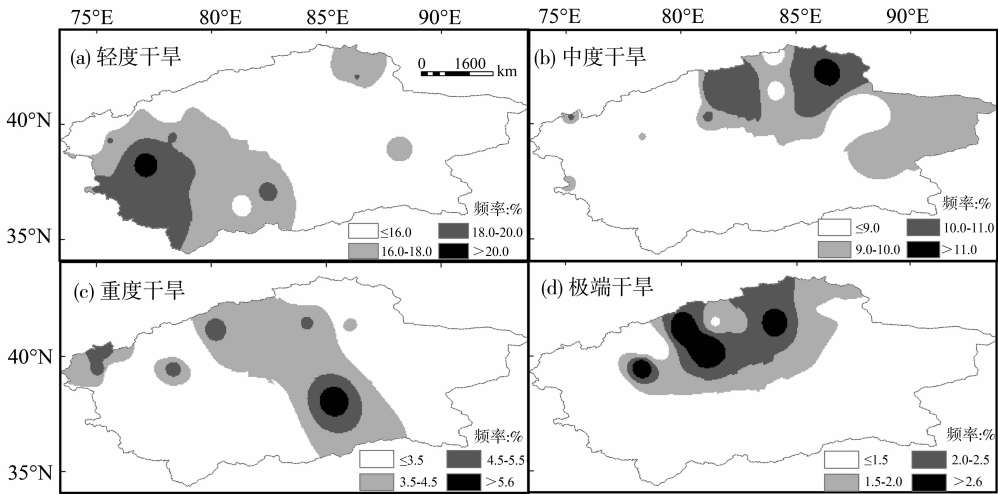


图 2 SPI3 的干旱等级时空分布图

Fig. 2 Spatial extent of SPI at 3 months times

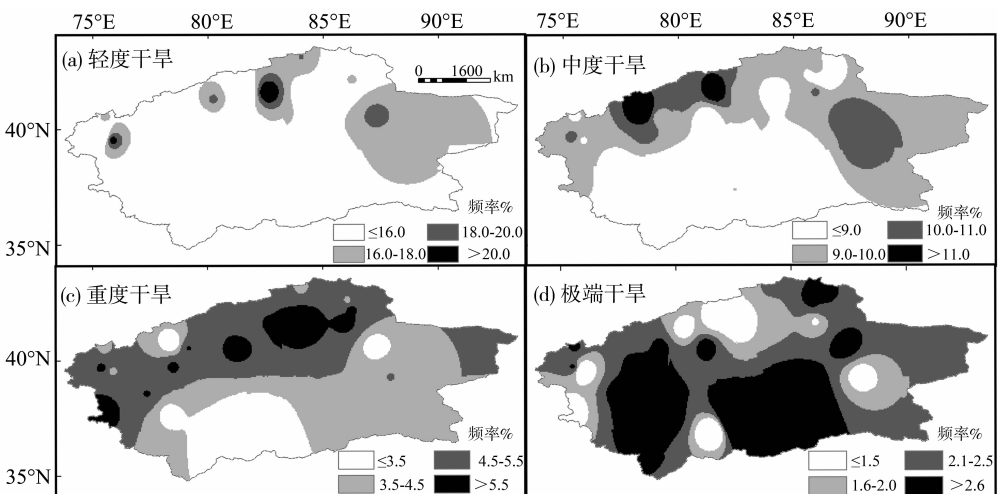


图 3 SPI12 的干旱等级时空分布图

Fig. 3 Spatial extent of SPI at 12 months times

根据公式 (2) 计算不同时间尺度的干旱危险度指数, 根据 Natural breaks 方法和反距离权重法对不同时间尺度的干旱危险度指数进行分级和空间插值, 结果见图 4。图 4 a 显示 SPI3 干旱发生频率最高和较高的区域主要分布北部 (天山南坡) 和西北部地区的, 南部和东部干旱发生的频率较低, 该结果与张强等研究南疆地区南部干旱历时和干旱强度轻微上升相一致^[17]。SPI12 干旱发生频率最高和较高的区域主要分布在中部和西南部地区, 东南部地区干旱发生频率较低 (图 4b)。

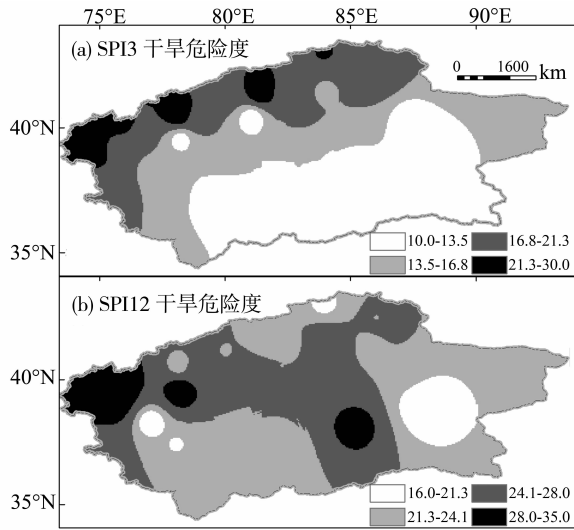


图 4 SPI3 和 SPI12 的干旱危险度区划图

Fig. 4 District level drought hazard maps at 3 months and 12 months times

3.2 干旱易损度分析

图 5 是社会经济易损度的空间分布图, 塔河西北部地区因旱农业经济损失百分比指标反映地区农业损失占整个地区 GDP 总量的百分比高, 东部和西南部地区较低 (图 5a)。从人的个体来看, 性别对易损度有一定影响。如妇女由于生理和心理上的原因, 在遭受自然灾害时比男子更容易受到伤害^[19]。西部地区 and 南部地区女性与男性的比率最高, 中西部地区其他县市的比率也较高 (图 5b)。人口密度高的区域主要集中在西北部地区和西南部地区, 东南部地区和南部地区人口密度较低。人口密度较高的地区主要集中在西北部地区和西南部地区 (图 5c)。文盲率是指: 文盲人口占 15 岁及以上人口百分比, 西北部地区和西南部地区的文盲率较高, 东北部的巴州地区文盲率最低 (图 5d)。抚养率越低, 为经济发展创造了有利的人口条件, 整个国家的经济呈高储蓄、高投资和高增长的局面。当抚养比下降时, 由于全社会用来抚养的压力减轻, 抵御灾害的能力大大提高。西南部的抚养比较高, 塔河东部的抚养比是最低的 (图 5e)。整体上, 塔河流域农业人口占总人口的百分比较高, 塔河流域西部和东北部地区农业人口比重相对较低, 中西部地区和南部地区的各县市农业人口占总人口的百分比都较高, 这也说明该地区主要以农业为主。农业人口占总人口的百分比较高的地区主要分布中部和西南部地区 (图 5f)。

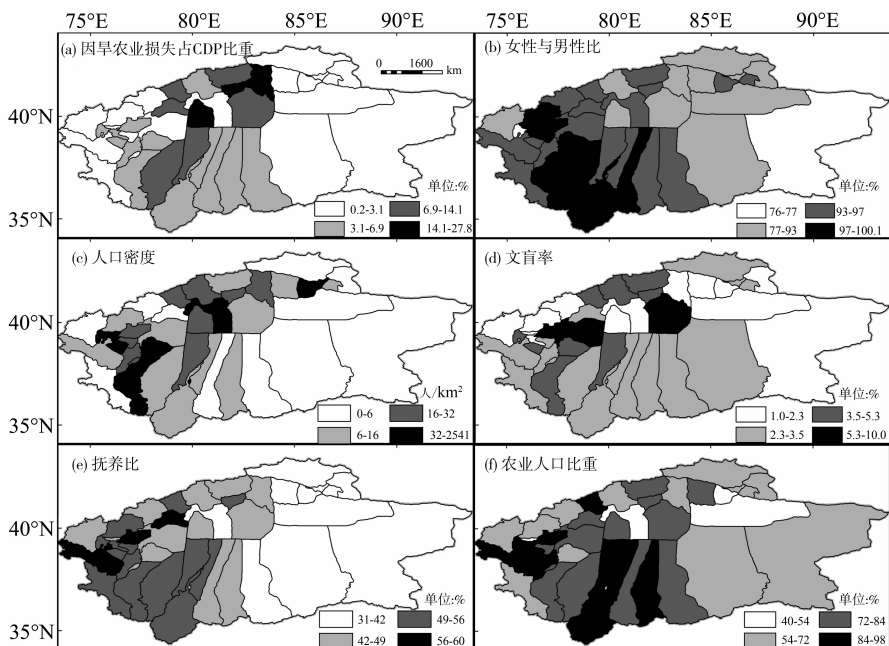


图 5 社会经济干旱易损度区划图

Fig. 5 District level maps of socio-economic drought vulnerability indicators

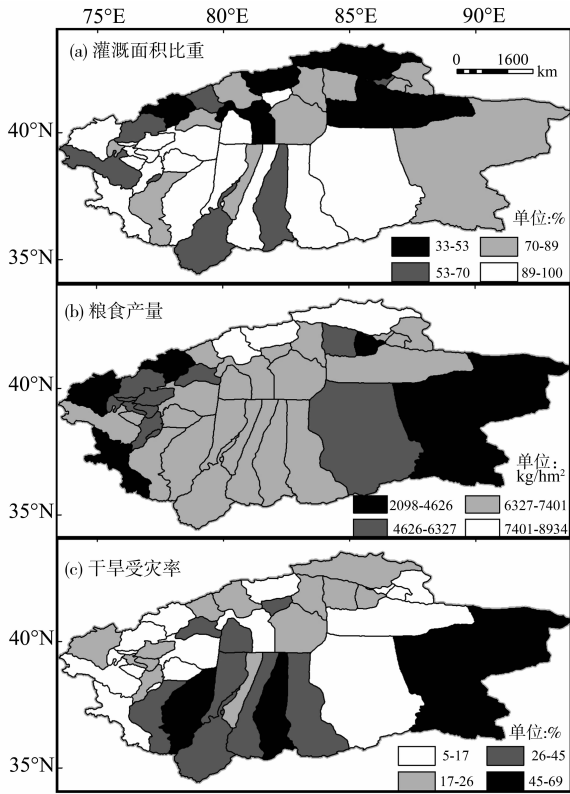


图 6 物质干旱易损度区划图

Fig. 6 District level maps of physical/structural drought vulnerability indicators

图 6a 显示塔河南部和西南部的各县市的灌溉面积比是最高的, 塔河北部地区灌溉面积比较低。有效灌溉面积对保障干旱区绿洲粮食生产与安全具有重要的意义^[20], 有效灌溉面积比重越高, 该地区的抗旱能力越强。同样, 单位面积粮食产量也反应了该地区的农业生产水平, 北部地区的单位面积的粮食产量最高, 其次是中部地区的各县市, 塔河东部地区粮食产量较低 (图 6b)。塔河西部和西南部地区的干旱受灾率是最高的, 北部和西南部地区的干旱受灾率较低 (图 6c)。

塔河流域区别于其他区域的一个最重要的特点是塔里木河流域的县级行政区划中包括山区、戈壁滩和沙漠等无人区, 无经济活动的区域则不存在旱灾易发问题, 因此塔河流域干旱易损度区划图应该按照县级行政区划中的绿洲范围进行绘制。由图 7 知: 干旱易损度特重的区域主要分布在塔河流域南部和西北部地区; 干旱易损度重度的区域主要分布在西南地区和中北部地区; 塔河流域中东部地区干旱易损度较低。图 8 是根据公式 (4) 计算的干旱风险图, 西北部的 SPI3 干旱风险等级主要重度和特重的, 塔河流域南部和东北地区的各县市的 SPI3 干旱等级在轻度和中度之间 (图 8a)。随着时

间尺度的增大, 轻度干旱风险和重度干旱风险的县市减少, 但是特重干旱风险的县市明显增加 (图 8b), 特重干旱风险的县市主要分布在塔河流域的西南部, 重度干旱风险主要分布在塔河流域的中部的县市, 塔河流域的东部和东北部地区主要是轻度干旱风险。

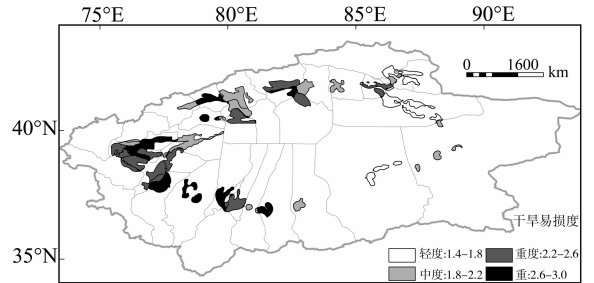


图 7 各县市综合干旱易损度图
Fig. 7 Composite drought vulnerability map of Tarim River Basin

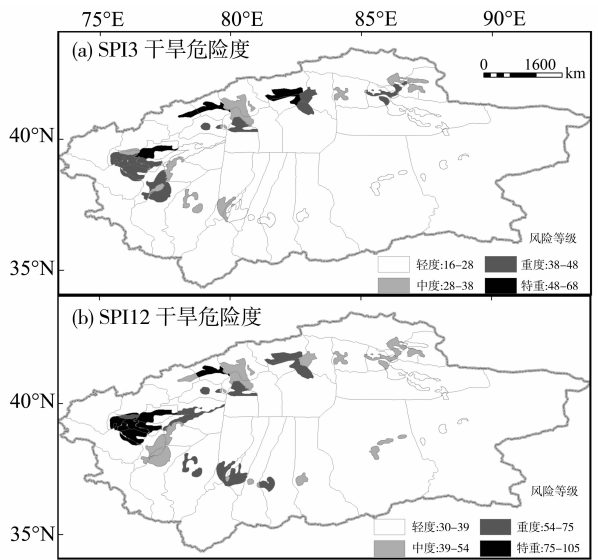


图 8 3 个月和 12 个月尺度干旱风险图
Fig. 8 Risk maps of droughts at 3 months and 12 months times

4 讨论和结论

综合分析不同时间尺度的干旱风险图可知, 塔河流域西部的各县市的干旱风险等级是最高的, 其次塔河南部西北部干旱风险等级较高, 塔河东北地区 and 东南地区的县市干旱风险度较低。干旱风险度与干旱危险度、干旱易损度分布具有一致性, 干旱风险度主要受干旱危险度的影响, 特别是干旱危险度最高的塔河流域西部和北部区域也是风险度高值区。通过分析各干旱易损度指标与干旱易损度的相关关系, 发现农业人口比重、总抚养比和因旱农业

经济损失占GDP比重标与干旱易损度的相关性高,女性与男性比、文盲率次之,该指标的高值区也是干旱风险度高的区域(图4e, f)。人口密度与干旱易损度的相关性最低,粮食产量与灌溉面积比重与干旱易损度成负相关性。因为新疆地区人口密度过低、人口过度分散,南疆2010年的人口密度是9.4人/km²,各地区人口密度过低造成相关性最低。尽管塔河流域西部和南部各县市的灌溉面积比重较高,但是塔河流域西部和南部地区有效灌溉面积因工程设施损坏报废、建设占地、机井报废而减少^[20],该地区的粮食产量低于塔河流域其他地区,农业生产力低于塔河流域其他地区,西部和南部地区的干旱易损度高于其他地区,塔河流域西部地区的不同尺度干旱危险度高于塔河流域南部地区的干旱危险度,因此塔河流域西部干旱风险等级高于塔河南部地区。

本文选取不同尺度的标准化降水指数为危险度指标和人口密度等9个干旱易损度指标建立塔河流域的干旱风险评估,并分析了塔河流域干旱危险度、干旱易损性及干旱风险度的空间变化特征,得到以下有意义的结论:

1) 塔河流域北部和西部地区的SPI3的干旱危险度高,南部和东部地区干旱危险度低;塔河流域中部和西北部地区SPI2的干旱危险度高。塔河流域西北和西南地区的干旱易损度高于其他地区,其中西南部地区的干旱易损度最高。农业人口比重、总抚养比和因旱农业经济损失占GDP比重与干旱易损度的相关性最高。

2) 塔河流域中部地区和西部地区的女性与男性比率、人口密度、文盲率、抚养比、农业人口比重、灌溉面积比重大于其他地区;中部地区和西部地区的面积粮食产量低于塔河流域其他地区。

3) 塔河流域西部的干旱风险等级是最高的,其次塔河南部和西北部地区的干旱风险等级较高,东北地区 and 东南地区的干旱风险度较低。

参考文献:

- [1] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. Wilhite D A. Drought: A Global Assessment. London & New York: Routledge, 2000:3-18.
- [2] SUN P, ZHANG Q, LU X X, et al. Changing properties of low flow of the Tarim River basin; Possible causes and implications [J]. Quaternary International, 2012, 282: 78-86.
- [3] 西北内陆河区水旱灾害编委会. 西北内陆河区水旱灾害[M]. 郑州:黄河水利出版社, 1999.
- [4] 白玉玺,徐德源. 新疆通志:10卷 气象志[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社, 1995.
- [5] 温克刚,史玉光. 中国气象灾害大典-新疆卷[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [6] 姜逢清,杨跃辉. 新疆洪旱灾害与大尺度气候强迫因子的联系[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2):148-153.
- [7] 陈亚宁,徐长春,杨余辉,等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1331-1441.
- [8] 吴东丽,王春乙,薛红喜,等. 华北地区冬小麦干旱风险区划[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 760-769.
- [9] 新疆维吾尔自治区人民政府人口普查领导小组办公室. 新疆维吾尔自治区2010年人口普查资料[M]. 北京:中国统计出版社, 2012.
- [10] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴2010[M]. 北京:中国统计出版社, 2010.
- [11] ZHANG Q, SINGH V P, LI J F et al. Spatio-temporal variations of precipitation extremes in Xinjiang, China [J]. Journal of Hydrology, 2012, 434-435: 7-18.
- [12] 黄崇福. 自然灾害风险评估-理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [13] McKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The Relationship of drought frequency and duration to time scales [C]//Paper presented at 8th conference on applied climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA, 1993.
- [14] 姚蕊,陈子繁. 基于标准降水指数的广西旱涝特征演变分析[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2013, 52(2):115-120.
- [15] SMITH R M. Comparing traditional methods for selecting class intervals on choropleth maps[J]. The Professional Geographer, 1986, 38(1): 1919-1924.
- [16] United Nations, Department of Humanitarian Affairs. Mitigating natural disasters: phenomena, effects and options a manual for policy makers and planning [M]. New York: United Nations, 1991:1-164.
- [17] ZHANG Q, LI J F, SINGH V P. Application of Archimedean Copulas in the analysis of the precipitation extremes: effects of precipitation changes [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 107(1/2): 255-264.
- [18] 李剑锋,张强,陈晓宏,等. 基于标准降水指标的新疆干旱特征演变[J]. 应用气象学报, 2012, 23(3): 322-330.
- [19] VAUGHAN M. The story of an African famine: gender and famine in twentieth century Malawi [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- [20] 杜晓梅,琪美格,瓦哈甫·哈力. 新疆有效灌溉面积动态变化[J]. 2008, 24(3): 284-288.