

山西省近 50 年地表干燥度变化趋势分析

郝振荣¹, 郭伟², 贺洁颖², 赵丽平², 宋宇杰²

(1. 山西省气象信息中心, 山西 太原 030006; 2. 山西省气象科学研究所, 山西 太原 030002)

摘要: 利用山西省 39 个气象站 1960—2010 年的气象资料, 结合地形特征, 将山西省分为 6 个气候敏感区, 采用潜在蒸散量和降水量的比值来计算干燥度指数, 在此基础上使用 IDW 插值法生成山西省干燥度的分布图, 并分析了近 50 a 山西省地表干燥度变化趋势。研究结果显示: (1) 山西省多年平均干燥度指数为 2.21, 属于半干旱区; 干燥度空间分布与气候、地形等因素密切相关, 南北差异显著。整体上山西省中北部地区较为干旱, 干燥度指数为 2.36, 东部南部则较为湿润, 干燥度指数为 1.93; 由于降水和蒸散都呈下降趋势, 因此, 近 50 a 山西省干燥度指数虽有所上升, 但变化幅度仅为 $0.04 \cdot 10a^{-1}$, 干旱化趋势并不显著; (2) 近 50 a 来, 除山西省北部地区干旱状况有所缓解外, 其它地区干旱状况均呈增加趋势; (3) 干燥度季节性差异显著, 冬春干燥异常, 夏秋则较为湿润。总体而言, 气候变暖虽未加剧山西省的干燥程度, 但暖干化趋势应引起足够的重视。

关键词: 干燥度指数; 潜在蒸散量; 降水量; IDW 插值法; 山西省

中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0244-06

The variation tendency of surface aridity index of Shanxi province in recent 50 years

HAO Zhen-rong¹, GUO Wei², HE Jie-ying², ZHAO Li-ping², SONG Yu-jie²

(1. Meteorological Information Center of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

2. Shanxi Meteorological Science Institute, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract: To investigate the variation tendency of surface aridity index from 1960—2010 in Shanxi province, the region was divided into six climatic zones based on the climatic data of 39 meteorological stations and topography. A ratio of potential – evapotranspiration to precipitation was employed as the aridity index and its distribution was further created through the IDW method. The results show that the area of Shanxi belonged to a semi-arid area and the average aridity index was 2.21. The spatial distribution of mean annual aridity index was closely related to climate, topography and other factors, whereas differed significantly from north to south. Generally speaking, northern and central regions of Shanxi province were relatively dry (the aridity index was 2.36), and southern and eastern regions were humid (the aridity index was 1.93). In recent 50 years, the slight increase in the aridity index (as little as $0.04 \cdot 10a^{-1}$) was attributed to reductions of both precipitation and potential – evapotranspiration, resulting in insignificant drought trend. It was further found that drought conditions had eased in the northern Shanxi, while became more severe in other areas. Additionally, drought conditions in Shanxi province varied in different seasons, humid in summer and fall and very dry in winter and spring. Therefore, it was concluded that climatic warming had not aggravated surface aridity in Shanxi province in recent 50 years. However, the climatic tendency of warming and drying should bring up enough attentions.

Keywords: aridity index; potential – evapotranspiration; precipitation; IDW method; Shanxi province

干旱是指水分的收支或供求不平衡而形成的水分短缺现象。干旱是最主要的气候灾害之一, 对我国农业、水资源及生态环境均有重要的影响^[1-3], 近些年来频繁出现、持续时间延长、影响范围不断扩大, 未来必将制约我国国民经济的发展^[4-5]。因此, 对于干旱问题的研究已经成为气候变化领域的热点问题。对于干旱程度量化有多种方法^[6], 如 Z 指数法^[7-8]、Palmer 干旱指数^[9], 或仅以降水量为指标,

收稿日期: 2014-05-23
基金项目: 山西省气象局领军人才课题(SXKJJDQ20120906); 山西省气象局课题(SXKYBNY20138717)
作者简介: 郝振荣(1980—), 男, 山西平遥县人, 工程师, 研究方向为应用气象。E-mail: woiwojia198208@163.com。

然而随着气候变化的加剧,这些指标难以客观全面地体现干旱特征。

地表干燥度指数是表征一个地区干湿程度的指标,用某一地区水分收支和热量平衡来表示,能较客观地反映某一地区的水热平衡状况^[10]。孟猛等^[11]通过对中外学者提出的 22 种干燥度指数进行对比分析后指出, Penman 公式法计算合理,精确度高,有较好的物理学意义,因此,在计算干燥度时,我国学者较多运用潜在蒸散量和降水量之比来表达^[12-13]。

山西省地处黄土高原干旱半干旱地区^[12],境内地形复杂,山地、丘陵、台地、平原、盆地等各种地形均有分布^[14],当东南季风携带的水汽到达黄土高原时已成强弩之末,导致该地区降水量少,加之千沟万壑的黄土地貌,大大降低了本就有限的降水利用率(不到 30%),同时,降水量在年内分布极不均匀,多集中在夏半年 4—9 月,并常以暴雨形式出现^[15],在地理位置、地貌和季风的共同作用下,降水量由东南向西北逐渐减少^[16]。地表径流大,水土流失严重,降水年内分布不均、年际变率大等特点,造成了这一地区干旱发生的频率高。

本文试图通过干燥度指数这一气候学指标,探讨山西省 1960—2010 年间地表干湿状况变化的时空特征,为山西省水利政策的制定、水资源利用及应

对气候变化提供参考。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

研究区域为山西省,研究时段为 1960—2010 年。气象资料来源于山西省气象信息中心,考虑到资料的完整性,选取山西省 39 个国家基本气象站,站点分布见图 1。气象资料包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、降水量、日照时数、相对湿度和风速。

根据水热状况、地理位置、地形地貌和下垫面分布的差异,将整个山西省分为 6 个气候敏感区域(见图 1),即山西省北部地区(Ⅰ区,年均气温 7.06℃,年降水量 392 mm,海拔 1 067 m)、西部吕梁地区(Ⅱ区,年均气温 8.88℃,年降水量 463.9 mm,海拔 1 003 m)、中部太原地区(Ⅲ区,年均气温 9.5℃,年降水量 418.3 mm,海拔 858 m)、中东部太行山西缘(Ⅳ区,年均气温 8.6℃,年降水量 505.8 mm,海拔 1 026 m)、晋东南区(Ⅴ区,年均气温 10.1℃,年降水量 544.3 mm,海拔 849 m)、晋南临汾运城地区(Ⅵ区,年均气温 13.1℃,年降水量 491.2 mm,海拔 431 m),各气候敏感区域内的旱涝异常具有相对一致的性质。

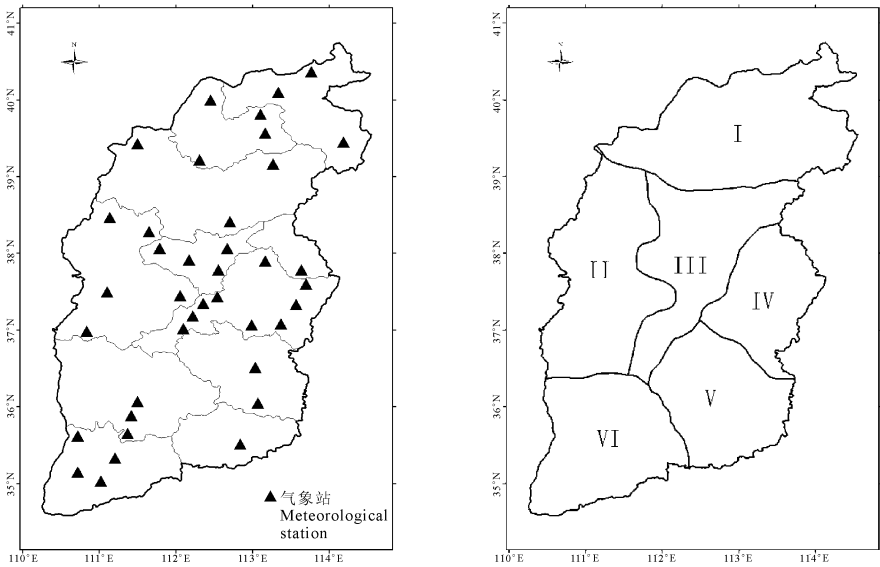


图 1 气象站点空间分布及分区示意图

Fig.1 The spatial distribution of meteorological stations and regional distribution in Shanxi province

1.2 计算方法

1.2.1 干燥度指数计算方法 本文采用水分盈亏和大气降水(潜在蒸散量和降水量)的比值来计算干

燥度指数^[6,9]。

$$AI = ET_0/P \tag{1}$$

式中, AI 为干燥度指数; ET_0 为潜在蒸散量(mm); P

为降水量(mm)。某一地区的干燥度指数值越大,表明该区气候越干燥;反之,干燥度值越小,则气候越湿润。

1.2.2 潜在蒸散量的计算 本文采用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式来计算潜在蒸散量^[17]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r\frac{900}{T + 273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + r(1 + 0.34U_2)}$$

(2)

式中, ET_0 为潜在蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压与空气温度关系曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 为地表净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为 2 m 高处日平均气温($^\circ\text{C}$); U_2 为地面以上 2 m 高处的风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); r 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。其中,地表净辐射可以通过计算净短波辐射和净长波辐射之差获得,土壤热通量、干湿表常数、地面以上 2 m 高处的气温、风速均可以通过基础气象数据计算得出,具体公式参见文献^[17-18]。

1.2.3 数据分析 见参考文献[19],引入气候趋势系数和气候倾向率来研究山西省不同地区干燥度变化特征,气候趋势系数值为正(负)时,表示该要素在所计算的 n 年内有线性 增(降)的趋势。分别按年和四季计算干燥度趋势系数和气候倾向率,季节划分是以 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月至翌年 2 月为冬季。

1.2.4 数据空间化 区域年潜在蒸散量和降水量估计以各站点计算结果为基础,利用 ArcGIS 软件的反距离加权法(IDW)进行空间插值,空间分辨率为 $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$,插值后各栅格的潜在蒸散量与降水量之比即为该栅格的干燥度指数^[20]。基于 IDW

法和 ArcGIS 的空间分析功能,绘制等值线图以进行空间分布特征分析。潜在蒸散、降水和干燥度指数的时间变化趋势采用区域平均值。

2 结果与分析

2.1 山西省干湿状况分布

从图 2 可以看出,整体上山西省呈现北旱南湿的现象,表明山西省南部地区地表湿润状况优于北部,根据山西省干燥度等值线分布图,全省平均干燥度指数为 2.21,根据相关文献干燥度 AI 值分布(1~1.7 为半湿润区,1.7~3.0 为半干旱区,3.0 以上为干旱区)^[11],因此,山西省属于半干旱区。

从图 1 插值结果显示,Ⅰ区和Ⅲ区较为干旱,其中山西省北部地区(Ⅰ区)多年平均干燥度在 2.3~2.9 之间,平均值为 2.55,中部太原盆地(Ⅲ区)多年平均干燥度在 2.2~2.5 之间,平均值为 2.39,这两个地区均为山西省干旱频发区。西部吕梁山区(Ⅱ区)多年平均干燥度在 1.8~2.3 之间,平均值为 2.13,中东部太行山西缘(Ⅳ区)1.7~2.2,平均值为 1.89,晋东南地区(Ⅴ区)多年平均干燥度在 1.7~1.9 之间,平均值为 1.8,晋南地区(Ⅵ区)多年平均干燥度在 2.0~2.3 之间,平均值为 2.09,这四个地区虽也处于半干旱区,然而总体干燥度指数较小,甚至Ⅳ区和Ⅴ区已经接近湿润区的标准。

2.2 地形对干燥度的影响

表 1 给出了地形对干燥度的影响,一般来说,随着海拔高度的增加,由于地形作用对气流的影响,降水和降水日数都会增加,本文的结果也显示:同一纬度海拔较高的地区更加湿润。如Ⅱ区和Ⅳ区较Ⅲ区更为湿润,Ⅴ区比Ⅵ区更加湿润。

表 1 海拔对干燥度的影响

Table 1 The effects of topography and elevation on aridity indexes

项目 Item	山西北部 Northern Shanxi		山西中部 Central Shanxi		山西南部 Southern Shanxi	
分区 Regional distribution	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
海拔 Elevation/m	1067	1003	858	1026	849	431
干燥度指数 Aridity index	2.55	2.13	2.39	1.89	1.8	2.09

2.3 山西省 1960—2010 年干燥度及相关气象因素的变化趋势

图 3 给出了 1960 年到 2010 年山西省干燥度、潜在蒸散量、降水量、光照、风速和温度的变化趋势。从图 3A 可以看出,山西省近 50 年来干燥度逐渐升高,但趋势并不显著。从图 3B 和图 3C 可以看出,山西省

1960—2010 年潜在蒸散量和降水量均显著下降,但降水量下降的趋势更加显著,因此造成了山西省域干燥度的上升,但变化幅度仅为 $0.04 \cdot 10\text{a}^{-1}$,干旱化趋势并不显著。如果单一用降水量的标准来衡量山西省近 50 a 干湿变化情况,无疑是干旱化趋势明显,但运用干燥度指数表示时,显示的结果却缓和得多。

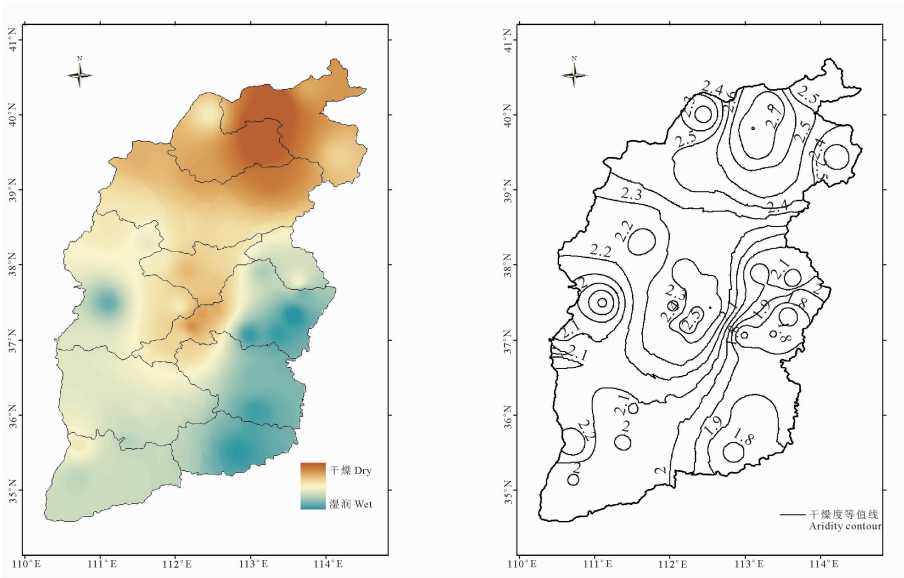


图 2 山西省干燥度空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of aridity index in Shanxi province

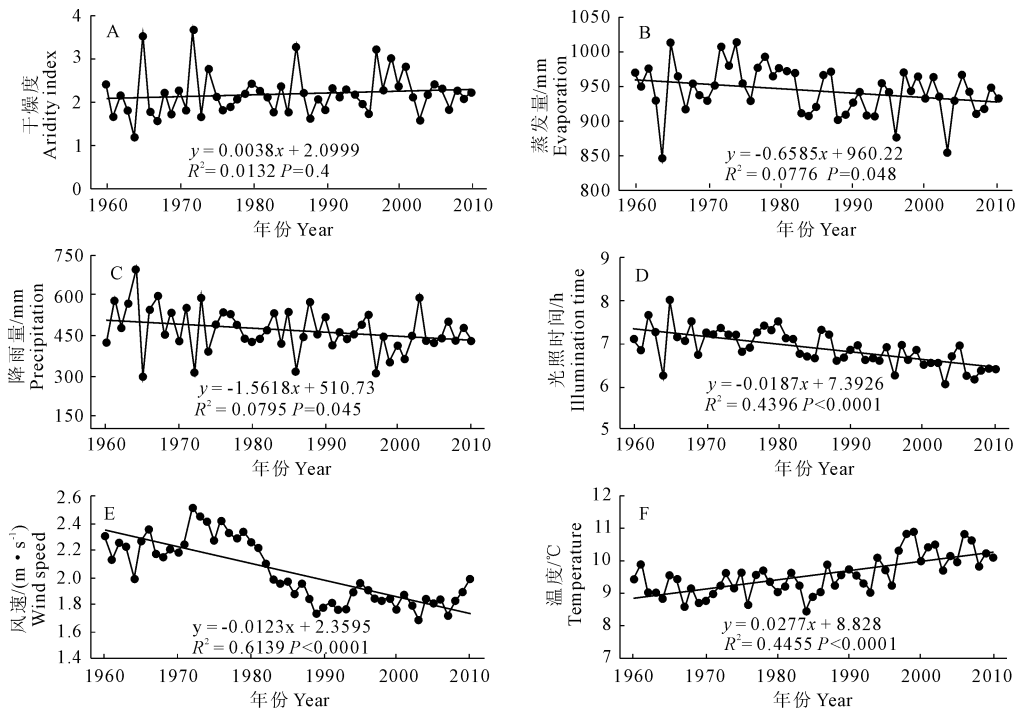


图 3 山西省 51 a 干燥度及气候变化趋势

Fig.3 Temporal changes of annual average aridity indexes and climate in 51 years of Shanxi province

据相关研究表明,潜在蒸散量与气象因子密切相关^[18,21],本研究分析了山西省 1960—2010 年光照(图 3D)、风速(图 3E)和温度(图 3F)的变化趋势,结果表明,山西省近 50 a 年日均光照时间、平均风速均呈显著下降趋势,气温呈显著上升趋势。虽然气温上升会使陆面蒸发加剧,但是风速的减少和日照时间的下降均使得陆面蒸发减少,因此,气候变化对潜在蒸散量产生的负效应更加显著。山西省地表干燥度增加以及气温上升,表明山西省地表总体有

暖干化的趋势,在气候变暖的大背景下,山西省的暖干化趋势可能会更加显著。

2.4 山西省年平均降水蒸散差

图 4 为山西省近 50 a 来降水蒸散差变化趋势,从图中可以看出,降水蒸散差逐渐下降,即水分短缺逐渐上升,5 a 滑动平均曲线表现地更加明显。山西省降水蒸散差的变化范围为 - 720 mm ~ - 183 mm,降水蒸散差的平均值为 - 465 mm,整体来说,山西省缺水严重,且干湿年际变率较大。

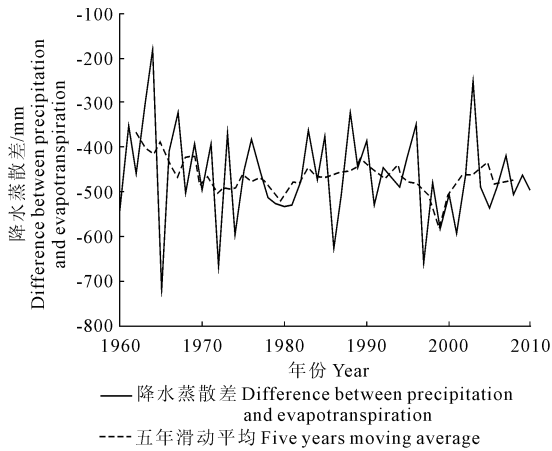


图 4 山西省近 50 a 降水蒸散差变化趋势
Fig.4 Trend of differences between precipitation and evapotranspiration in recent 50 years in Shanxi province

2.5 山西省不同地区干燥度年际变化

为了研究山西省不同气候类型区干燥度变化趋势,根据温度、降水量及地形地理因素将山西省分为 6 个地区进行研究(见图 1)。尽管山西省整体上干燥度有上升趋势,但是在不同地区变化趋势却有不同。表 2 给出了山西省不同地区干燥度变化趋势,其中,仅山西省北部地区(I 区)干燥度有下降趋势,其它地区干燥度均呈上升趋势。尽管 I 区有湿润倾向,然而气候变化仍未从根本上改变该地区干旱少雨的状况,同时由于该地区工业建设和环境不合理开发造成水土流失等,山西省北部地区生态环境仍然堪忧。地表干燥度上升的五个地区中晋南地区(Ⅵ区)变化幅度最大,气候倾向率 $0.069\cdot10a^{-1}$ 。晋南地区是山西省小麦主产区,近年来气温升高,降雨减少趋势较为明显,气候变化对该地区农业生产会有一定的影响^[22]。

表 2 山西省不同地区干燥度的变化
Table 2 The variation of aridity index in different regions of Shanxi Province

分区 Regional distribution	气候趋势系数 Climatic trend coefficient	气候倾向率/ $10a^{-1}$ Climate trend rate
I	-0.24	-0.034
II	0.15	0.02
III	0.15	0.024
IV	0.38	0.045
V	0.16	0.018
VI	0.57	0.069

2.6 山西省不同地区干燥度季节特征

山西省干燥度年内分布极不均匀,总体上冬春季非常干燥,夏秋季较为湿润。山西省四季不同地区干燥度指数取区域平均值,并且用 Duncan 多重比较法对显著性差异的结果进行了分析(图 5)。

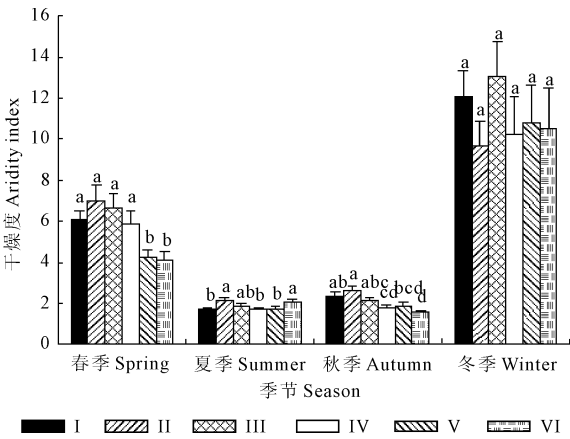


图 5 山西省不同地区四季干燥度特征
Fig.5 The average seasonal aridity indexes in different areas of Shanxi province

山西省春季干燥度分为两个水平,山西省中北部地区平均干燥度在 6.0 以上,山西省南部地区平均干燥度也达 4.0 左右,山西素来有“十年九旱”之说,而春旱又发生在作物播种出苗的关键时期,因此,春旱对山西省农作物有显著影响^[23]。

山西省夏季较为湿润,南北地区都比较平均,其中 I 区、Ⅲ区、Ⅳ区、Ⅴ区平均干燥度较低均值为 1.7,而Ⅱ区、Ⅵ区干燥度较高均值为 2.0。I 区为山西省平均干燥度最高的地区,但夏季干燥度较低,一方面由于此区位于山西省北部地区,夏季气温偏低、蒸散较少,另一方面也说明该地区降雨多集中于夏季。总体来说,山西省夏季雨多而湿润。

山西省秋季也较为湿润,但不同地区仍有区别,干燥度由南向北逐渐减小,主要原因在于秋季山西省降水量由南向北逐渐减小。

冬季,无论南北均较为干旱,其中干旱程度与山西省平均干旱状况分布规律相似, I 区和Ⅲ区较为干旱,干燥度达到 12 和 13,其它地区干燥度平均值为 10.3,表明冬季干燥度对山西省全年干燥度水平有较大影响。

2.7 山西省不同地区季节干燥度的变化

表 3 给出了山西省不同区四季干燥度变化趋势。春季山西省中北部地区(I 区~Ⅳ区)干燥度均呈下降趋势,气候倾向率最大的地区位于山西省中西部吕梁山区,气候倾向率 $-0.44\cdot10a^{-1}$;山西省南部地区(Ⅴ区和Ⅵ区)干燥度呈增加趋势,其中晋南地区变化较为显著。

夏秋季几乎全部地区干燥度均呈上升趋势,夏季仅晋东南地区(Ⅴ区)、秋季仅山西北部地区(I 区)有下降趋势,气候倾向率分别为 $-0.01\cdot10a^{-1}$ 和 $-0.11\cdot10a^{-1}$ 。尽管夏秋季节干燥度变化的气候倾向率较小,然而,较为湿润的夏秋季节干燥度上升的

趋势也应该引起一定警惕和重视。冬季干燥度变化趋势不一,山西省南部地区(V区和Ⅵ区)干燥度有下降趋势,气候倾向率分别为 $-2.2\cdot 10a^{-1}$ 和 $-1.6\cdot 10a^{-1}$,冬季干旱的缓解在一定程度上有利于

南部地区冬小麦的播种。山西省中部地区(Ⅱ区和Ⅲ区)干燥度有上升趋势,但气候倾向率较低,Ⅲ区南部地区有冬小麦种植,会对此有一定的影响。

表 3 山西省不同地区不同季节干燥度的变化趋势

Table 3 Variation tendency of average seasonal aridity indexes in different areas of Shanxi province

分区 Regional distribution	气候趋势系数 Climatic trend coefficient				气候倾向率 Climate trend rate/ $10a^{-1}$			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
I	-0.17	0.09	-0.14	-0.01	-0.4	0.03	-0.11	-0.99
Ⅱ	-0.15	0.04	0.04	0.04	-0.44	0.02	0.03	0.26
Ⅲ	-0.09	0.03	0.06	0.02	-0.28	0.02	0.05	0.13
Ⅳ	-0.04	0.15	0.15	-0.13	-0.15	0.07	0.15	-0.69
V	0.07	-0.02	0.18	-0.3	0.11	-0.01	0.21	-2.2
Ⅵ	0.13	0.05	0.18	-2.1	0.26	0.03	0.1	-1.6

3 结 论

1) 在全球气候变暖的背景下,山西省近年来气温普遍升高,降水量减少,干旱事件频发,全省平均干燥度指数为 2.2,属于半干旱区。山西省多年平均干燥度空间分布与气候、地形等因素密切相关,南北差异显著,整体上山西省中北部地区较为干旱,干燥度指数为 2.36,东部、南部则较为湿润,干燥度指数为 1.93;由于降水和蒸散都不同程度的减少,近 50 a 山西省干燥度指数虽有所上升,但变化幅度仅为 $0.04\cdot 10a^{-1}$,干旱化趋势并不明显。另一方面,山西省降水蒸散差逐渐下降,缺水显著上升,降水蒸散差的平均值为 -465 mm ,且干湿年际变率较大。

2) 山西省不同地区干燥度变化有所差异,山西北部地区干燥度有下降的趋势,其它地区干燥度均呈上升趋势。

3) 山西省不同季节干燥度差异极大,夏秋季节较为湿润,冬春季节非常干旱,春旱的发生可能对山西省农作物有显著影响。山西省北部地区春季干燥度呈上升趋势,南部地区呈下降趋势;夏秋季节干燥度基本呈现上升趋势,而冬春季节干燥度趋势变化不一。

总体而言,气候变暖虽未加剧山西省的干燥程度,但暖干化趋势应引起足够的重视。

参 考 文 献:

[1] 刘德祥,董安祥,陆登荣.中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):195-201.

[2] 徐贵青,魏文寿.新疆气候变化及其对生态环境的影响[J].干旱区地理,2004,27(1):14-18.

[3] 刘德祥,董安祥,邓振镛.中国西北地区气候变暖对农业的影响[J].自然资源学报,2005,20(1):119-125.

[4] 黄荣辉,徐予红,周连童.我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势[J].高原气象,1999,18(4):465-476.

[5] 李新周,刘晓东,马柱国.近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J].干旱区研究,2004,21(2):97-103.

[6] 王密侠,马成军,蔡焕杰.农业干旱指标研究与进展[J].干旱地区农业研究,1998,16(3):119-124.

[7] 杨晓华,杨小利.基于 Z 指数的陇东黄土高原干旱特征分析[J].干旱地区农业研究,2010,23(2):248-253.

[8] 周晋红,李丽平,秦爱民.山西气象干旱指标的确定及干旱气候变化研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):240-247.

[9] 冯永忠,刘志超,刘 强,等.黄土高原旱作农区气候干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):218-223.

[10] 王亚平,黄 耀,张 稳.中国东北三省 1960—2005 年地表干燥度变化趋势[J].地球科学进展,2008,23(6):619-627.

[11] 孟 猛,倪 健,张治国.地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J].植物生态学报,2004,28(6):853-861.

[12] 詹志明,彭云秀,王凯胜.黄土高原干旱指数分析[J].地域研究与开发,1999,18(2):25-27.

[13] 杨彬云,吴荣军,关福来.基于潜在蒸散和干燥度指数的河北省农业气候区划[J].干旱地区农业研究,2009,27(6):241-246.

[14] 武永利,张洪涛,田国珍,等.复杂地形下山西高原太阳潜在总辐射时空分布特征[J].气象,2009,35(5):74-82.

[15] 李智才,刘秀红,郭慕萍,等.山西省主汛期降水的特征研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(11):43-49.

[16] 王立祥,王龙昌.中国旱区农业[M].南京:江苏科学技术出版社,2009:58-59.

[17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998,300(6541):1-15.

[18] 史建国,严昌荣,何文清,等.黄河流域潜在蒸散量时空格局变化分析[J].干旱区研究,2007,24(6):773-778.

[19] 施 能,陈家其.中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J].气象学报,1995,53(4):431-439.

[20] 姜晓剑,刘小军,黄 芬,等.逐日气象要素空间插值方法的比较[J].应用生态学报,2010,21(3):624-630.

[21] 高 歌,陈德亮,任国玉,等.1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J].地理研究,2006,25(3):378-387.

[22] 张建平,赵艳霞,王春乙,等.气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响[J].应用生态学报,2006,17(7):1179-1184.

[23] 钱锦霞,王振华,郝玉峰.山西省春季气候变化及其对农业生产的影响[J].干旱区研究,2008,25(1):64-69.