

基于干燥指数的近 45 年云南滇中地区 干湿状况的变化特征

曹言, 王杰, 黄英, 张雷, 戚娜

(云南省水利水电科学研究院, 昆明 650228)

摘要: 基于 1970—2014 年云南省滇中地区 9 个气象站点的气象数据, 以 Penman-Monteith 公式为基础计算干燥指数, 结合 M-K 检验法和 5 a 滑动平均法, 分析了滇中地区干湿状况的时空变化规律。结果表明: (1) 滇中地区实际蒸散量与潜在蒸散量呈显著正相关关系, 说明 Penman-Monteith 公式计算的潜在蒸散量适合滇中地区; (2) 滇中地区干燥指数多年平均值为 1.55, 属于半干旱区, 近 45 年干燥指数整体呈上升趋势, 上升幅度约为 0.063/10 a, 春季干燥指数呈减小趋势, 减小幅度约为 0.025/10 a, 夏季、秋季和冬季均干燥指数呈上升趋势, 其中秋季呈现显著上升趋势, 上升幅度依次为 0.024/10 a, 0.111/10 a, 0.476/10 a, M-K 检验结果表明干燥指数发生突变的时间主要集中在 20 世纪 70 年代中前期和 2009 年左右; (3) 滇中干燥指数受降水影响最为显著, 整体上呈中间高, 东西低的分布特征, 冬季最干, 春季较秋季干, 夏季最湿; (4) 在年尺度上变干趋势由中西部向东部越来越明显, 春季变湿趋势由东部向中西部越来越明显, 夏季变干趋势由中间向东西部越来越明显, 秋季变干趋势由西北向东南越来越明显, 冬季变润区主要分布在中部、东北部和东南部, 变干区主要分布在西北部。

关键词: 干燥指数; 干湿状况; 滇中地区; 时空分布; 变化趋势

中图分类号: P468.0

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0243-07

Variation Characteristics of Dry-Wet Conditions in Central Yunnan in Recent 45 Years Based on Dry Index

CAO Yan, WANG Jie, HUANG Ying, ZHANG Lei, QI Na

(Yunnan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Kunming 650228, China)

Abstract: Based on the meteorological data of 9 stations in central Yunnan from 1970 to 2014, the dry index was estimated using the FAO Penman-Monteith formula, and the temporal and spatial variation characteristics of dry-wet conditions in central Yunnan were analyzed by Mann-Kendall test and 5-year moving average method. The result showed that there was a significant positive correlation between the actual evapotranspiration and the potential evapotranspiration in central Yunnan. The results also showed that: (1) the potential evapotranspiration calculated by Penman-Monteith formula was suitable for central Yunnan Province; (2) the annual average value of dry index was 1.55, the overall dry index had increased with an increasing rate of 0.063/decade from 1970 to 2014, the dry index had decreased with a decreasing rate of 0.025/decade in spring, the dry index had increased with an increasing rate of 0.024/decade, 0.111/decade and 0.476/decade in summer, autumn and winter, respectively, which indicated the significant upward trend in autumn, the abrupt change of dry index happened in 2009 and around 1970s; (3) the dry index was most affected by precipitation in central Yunnan, the main space characteristics of dry index was high in central and low in east and west, the maximum value of dry index appeared in winter, and the value of dry index in spring was higher than that in autumn, the minimum value of dry index occurred in summer; (4) at the annual scale,

收稿日期: 2017-03-06

修回日期: 2017-03-20

资助项目: 云南省社会发展科技计划项目(2012CA021); 水利部公益性行业科研专项经费项目(20140126); 云南省科技计划项目(2015BB019); 云南省省级分成水资源费项目(201203); 云南省水利科技计划项目“元谋干热河谷山地农业节水技术应用与示范”(201509); 云南省省级水资源费项目“区域、重要水行业单位用水效率、定额、作物需水基础性专题研究”(201604)

第一作者: 曹言(1987—), 男, 陕西户县人, 工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 359851137@qq.com

通信作者: 王杰(1979—), 男, 甘肃静宁人, 高级工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wangjie@lzb. an. cn

the dry trend was more and more obvious from the midwest to the east, the wet trend was more and more obvious from the east to the midwest in spring, the dry trend was more and more obvious from the middle to the east and the west in summer, the dry trend was more and more obvious from northwest to southeast in autumn, the wetweed areas mainly distributed in the central region, northeast and southeast, the drying area mainly distributed in the northwest in winter.

Keywords: dry index; dry-wet conditions; central Yunnan; spatial and temporal distribution; variation trend

气候变化导致地表干湿状况发生变化,从而对区域农业生产产生重要的影响。随着全球气候变暖,干旱及洪涝等极端气候发生频率越来越高^[1]。旱灾是云南省主要的自然灾害,2009 年以来云南省连续 5 a 遭遇严重旱灾,给工农业带来严重的损失。因此正确认识区域气候干湿变化特征具有重要的现实意义。目前国内外对干湿程度进行量化分析的方法主要包括:单因子的干旱指标^[2]、多因子的干旱指标^[3-7]和综合干旱指数^[8-11]。其中干燥指数是最为常见的干湿指标,其不仅考虑到气温、风速、水汽和太阳辐射等热量因素,同时还考虑到水分因素,而该方法的核心是潜在蒸散量的计算,P-M 公式因考虑的气象因子较多,比较适合中国气候复杂、气候因子多变的特点,因此相较于其他方法 P-M 公式更符合中国的实际情况^[12]。

滇中地区由于其独特的自然地理和气候条件,成为云南省粮食产量水平最高的区域^[13],但其属于资源性和水质性缺水并存的严重缺水地区,加之近年来连续干旱,水资源供需矛盾越发突出。基于多因子干旱指标的滇中地区干湿变化特征的研究还相对很少,已有的研究也主要集中在单因子的干旱指标(如降水、气温等)或基于 Thorn-thwaite 经验公式计算的 SPEI 指数方面^[14-17],如牛凯杰等^[14]利用西南 5 省 40 个气象站 1960—2010 年逐月降水资料,基于 SPI 分析得到了云南省春、夏季呈变湿趋势,秋、冬季呈变干趋势;刘杨梅等^[15]根据滇中地区 43 气象站 1960—2010 年降水资料,基于 SPI 得到滇中自 2000 年以后干旱呈加剧趋势,且滇中中部的昆明、呈贡等地发生严重干旱频次较高;高瑞等^[16]根据滇中地区及周边 54 个气象站 1971—2011 年的气象资料,基于 SPEI 分析得到滇中呈旱化趋势,且存在 6 a, 11 a 的周期变化特征;徐晓芝等^[17]通过滇中 1960—2011 年 13 个气象站逐年的降水数据,分析得到滇中地区降水呈减少趋势。本文在前人的基础上,通过计算滇中地区 9 个气象站 1970—2014 年的干燥指数,采用 M-K 法和 5 a 滑动平均法等,分析滇中地区不同时间尺度上干湿状况的时空变化规律,从而为本区域水资源优化配

置、确定地区干湿等级标准以及农业旱涝预警监测提供重要参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

采用中国气象科学数据共享服务网提供的 1970—2014 年云南省滇中地区 9 个气象站点逐日的最高气温和最低气温、降水量、相对湿度、日照时数和风速,此外还包括有各站点的经纬度和海拔数据,其气象站点具体分布如图 1 所示。在数据选择过程中选用的站点需要尽量没有数据缺少,并对各站点数据进行一致性检验和质量控制。

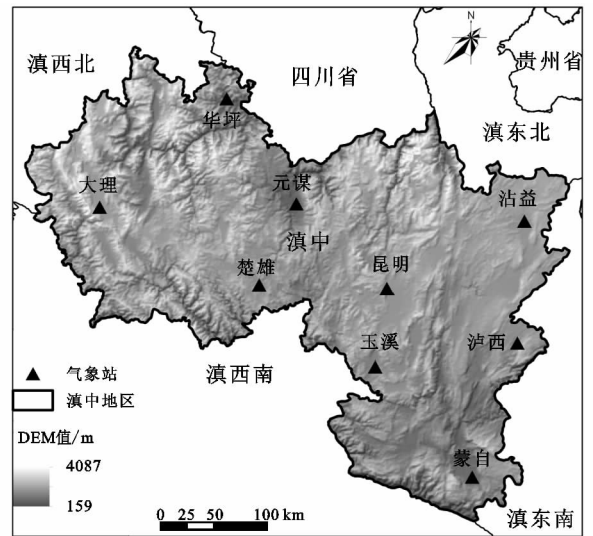


图 1 滇中地区气象站点分布

1.2 研究方法

1.2.1 潜在蒸散量 (ET_0) 根据世界粮农组织 (FAO) 1998 年修正的 Penman-Monteith^[18] 公式计算潜在蒸散量 ET_0 。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 是参考作物蒸发蒸腾量 (mm/d); Δ 是饱和水汽压与温度曲线的斜率 (kPa/°C); R_n 是作物冠层表面的净辐射 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; G 是土壤热通量 [$MJ/(m^2 \cdot d)$], 在逐日估算时取 $G=0$; T 是日平均气温 (°C), 按最高气温 (T_{max}) 和最低气温 (T_{min}) 的算

术平均值计算; u_2 是 2 m 高度处的风速(m/s); e_a 是饱和水汽压(kPa); e_d 是实际水汽压(kPa); γ 是干湿表常数(kPa/℃)。

1.2.2 干燥指数 干燥指数较为普遍的计算方法为潜在蒸散量与降水量之比^[7,19]。

$$H=ET_0/P$$
 (2)

式中: H 表示干燥指数; ET_0 表示潜在蒸散量(mm); P 表示降水量(mm)。干燥指数值越大说明气候越干旱,反之则越湿润。其中干燥指数年均值 $H<1.0$ 的地区为湿润地区, H 介于 1.0~1.5 为半湿润区, H 介于 1.5~4.0 为半干旱区,而 $H>4.0$ 时为干旱区^[19]。本文通过计算云南各站点干燥指数,采用 Mann-Kendal 检验法^[20],并结合线性趋势和 5 a 滑动平均法对干燥指数长期的序列进行趋势分析和突变分析。

2 结果与分析

2.1 潜在蒸散量和实际蒸发量的比较分析

通过 P-M 公式计算得到 1970—2014 年各站的逐年潜在蒸散量(ET_0),将其与实测蒸发皿的蒸发量数据(E601 蒸发量)进行对比分析。结果发现(表 1),滇中地区除昆明和大理站 ET_0 与实际蒸发量的相关系数较低,且未通过 99% 的显著检验外,而其余 7 个站点相关性较高,且均通过 99% 的显著检验,其

中蒙自站相关系数最高,达到 0.820。通过滇中地区 9 个站点 405 个样本的情况可以看出,潜在蒸散量与 E601 蒸发皿的水面蒸发量的相关系数达到 0.812,且通过 99% 的显著检验,不仅高于全国其他地区彭曼公式计算的精度^[21],也与云南省彭曼公式计算的精度基本一致^[22],说明彭曼公式计算的潜在蒸散量适合滇中地区,能够代表该地区作物的蒸发潜力。

2.2 ET_0 降水对干燥指数的影响分析

统计昆明、楚雄、玉溪、元谋等 9 个站点的逐月 ET_0 ,降水和干燥指数,分析 ET_0 ,降水对干燥指数影响(图 2)。结果表明, ET_0 最小值主要出现在雨季后的两个月,即 12 月,最大值主要出现在雨季(5—10 月)前一个月,即 4 月;降水最小值主要出现在 2 月或 12 月,最大值主要出现在 7 月;干燥指数最小值主要出现在 7 月,最大值主要出现在 2 月或 3 月。由此可以看出,降水对干燥指数影响最为显著,滇中中西部的元谋、楚雄、大理和华坪站降水与干燥指数呈相反的变化趋势,即降水越多,干燥指数越小,地区越湿润,反之则越干旱,滇中东部的泸西、沾益蒙自等站雨季干燥指数受降水影响显著,而在旱(11 月—次年 4 月)干燥指数受 ET_0 影响显著,两者呈相同的变化趋势,即 ET_0 越大,干燥指数越大,地区则越干旱。说明干燥指数能够很好地反映降水与潜在蒸散发的变化情况,能够较好反映地区干湿变化情况。

表 1 滇中实际蒸发量与潜在蒸散量的相关系数

	滇中	昆明	楚雄	大理	元谋	蒙自	华坪	泸西	沾益	玉溪
相关系数	0.812*	0.207	0.477*	0.251	0.774*	0.820*	0.429*	0.579*	0.480*	0.566*

注: * 表示通过置信度为 99% 的显著检验, $n=405$ 。

2.3 干燥指数的时间变化特征

通过计算滇中各站点干燥指数值,采用 M-K 法、5 a 滑动平均法和线性趋势分析干燥指数在不同时间尺度上的变化特征。从图 3 可见,1970—2014 年滇中地区干燥指数呈上升趋势($Z=1.3857$),上升幅度约为 0.063/10 a,其多年平均值为 1.55,整体属于半干旱区,最小值出现在 2001 年,仅为 1.13,最大值出现在 2011 年,达到 2.23。从 5 a 滑动平均曲线可见,1995—2004 年干燥指数相对较小,平均值仅为 1.31,属于半湿润区,2007—2014 年干燥指数相对较大,平均值达到 1.84,属于半干旱区。而在季节变化趋势上,春季干燥指数呈减小趋势($Z=-0.1719$),减小幅度约为 0.025/10 a,夏季、秋季和冬季均干燥指数均呈上升趋势($Z=0.6979$, $Z=2.2353$ 和 $Z=0.3140$),其中秋季呈显著上升趋势,上升幅度依次为 0.024/10 a,0.111/10 a,0.476/10 a。从 5 a 滑动平均曲线可见,四季节干燥指数相对较小的时段分

别出现在 1993—2008 年、1995—2005 年、1986—1995 年和 1988—2006 年,其平均值分别为 2.93,0.57,1.09,8.12,干燥指数相对较大的时段分别出现在 1977—1982 年、2007—2013 年、2007—2012 年和 2007—2013 年,其平均值分别为 5.25,0.82,1.83,19.53。由此可以看出,滇中地区整体呈变干的趋势,春季呈变湿趋势,夏季、秋季和冬季呈变干趋势,这与滇中地区降水的变化趋势基本一致^[23],较湿润的时段主要集中在 1993—2006 年,较干旱的时段主要集中在 2007—2013 年,不仅与其他干旱指标的研究成果基本一致^[15-16,24-26],也与云南省自 2009 年以来连续五年大旱的现状相一致^[27]。

为准确分析滇中不同时间段干燥指数的变化特征,对年和季干燥指数进行突变分析(图 4),结果表明,干燥指数年平均值的 UB 和 UF 两条曲线在临界值 $y=+1.96$ (显著水平 0.05)之间存在多个交点,结合 5 a 滑动平均曲线,干燥指数年平均值突变的年份

可能发生在1972年、1977年、1979年、2009年,其中1970—1997年呈上升趋势,1998—2008年呈减少趋势,2009年以后则呈快速上升趋势。春季、夏季和冬季干燥指数在UB和UF两条曲线在临界值 $y = +1.96$ (显著水平0.05)之间存在多个交点,结合5a滑动平均曲线,干燥指数突变年份可能发生在1973年、1977年和1986年,1972年、1975年、1981年和

2009年,1972年和2009年,而秋季干燥指数在UB和UF两条曲线在临界值 $y = +1.96$ (显著水平0.05)之间存在1个交点,可能发生突变的年份为2008年。从突变时间上看,滇中干燥指数突变发生的时间主要集中在20世纪70年代中前期和2009年左右,也与云南省降水量在年尺度上存在准6a和准18a的变化周期相一致^[28]。

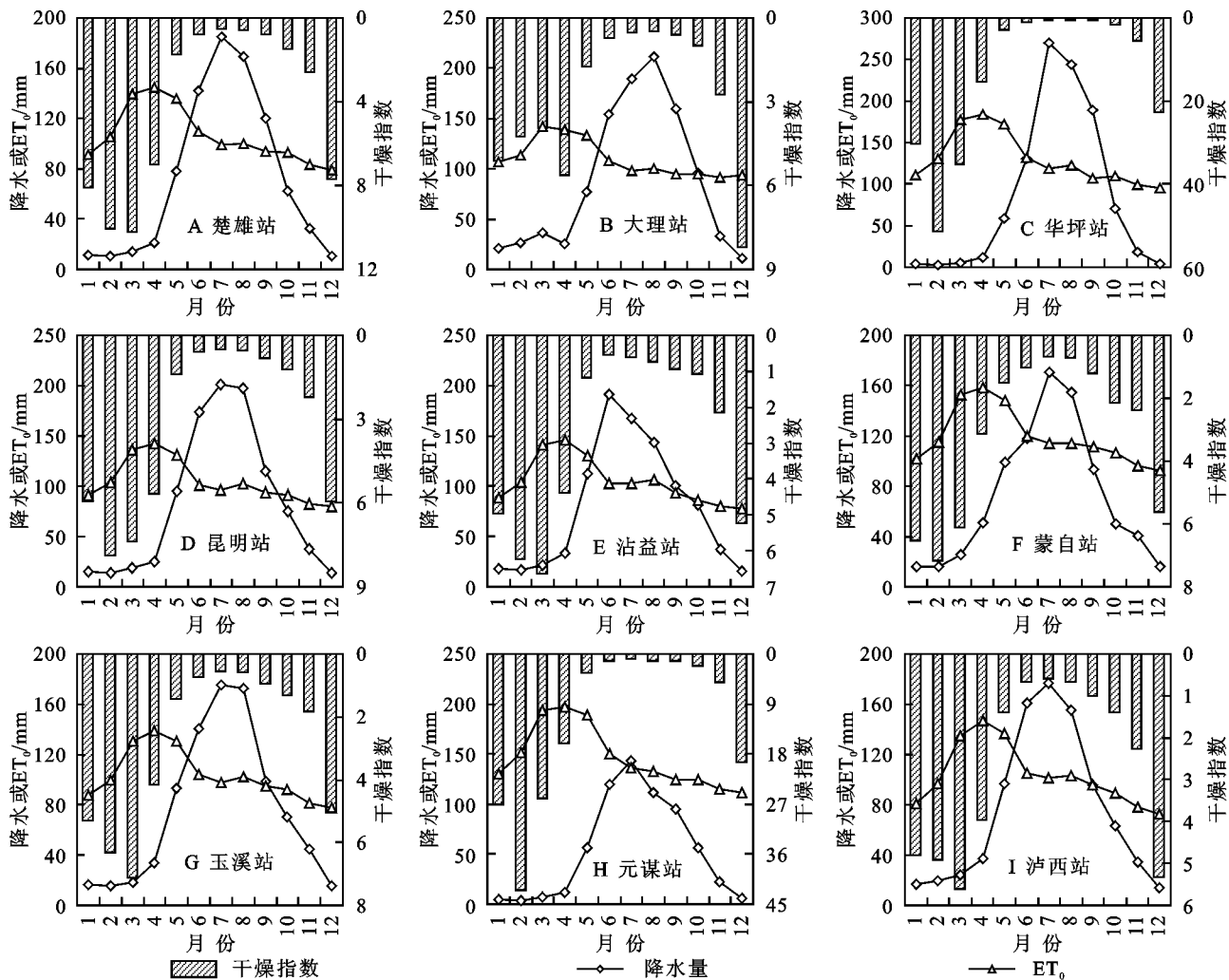


图2 降水、 ET_0 与干燥指数的响应关系

2.4 干燥指数的空间变化特征

2.4.1 干燥指数空间分布特征 从滇中地区干燥指数的空间分布(图5)可知,年平均干燥指数整体呈现出中间高,东西低的分布特征。其中大理、昆明、沾益、泸西和玉溪站干燥指数年平均值均小于1.5,均属于半湿润地区,大理站干燥指数最低,仅为1.31,而华坪、楚雄、蒙自和元谋站干燥指数年平均值均大于1.5,均属于半干旱地区,元谋站干燥指数最大,达到2.83。

在季节尺度上,春季干燥指数整体呈现出由东南向西北递增的分布特征,其中东南部沾益、泸西和蒙自站干燥指数相对较小,仅为3.00,3.03,3.23,而西

北部的华坪站最大,达到17.44。夏季、秋季和冬季干燥指数均呈现出中间高,东西低的分布特征,其中夏季干燥指数最小值出现在华坪站,仅为0.58,最大值出现在元谋站,达到1.15;秋季干燥指数最小值出现在大理站,仅为1.2,最大值出现在元谋站,达到1.15;冬季泸西和大理站干燥指数相对较低,仅为8.93,9.06,元谋和华坪站干燥指数相对较大,达到600.90,208.13。综上可知,在不同时间尺度上,滇中干燥指数基本上表现出中间高,东西低的分布特征,其主要由于滇中部偏西干热河谷地区降水少,且 ET_0 大,而东西部山区和平坝地区,降水相对较多,且 ET_0 小^[23,29]。

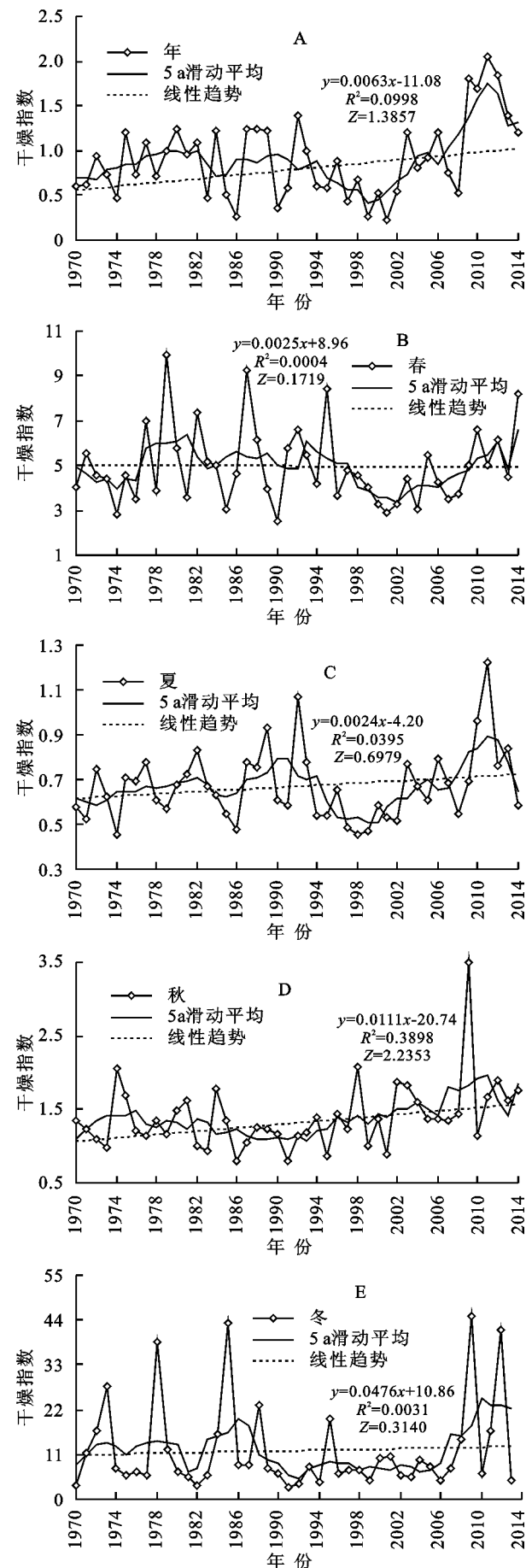


图3 滇中干燥指数的年际变化

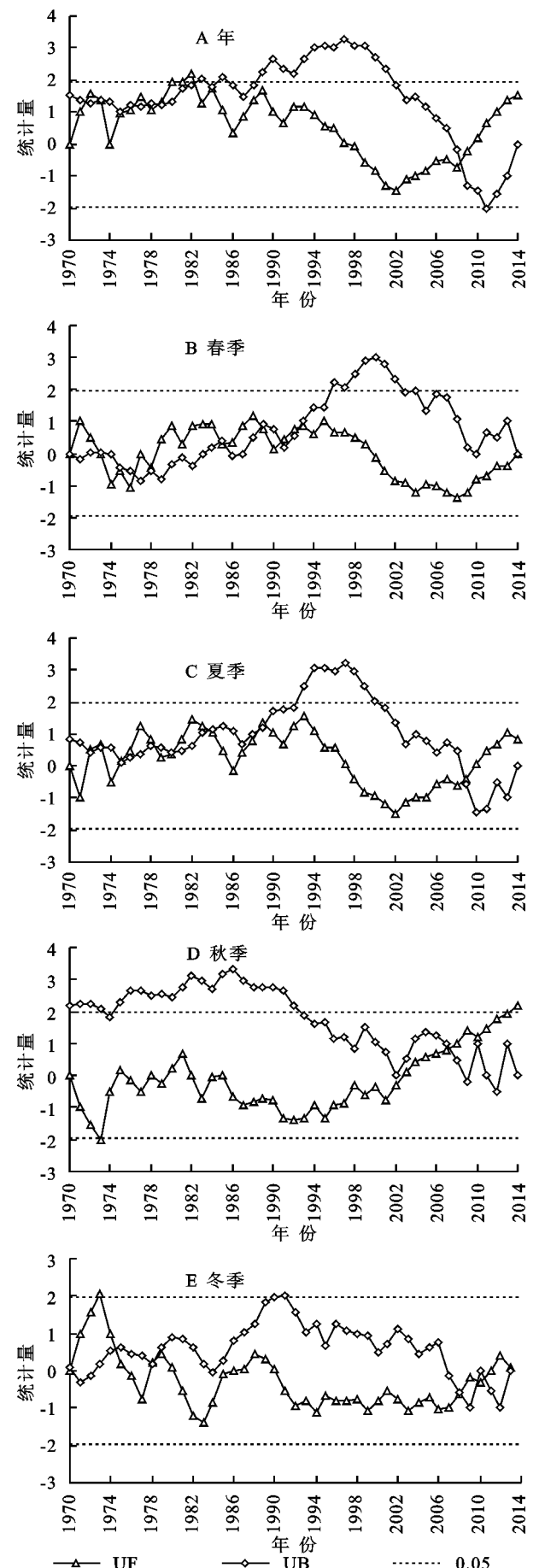


图4 滇中干燥指数的 M-K 突变检验

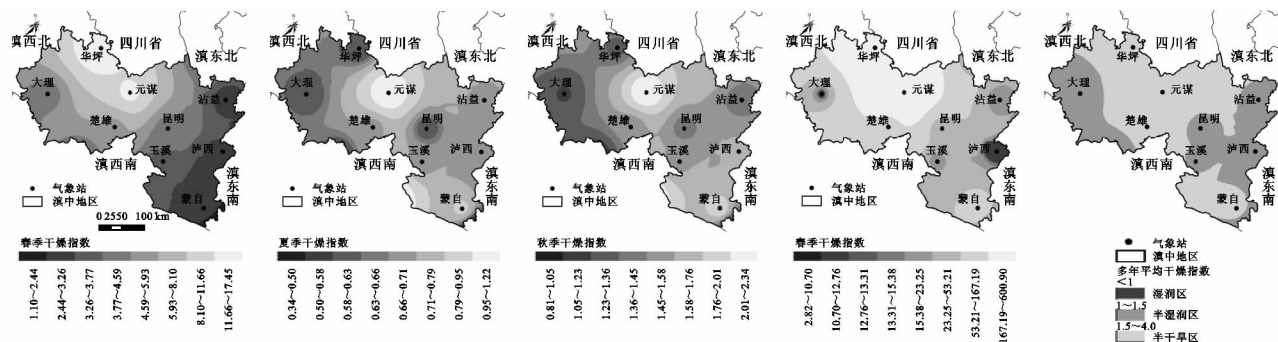


图 5 滇中地区干燥指数的空间分布

2.4.2 干燥指数空间变化趋势 根据 M-K 法计算各站点干燥指数的变化倾斜度 β , 分析干燥指数在空间上的变化趋势(图 6), 结果表明滇中地区干燥指数上升趋势由中西部向东部越来越明显, 其中有 8 个站点呈上升趋势, 沾益、泸西、昆明和玉溪 4 个站点呈显著上升趋势, 其上升幅度分别为 0.097/10 a, 0.093/10 a, 0.083/10 a, 0.063/10 a, 仅元谋站呈减少趋势, 减少幅度为 0.092/10 a。

在季节尺度上, 春季干燥指数减少趋势由东部向中西部越来越明显, 其中元谋、华坪、大理、蒙自、楚雄和玉溪 6 个站点干燥指数呈减少趋势, 元谋站呈较显著减少趋势, 其减少幅度达到 1.489/10 a, 泸西、昆明和沾益呈上升趋势, 沾益站上升幅度最大, 达到 0.

133/10 a。夏季干燥指数上升趋势由中部向东西部越来越明显, 其中昆明、沾益和蒙自等 8 个站点呈上升趋势, 沾益站上升幅度最大, 达到 0.042/10 a, 仅楚雄站呈减少趋势, 其减少幅度为 0.002/10 a。秋季干燥指数上升趋势由西北向东南越来越明显, 其中泸西站呈显著上升趋势, 蒙自、大理和昆明站呈较显著上升趋势, 蒙自站上升幅度最大, 达到 0.172/10 a, 华坪站上升幅度最小, 仅为 0.022/10 a。冬季干燥指数减小区主要分布在中部、东北部和东南部, 上升区主要分布在西北部, 其中元谋、蒙自、沾益和大理站呈减少趋势, 元谋站减少幅度最大, 达到 0.437/10 a, 玉溪、昆明、泸西、楚雄和华坪站呈上升趋势, 华坪站上升幅度最大, 达到 0.979/10 a。

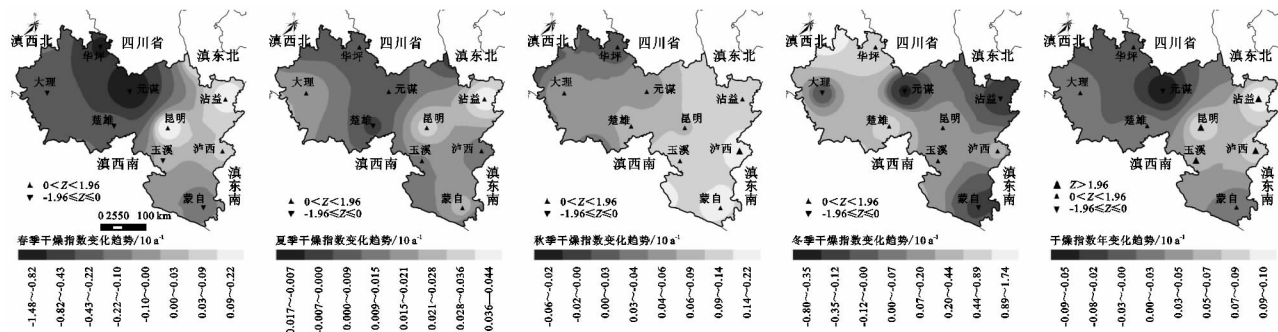


图 6 滇中地区干燥指数的空间变化趋势

3 结论

(1) 滇中地区实际蒸散量与潜在蒸散量呈正相关关系, 相关系数达到 0.812, 且通过 99% 的显著检验, 说明彭曼公式计算的潜在蒸散量适合滇中地区, 能够代表该地区作物的蒸发潜力。

(2) 滇中中西部干燥指数全年受降水影响最为显著, 而滇中东部干燥指数雨季受降水影响显著, 旱季则受 ET₀ 影响显著, 说明干燥指数能够很好地反映出滇中地区降水与潜在蒸散发的变化情况。

(3) 在时间上, 1970—2014 年滇中地区年平均干燥指数为 1.13~2.23, 整体呈上升趋势, 其上升幅度约为 0.063/10 a, 整体上属于半干旱区; 春季干燥

指数呈减小趋势, 减小幅度约为 0.025/10 a, 夏季、秋季和冬季均干燥指数均呈上升趋势, 其中秋季呈现显著上升趋势, 上升幅度依次为 0.024/10 a, 0.111/10 a, 0.476/10 a, 较湿润的时段主要集中在 1993—2006 年, 较干旱的时段主要集中在 2007—2013 年。而 M-K 突变检验结果表明干燥指数突变发生的时间主要集中在 20 世纪 70 年代中前期和 2009 年左右。

(4) 在空间上, 滇中地区呈中部干旱, 东西部湿润的分布特征。年尺度上变干趋势由中西部向东部越来越明显; 春季变湿趋势由东部向中西部越来越明显; 夏季变干趋势由中间向两侧越来越明显, 秋季变干趋势由西北向东南越来越明显, 冬季变湿区主要分布在中部、东北部和东南部, 变干区主要分布在西北部。

本研究采用的干燥指数能够较为准确的反映出降水和潜在蒸散量的变化情况,分析得到了滇中地区不同时间尺度下的干湿变化特征,不仅能够补充滇中地区干湿状况的理论研究,也为地区农业生产灌溉的科学管理、干旱监测和评估提供一定的科学依据。但 Penman-Monteith 公式在一些区域还存在一定的误差,如昆明和大理站 ET₀。与实际蒸发量的相关系数较低,且未通过显著检验,可能会造成部分地区干燥指数与实际的干湿状况存在一定的偏差,因此需进一步探讨干燥指数变化的原因,同时不断优化 Penman-Monteith 公式,从而更加客观准确的反映出滇中干湿状况演变的特征。

参考文献:

- [1] 龚志强,支蓉,封国林,等.中国近530年干湿变化及其持续性特征研究[J].气象学报,2009,67(2):307-320.
- [2] 曹言,王杰,张鹏,等.基于TRMM降水数据的云南干旱分析[J].安徽农学科学,2016,44(24):195-200.
- [3] 李淑萍,侯威,封泰晨.近52年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿变化及其环流演变分析[J].大气科学,2015,39(5):885-900.
- [4] 徐羽,许有鹏,吴艳飞,等.近50年重庆市气象干旱时空分布特征研究[J].水土保持研究,2016,23(6):363-368.
- [5] 任菊章,黄中艳,郑建萌.基于相对湿润度指数的云南干旱气候变化特征[J].中国农业气象,2014,35(5):567-574.
- [6] 王允,刘普幸,曹立国,等.基于湿润指数的1960—2011年中国西南地区地表干湿变化特征[J].自然资源学报,2014,29(5):831-838.
- [7] 刘赛艳,王义民,刘登峰,等.青藏高原大通河流域气候干湿状况时空分布研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):108-114.
- [8] 张利利,周俊菊,张恒玮,等.基于SPI的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J].生态学报,2017,37(3):2-12.
- [9] 李军,王兆礼,黄泽勤,等.基于SPEI的西南农业区气象干旱时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2016,25(7):1142-1149.
- [10] 廖捷.基于Z指数的若尔盖湿地干湿变化研究[J].长春师范学院学报:自然科学版,2013,32(1):83-86.
- [11] 史津梅,唐红玉,许俊俊,等.1959—2003年青海省干湿变化分析[J].气候变化研究进展,2007,3(6):356-361.
- [12] 安莉娟.1971—2010年内蒙古干湿变化特征及对水资源影响[J].冰川冻土,2016,38(3):732-740.
- [13] 黄忠艳.滇中地区作物生长旺季农业气候变化研究[J].西南农业学报,2010,23(3):665-669.
- [14] 牛凯杰,梁川,赵璐,等.西南地区干旱时空变化特征[J].灌溉排水学报,2014,33(3):1-6.
- [15] 刘杨梅,黄英,王杰.云南省滇中地区气象干旱特征分析[J].安徽农业科学,2012,40(18):9799-9801.
- [16] 高瑞,王龙,雷腾云,等.滇中干旱时空分布及其演变规律研究[J].灌溉排水学报,2015,34(6):95-98.
- [17] 徐巧芝,郭汝军,丁文荣.滇中地区降水特征与变化趋势研究[J].水土保持研究,2013,20(5):155-159.
- [18] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].地理科学,2011,66(5):579-588.
- [19] 郑红星,刘静.东北地区近40年干燥指数变化趋势及其气候敏感性[J].地理研究,2011,30(10):1765-1774.
- [20] Hamed K H. Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data[J]. Journal of Hydrology, 2009,365(1):86-94.
- [21] 胡珊珊,张涛.白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散量变化分析[J].南水北调与水利科技,2016,14(1):67-71.
- [22] 黄忠艳,朱勇.基于水分平衡的云南干湿气候评价指标的研究[J].高原气象,2009,28(6):1414-1421.
- [23] 李小雁,史正涛,彭海英.滇中地区极端降水时空变化趋势及其成因分析[J].节水灌溉,2010(6):26-29.
- [24] 张雷,王杰,黄英,等.1961—2010年云南省基于SPEI的干旱变化特征分析[J].气象与环境学报,2015,31(5):141-146.
- [25] 王佳津,孟耀斌,张朝,等.云南省Palmer旱度模式的建立:2010年干旱灾害特征分析[J].自然灾害学报,2012,21(1):190-197.
- [26] 纪智荣,黄中艳,谢国清.1961—2010年云南干湿气候变化[J].气象科技,2013,41(6):1043-1079.
- [27] 谭顺萍,吴巩固,李丽,等.1961—2010年云南省极端降水时空变化特征[J].云南师范大学学报:自然科学版,2015,35(1):67-72.
- [28] 刘佳旭,李丽娟,李九一,等.1954—2014年云南省降水变化特征与潜在的旱涝区域响应[J].地球信息科学,2016,18(8):1077-1085.
- [29] 王杰,吴灏,黄英,等.滇中地区参考作物蒸散量时空变化特征[J].水土保持研究,2015,22(4):41-44.