

基于相对湿润指数的云南省 季节性干旱变化特征

张青雯^{1,2}, 崔宁博², 赵禄山¹, 徐洋¹, 李谦¹, 刘飞鹏¹

(1. 国家林业和草原局昆明勘察设计院, 云南昆明 650216;

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

摘要:利用云南省31个气象站1961—2016年逐日气象资料,计算各站点相对湿润指数(MI),采用Mann-Kendall检验、GIS反距离加权插值和偏相关系数法分析了云南省气象干旱时空变化特征及成因。结果表明:(1)云南省年平均MI为-0.08,平均干旱站次比为30.39%,年干旱呈上升趋势;冬季MI最小(-0.73),干旱站次比最高(52.58%);夏季MI最大(0.69),干旱站次比最低(6.12%)。春旱呈减弱趋势,夏旱、秋旱、冬旱呈增强趋势。(2)年尺度上,除会泽、沾益等少数地区外,均处于无旱等级;全省春季以中旱、轻旱为主;夏季、秋季无干旱发生;冬季以重旱为主。年干旱频率呈自西南向东北递增趋势,平均频率为54.9%,春旱频率在80%以上,夏旱频率小于20%,秋旱也呈西南低东北高的趋势,平均频率为35.6%,冬旱平均频率达92.6%。(3)相关性分析显示,降水量、相对湿度与MI呈极显著正相关($P < 0.01$),日照时数与MI呈极显著负相关($P < 0.01$),均是云南省MI的主要驱动因子,温度对MI的影响较小。

关键词:季节性干旱;相对湿润指数;时空变化;云南省

中图分类号:S161.3; S423 **文献标志码:**A

Seasonal drought characteristics based on relative moisture index in Yunnan Province

ZHANG Qingwen^{1,2}, CUI Ningbo², ZHAO Lushan¹, XU Yang¹, LI Qian¹, LIU Feipeng¹

(1. China Forest Exploration and Design Institute on Kunming, Kunming, Yunnan 650216, China;

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

Abstract: In this study, daily climatic data from 31 meteorological stations in last 56 years (1961–2016) were used to calculate the relative moisture index (MI). Mann-Kendall test, GIS inverse distance weighted interpolation, and correlation coefficient method were used to analyze the distribution characteristics of meteorological drought in Yunnan. The results showed that: (1) The average annual MI in Yunnan Province was at -0.08, the average drought station ratio was 30.39%, and the intensity of annual drought increased. In winter, the MI value was the smallest at -0.73, and the ratio of drought stations was the highest at 52.58%. In summer, the MI was the largest at 0.69, and the ratio of drought stations was at the lowest (6.12%). The intensity of spring drought showed a decreasing trend, while drought in summer, autumn, and winter showed an increasing trend. (2) On annual scale, they were all in the drought-free level except for a few regions such as Huize and Zhanyi stations. In the spring, there were mainly moderate and light droughts, there was no drought in summer and autumn, and severe droughts were mainly in winter. In annual scale, the drought frequency increased from the Southwest to Northeast, with an average frequency of 54.9%. The frequency of spring drought in most regions was above 80%, and summer

收稿日期:2020-04-21

修回日期:2020-05-06

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400206-03);国家自然科学基金委优秀青年科学基金项目(51922072);国家自然科学基金资助项目(51779161,51009101);中央高校基本科研业务费专项资金(2018CDPZH-10,2016CDDY-S04-SCU,2017CDLZ-N22)

作者简介:张青雯(1994-),女,云南曲靖人,硕士,助理工程师,研究方向为节水灌溉理论与新技术。E-mail:1550538857@qq.com

通信作者:崔宁博(1981-),男,陕西凤翔人,博士,教授,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:cuningbo@126.com

drought frequency was less than 20%. The autumn drought also showed a trend of lower in the Southwest and higher in the Northeast, with an average frequency of 35.6%, and an average winter drought frequency was at 92.6%. (3) Correlation analysis showed that the change of *MI* in Yunnan was significantly positively correlated with the precipitation and relative humidity ($P < 0.01$). Sunlight hours had a very significant negative correlation with *MI* ($P < 0.01$). The precipitation, relative humidity and sunlight hours were the main factors affecting *MI* change in Yunnan, while temperature had a smaller effect. This study can provide theoretical guidance for mitigating the seasonal drought impact and agricultural disaster reduction in Yunnan Province.

Keywords: seasonal drought; relative moisture index; spatial and temporal distribution; Yunnan Province

干旱是指在一定区域某时段内水分收支不平衡造成的水分短缺现象,是世界上最具破坏性和紧迫性的自然灾害,具有发生频率高、分布范围广、持续时间长、灾害损失严重等特点^[1]。一般把干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱等,其中气象干旱是各种干旱的根本成因,只有探明气象干旱发生的机理才能进一步监测分析其他干旱的变化^[2]。在全球气候变暖与人类活动增强的双重驱动因素下,我国地表干湿状况变化异常频繁,干旱呈多发重发趋势^[3-4]。云南省地处云贵高原,虽然多年平均年降水量达到 1 100 mm,但季节性干旱频发。据资料记载,云南省在 1300—1990 年的 691 a 间,共计发生 211 次干旱,平均每 9 a 发生 1 次大旱,每 5 a 发生 1 次小旱^[1]。近年来,云南省干旱发生愈发频繁,2000—2012 年的连旱尤为典型,灾害损失增大,因此对云南省季节性干旱变化规律与关键驱动因素的深入了解对于农业生产旱情预报、防灾减灾尤为重要^[5]。

干旱指数是进行干旱分析的基础和核心,能定量表达旱情^[5]。目前已有的干旱指数较多,如标准化降水指数(*SPI*)、降水距平百分率、标准化降水蒸散指数(*SPEI*)、帕尔默干旱指数(*PDSI*)、*Z* 指数等^[6-7]。许多学者利用常用的干旱指数对不同地区的干旱进行了分析。张婧等^[8]采用 *CI* 指数研究了河北省近 50 年干旱变化特征。田世英^[6]基于湿润指数分析了和田地区近 50 年地表干湿变化特征。高瑞等^[9]采用 *SPEI* 指数对云南省滇中地区的季节性干旱时空特征进行了研究。王明田等^[10]采用相对湿润指数研究了四川省季节性干旱的时空分布特征。Tirivarombo 等^[11]选取了 *SPI* 和 *SPEI* 两种指数对赞比亚卡夫盆地的干旱特征进行了研究。由于地表干湿情况受降水、温度、相对湿度、风速等多种自然因素影响,利用单因子表征的干旱指标具有局限性,而考虑多种因子综合作用的干旱指标被科学界所认可并得到了广泛应用^[12]。其中,相对湿润指数(*MI*)综合考虑了降水与需水信息,是比较理想

的区域干旱监测指标,但目前仅在部分地区得到应用^[3]。本文以相对湿润指数(*MI*)作为干旱指标,分析了云南省年和四季的干旱时空变化特征及关键驱动因素,以期为云南省干旱监测、预警、防灾减灾工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及数据来源

云南省地处中国西南边陲,介于北纬 21°8′32″~29°15′8″和东经 97°31′39″~106°11′47″N 之间,总面积 39.4 万 km²。云南省地形条件复杂,地势起伏明显,高原山地是主要地貌类型,占全省面积的 94%,河谷盆地面积仅占 6%。云南省属低纬度高原季风气候,干湿季分明,全省多年平均年降雨量达 1 100 mm,但空间分布极不均匀,且年内 80% 以上的降雨集中在 5—10 月,导致冬春、夏初易发生旱灾,夏秋易出现洪涝灾害。本文资料来源于国家气象中心,结合资料系列的完整性,选取云南省 31 个代表性站点(图 1)1961—2016 年逐日气象资料,包括降水量、日照时数、风速、相对湿度、平均温度等,对其中缺测数据(占全部数据的 3.2%)采用线性内插法和多年平均值法补充。

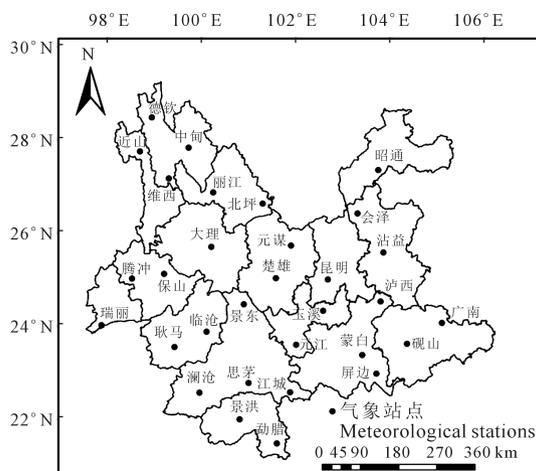


图 1 云南省气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Yunnan Province

1.2 研究方法

1.2.1 相对湿度指数 相对湿度指数(MI)适用于监测和评估旬以上尺度的气象干旱,其计算公式为^[13]:

$$MI = \frac{P - ET_0}{ET_0} \quad (1)$$

式中, MI 为相对湿度指数; P 为降雨量(mm); ET_0 为可能蒸散量(mm);采用 1998 年联合国粮农组织(FAO)推荐的 FAO56 Penman - monteith 方程^[14]计算 ET_0 ,即

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中, R_n 为太阳净辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); G 为土壤热通量($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); T 为平均气温($^{\circ}C$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线斜率($kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$); γ 为湿度计常数($kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$); u_2 为距地面 2 m 高处的风速($m \cdot s^{-1}$)。基于逐日气象数据得到季尺度和年尺度的降水量和可能蒸散量值,再计算季和年尺度的相对湿度指数值。

1.2.2 干旱分级及干旱分析指标 相对湿度指数(MI)主要考虑降水、蒸散两个因素,参考国家标准《气象干旱等级》^[15]中降水距平百分率指标及前人的研究成果^[3],对 MI 干旱等级划分见表 1。

干旱站次比^[10]:用于评价干旱影响范围的大小及严重程度,是某一区域内发生干旱的站点数占全部站点数的百分比。

干旱频率^[10]:表示干旱发生的频繁程度,是发生干旱的年数占总年数的百分比。

1.2.3 Mann-Kendall 检验 Mann-Kendall (M-K)适用于水文、气象等非正态分布的数据分析,可定量分析时间序列趋势^[16]。本文采用 Mann-Kendall 检验法对相对湿度指数的时间序列进行趋势分析。

表 1 相对湿度指数干旱等级划分

Table 1 Drought classification based on relative moisture index

等级 Level	类型 Type	年尺度 Annual scale	季尺度 Seasonal scale
1	无旱 No drought	$-0.15 < MI$	$-0.30 < MI$
2	轻旱 Light drought	$-0.30 < MI \leq -0.15$	$-0.50 < MI \leq -0.30$
3	中旱 Moderate drought	$-0.40 < MI \leq -0.30$	$-0.65 < MI \leq -0.50$
4	重旱 Heavy drought	$-0.45 < MI \leq -0.40$	$-0.80 < MI \leq -0.65$
5	特旱 Extreme drought	$MI \leq -0.45$	$MI \leq -0.80$

1.2.4 其他方法 在 ArcGIS 环境下利用反距离加权插值法^[17]绘制相对湿度指数及其变化趋势和干旱频率的空间分布图,分析其空间变化特征。采用相关系数法^[18]分析各影响因素和相对湿度指数间的相关性。

2 结果与分析

2.1 云南省季节性干旱年际变化特征

图 2 为 1961—2016 年云南省相对湿度指数(MI)。由图 2 可知,1961—2016 年云南省全年和春、夏、秋、冬季平均 MI 分别为 -0.08 、 -0.48 、 0.69 、 0.06 、 -0.73 ,呈夏季>秋季>全年>春季>冬季的趋势,除春季年平均 MI 呈上升趋势(倾向率为 $0.010 \cdot 10a^{-1}$)外,其他时段年平均 MI 均呈下降趋势,其中夏季、秋季降幅较大(倾向率分别为 $-0.043 \cdot 10a^{-1}$ 、 $-0.029 \cdot 10a^{-1}$),全年和冬季降幅相对较小(倾向率分别为 $-0.013 \cdot 10a^{-1}$ 、 $-0.002 \cdot 10a^{-1}$)。因此,云南省春旱干旱等级呈减弱趋势,而年干旱、夏旱、秋旱、冬旱的发生等级呈增强趋势,且夏旱、秋旱的干旱等级增强趋势更为显著。

图 3 为云南省 1961—2016 年干旱站次比的年际变化趋势。由图 3 可知,1961—2016 年云南省全年和春、夏、秋、冬季平均干旱站次分别为 30.39%、46.88%、6.12%、26.24%、52.58%,呈冬季>春季>全年>秋季>夏季的趋势,除春季干旱站次比呈下降趋势(倾向率为 $-0.067 \cdot 10a^{-1}$)外,其他时段年干旱站次比均呈上升趋势,其中秋季和夏季的升幅较大(倾向率分别为 $1.115 \cdot 10a^{-1}$ 、 $0.792 \cdot 10a^{-1}$),全年和冬季升幅相对较小(倾向率分别为 $0.530 \cdot 10a^{-1}$ 、 $0.023 \cdot 10a^{-1}$)。表明云南省春旱发生的范围呈缩小趋势,而全年干旱、夏旱、秋旱及冬旱发生的范围均呈扩大趋势,且夏旱、秋旱范围扩大的趋势更为显著。

2.2 云南省季节性干旱变化趋势的空间分布特征

为分析云南省干旱变化趋势的空间分布特征,计算各站点 1961—2016 年的 MI 变化倾向率,并采用 Mann-Kendall 检验法计算得到变化趋势显著($P < 0.05$)的地区,采用 ArcGIS 绘制变化趋势空间分布图(图 4)。

由图 4 可知,云南省春季 MI 均呈上升趋势,倾向率范围为 $-0.016 \cdot 10a^{-1} \sim 0.115 \cdot 10a^{-1}$,其中 9.7%的站点升幅达显著水平($P < 0.05$),主要分布在贡山、元谋、蒙自等地区。夏季 MI 呈下降趋势,倾向率范围为 $-0.223 \cdot 10a^{-1} \sim 0.025 \cdot 10a^{-1}$,38.7%的站点降幅达显著水平($P < 0.05$),多集中在云南省南

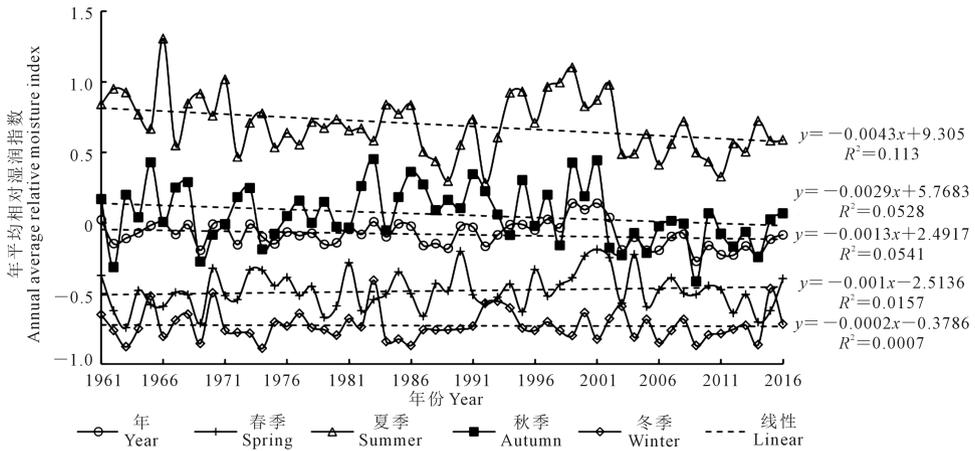


图 2 云南省相对湿润指数变化趋势

Fig.2 Trend of relative moisture index in Yunnan Province

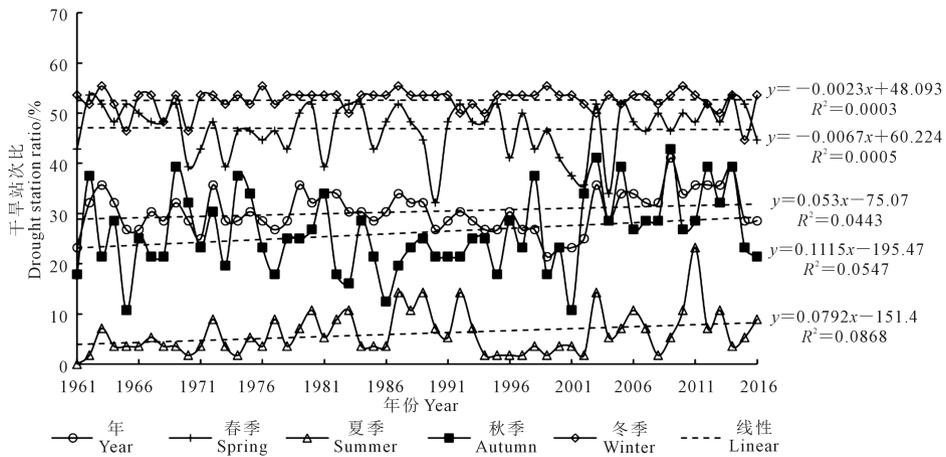


图 3 云南省干旱站次比变化趋势

Fig.3 Trend of drought station ratio in Yunnan Province

部;北部 MI 降幅相对较小,其中昭通站夏季 MI 略呈上升趋势。秋季 MI 变化趋势空间分布差异明显,西北部地区呈上升趋势,其余地区呈下降趋势,且西南部地区下降趋势较为显著,倾向率范围为 $-0.163 \cdot 10a^{-1} \sim 0.032 \cdot 10a^{-1}$, 16.1% 的站点降幅达显著水平 ($P < 0.05$)。冬季东部地区 MI 呈上升趋势,其中蒙自站升幅达显著水平 ($P < 0.05$),西部地区 MI 呈下降趋势,其中景洪站降幅达显著水平 ($P < 0.05$),冬季 MI 倾向率范围为 $-0.041 \cdot 10a^{-1} \sim 0.019 \cdot 10a^{-1}$ 。云南省年 MI 在大部分地区呈下降趋势,倾向率范围为 $-0.110 \cdot 10a^{-1} \sim 0.035 \cdot 10a^{-1}$,其中 25.8% 的站点降幅达显著水平 ($P < 0.05$),年 MI 呈上升趋势的地区主要集中在北部地区,其中元谋、蒙自站升幅达显著水平 ($P < 0.05$)。可见,云南省 MI 变化趋势在空间分布上差异明显,西南、东南部地区 MI 下降趋势显著,北部地区上升趋势显著。

2.3 云南省季节性干旱空间分布特征

图 5 为云南省相对湿润指数 (MI) 空间分布特

征。由图 5 可知,云南省春、夏、秋、冬季及全年 MI 值范围分别为 $-0.87 \sim 1.32$ 、 $-0.25 \sim 3.21$ 、 $-0.52 \sim 1.15$ 、 $-0.96 \sim 0.68$ 及 $-0.62 \sim 1.05$,平均 MI 分别为 -0.48 、 0.69 、 0.06 、 -0.73 及 -0.08 。春季中部和西北部地区相对较低,以轻旱为主,其余地区以重旱为主,仅昭通、大理等站点达重旱等级;夏季、秋季 MI 值较大,全省无干旱发生;冬季 MI 值最小,全省大部分地区为重旱。年尺度上全省除会泽、沾益等站点外均无干旱发生。可见,春季和冬季是云南省干旱易发时期。

图 6 为云南省干旱频率空间分布。春旱频率在 0~100% 之间,平均干旱频率为 77.7%,且大部分地区干旱频率在 80% 以上,中部地区春旱频率相对较低,其中贡山、勐腊、江城、屏边等地干旱频率最低,小于 20%。夏旱频率在 0~41.1% 之间,平均干旱频率为 5.2%,夏季干旱频率较低,除元江和元谋站点外,干旱频率均小于 20%。云南省秋季干旱频率在 0~91.1% 之间,平均干旱频率为 35.6%。秋旱空间分布

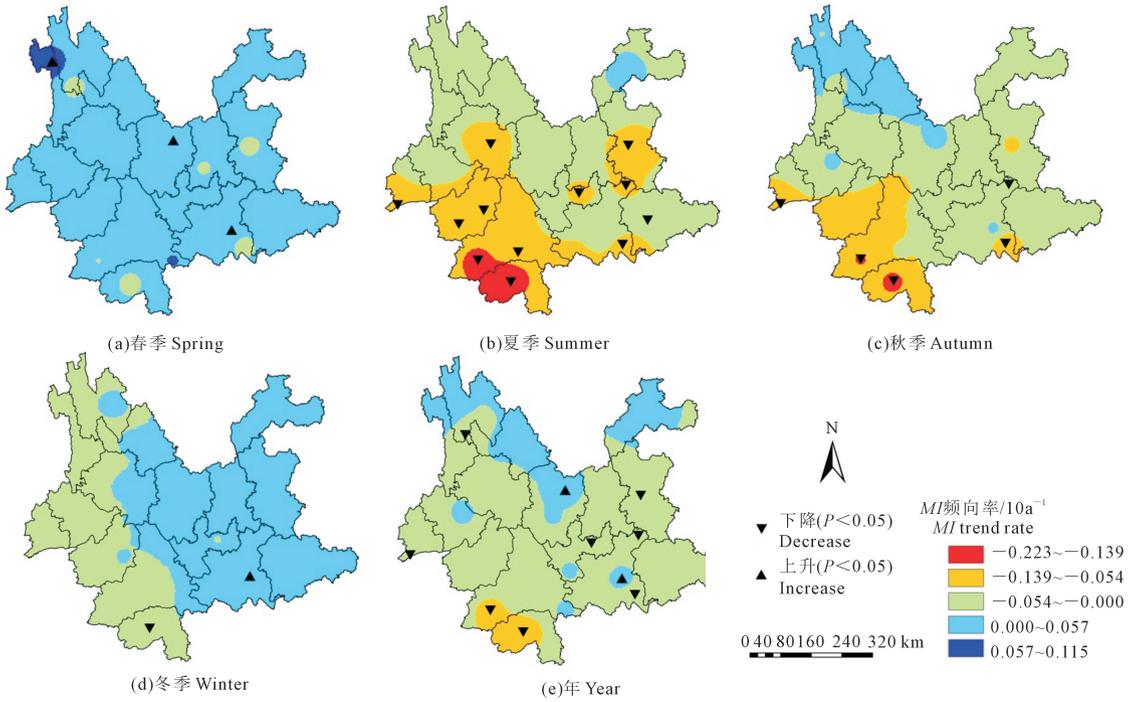


图 4 云南省相对湿润指数变化趋势空间分布

Fig.4 Spatial distribution of relative moisture index change trend in Yunnan Province

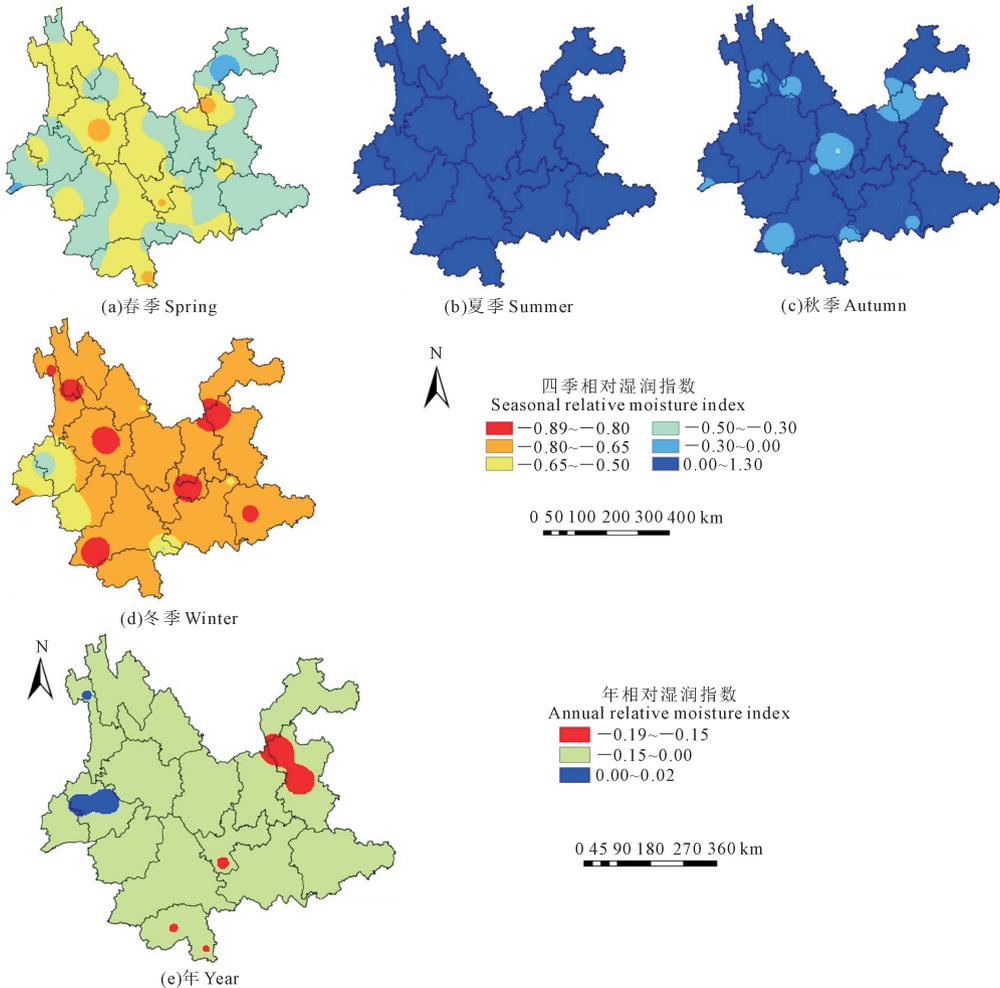


图 5 云南省相对湿润指数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of relative moisture index in Yunnan Province

特征明显,干旱频率自西南向东北呈递增趋势,西南部地区干旱频率均小于 20%,东北部地区干旱频率均在 60%以上。冬旱频率在 5.4%~100%之间,平均干旱频率为 92.6%,云南省冬旱频率最高,除贡山站点外,全省冬旱频率均大于 80%。云南省年干旱频率在 0~100%之间,平均干旱频率为 54.9%,年干旱频率空间分布特征与秋旱相似,均呈西南低东北高的趋势,西南部地区干旱频率在 0~40%之间,东北部地区干旱频率在 60%~100%之间。可见,云南省春季和冬季干旱发生频率较高,尤其是春季,正值春耕用水期,农业用水需求大,需加强干旱预警及抗旱救灾工作。

2.4 相对湿润指数影响因素分析

MI 的变化主要受降水和 ET_0 的影响,因此选取风速 (u_2)、气温 (T)、相对湿度 (RH)、日照时数 (T_{sun})、降水量 (P) 5 个气象要素与 MI 进行相关性分析,结果见表 2。

由表 2 可以看出, MI 与风速、温度、日照时数呈

负相关,与相对湿度、降水量呈正相关。春、夏、秋、冬季和全年的 MI 均与降水量相关性最高,其次是相对湿度,相关性均达到极显著水平 ($P<0.01$),表明降水量是影响云南省相对湿润指数变化最主要的因素,其次是相对湿度,温度因素对云南省全年和四季的 MI 变化影响最小,即降水量和相对湿度是影响云南省干旱变化的主导因素。

3 讨论

本研究发现云南省长期以来蒸散量大于降水量,春旱、冬旱明显,且呈春旱减轻、夏秋旱加剧趋势。1961—2016 年云南省年平均相对湿润指数 (MI) 为 -0.08 ,春、夏、秋、冬四季的平均 MI 分别为 -0.48 、 0.69 、 0.06 、 -0.73 ,除夏、秋两季外, MI 值均为负值。云南省春季 MI 略呈上升趋势,年均、夏、秋、冬季 MI 均呈下降趋势,且夏季降幅最大。这与高瑞等^[9]在滇中地区的干旱分析结果一致。云南省较易发生春旱,且大部分地区春旱频率高于 80%,夏季

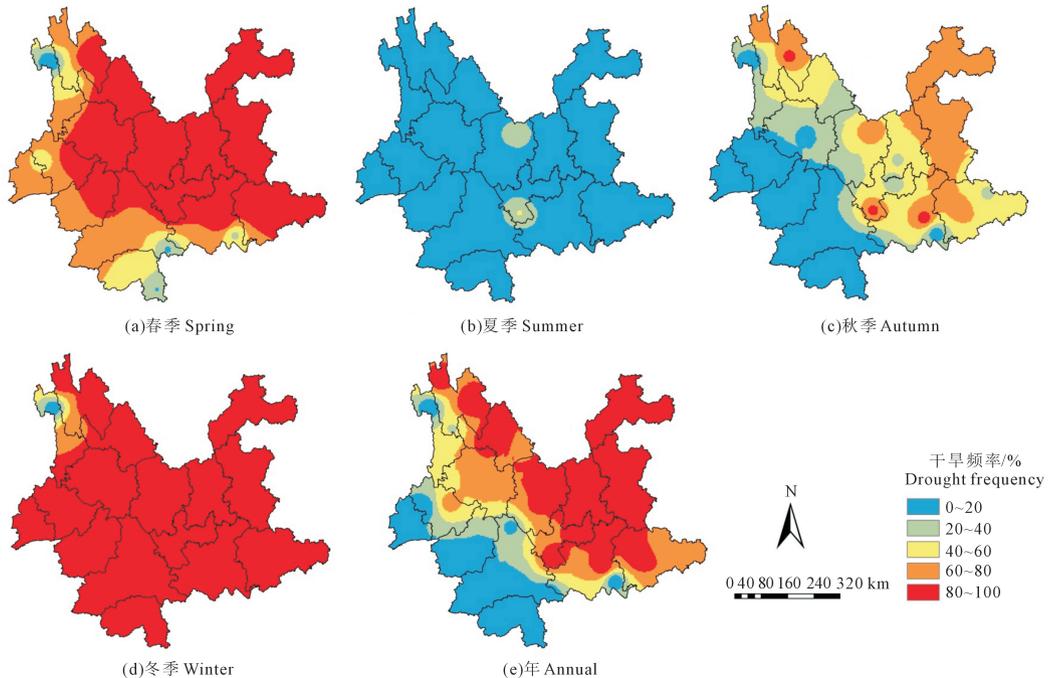


图 6 云南省干旱频率的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of drought frequency in Yunnan Province

表 2 云南省相对湿润指数与各气象要素的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of relative moisture index and meteorological factors in Yunnan Province

季节 Season	风速 (u_2) Wind speed	相对湿度 (RH) Relative humidity	温度 (T) Temperature	日照时数 (T_{sun}) Sunshine duration	降水量 (P) Precipitation
春季 Spring	-0.367 **	0.694 **	-0.319 *	-0.674 **	0.968 **
夏季 Summer	-0.669 **	0.701 **	-0.468 **	-0.403 **	0.951 **
秋季 Autumn	-0.517 **	0.708 **	-0.357 **	-0.546 **	0.942 **
冬季 Winter	-0.202	-0.473 **	-0.265 *	-0.468 **	0.970 **
全年 Annual	-0.516 **	0.604 **	-0.320 *	-0.406 **	0.915 **

注: * 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

干旱频率普遍小于 20%，秋旱平均频率为 35.6%，而冬旱频率最高。这与祁俊青等^[19]研究结果一致。云南省四季干旱差异较大与本地降水分配不均有极大的关系，云南省 80% 的降水量集中在夏秋季，这也是导致冬春季干旱频率高的主要原因。同时，本研究发现 2009 年云南省 *MI* 值为近 56 a 最低值 (-0.27)，干旱站次比为近 56 年最大值 (41%)，这与历史上 2009 年云南省发生的重大干旱事件相吻合，表明相对湿润指数能够较为准确地反映云南省干湿变化情况。

通过相关性分析，本研究发现降水量、相对湿度及日照时数是影响云南省年和四季 *MI* 变化的主导因素。刘瑜等^[20]研究发现，云南省近 46 年干季降水量呈上升趋势，而湿季降水量呈下降趋势。干湿季节降水量的变化是引起云南省春季 *MI* 呈上升趋势、夏季呈下降趋势的主要原因。此外，云南省年平均 *MI* 呈下降趋势，将会增加全省干旱风险。

本文利用相对湿润指数 (*MI*) 分析了云南省近 56 年的干旱变化特征，可为云南省有效规划配置水资源，防灾减灾、农业生产等提供重要科学依据。但是还应指出，*MI* 仅仅是一个气象干旱指标。对干旱的研究不仅要考虑气象指标的变化，还要兼顾地形地貌、作物种类、土壤性质等多种因素，*MI* 还不能解释干旱发生的机制，还需要做更加深入研究。

4 结 论

本文利用云南省 31 个气象站点 1961—2016 年逐日气象数据，对云南省干旱变化特征进行了分析，结论如下：

1) 1961—2016 年，云南省年平均相对湿润指数 (*MI*) 为 -0.08，平均干旱站次比为 30.39%，年干旱趋势呈上升趋势。春、夏、秋、冬四季的平均 *MI* 分别为 -0.48、0.69、0.06、-0.73，平均干旱站次比分别为 46.88%、6.12%、26.24%、52.58%。春旱呈减弱趋势，夏旱、秋旱、冬旱呈增强趋势。

2) 1961—2016 年，云南省年 *MI* 除北部地区外均呈下降趋势，其中 25.8% 的站点降幅显著 ($P < 0.05$)，季节性干旱呈加重趋势。春季 *MI* 呈上升趋势。夏季全省除昭通站外 *MI* 均呈下降趋势，南部地区降幅显著。秋季除西北部地区外，*MI* 均呈下降趋势，西南部地区降幅较大。冬季倾向率呈冬高西低趋势，东部 *MI* 呈上升趋势而西部呈下降趋势。

3) 1961—2016 年，云南省年尺度上，除会泽、沾益等少数地区外，均处于无旱等级。春季以中旱、轻旱为主，夏季、秋季无干旱发生，冬季以重旱为主。云南省年干旱频率呈自西南向东北递增的趋势，平均频率为 54.9%。云南省大部分地区春旱发

生频率在 80% 以上，夏旱频率较低，小于 20%，秋旱平均频率为 35.6%，呈西南低东北高的趋势；冬旱频率最高，平均频率达 92.6%。

4) 云南省年和春、夏、秋、冬季的 *MI* 与降水量、相对湿度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与日照时数呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，降水量、相对湿度及日照时数是影响云南省 *MI* 变化的主导因素，温度对 *MI* 的影响较小。

参 考 文 献：

- [1] 王栋,梁忠民,王军,等. 基于主成分聚类分析的云南省干旱自然分区[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):15-21.
- [2] 王涛,冯瑞斯,陈璐,等. 基于气象数据的云南省干旱时空变化特征分析[J]. 林业调查规划,2017,42(2):20-29.
- [3] 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(9):85-92.
- [4] Yu M X, Li Q F, Hayes M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951–2010[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3):545-558.
- [5] 王理萍,王树仿,王新华,等. 五种干旱指数在云南省的实用性分析[J]. 灌溉排水学报,2017,36(7):117-124.
- [6] 田世英. 基于湿润指数的近 50 年和田地区地表干湿变化特征[J]. 安徽农业科学,2019,47(16):73-77.
- [7] 林慧,王景才,黄金柏,等. 基于 SPI 和 SPEI 的淮河中上游流域气象干旱时空分布特征对比研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(6):59-67.
- [8] 张婧,梁树柏,许晓光,等. 基于 CI 指数的河北省近 50 年干旱时空分布特征[J]. 资源科学,2012,34(6):1089-1094.
- [9] 高瑞,王龙,张燕明,等. 基于 SPEI 的滇中季节性干旱时空特征分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2019,34(3):516-521.
- [10] 王明田,蔡元刚,张玉芳,等. 基于相对湿润指数的四川省季节性干旱时空分布特征[J]. 西南农业学报,2014,27(4):1715-1722.
- [11] Tirivarombo S, Osupile D, Eliasson P. Drought monitoring and analysis: Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Standardised Precipitation Index (SPI) [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2018, 106:1-10.
- [12] 徐羽,吴艳飞,徐刚,等. 长三角地区地表干湿状况及极端干旱事件特征研究[J]. 自然资源学报,2017,32(9):1579-1590.
- [13] 申双和,张方敏,盛琼. 1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J]. 农业工程学报,2009,25(1):11-15.
- [14] 张青雯,崔宁博,冯禹,等. 中国西南五省参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 灌溉排水学报,2016,35(11):80-87.
- [15] 张强,邹旭旭,肖风劲,等. GB/T 20481—2006. 气象干旱等级[S]. 北京:国家标准出版社,2006.
- [16] 赵璐. 四川省农业气象干旱及作物水分盈亏量时空变化研究[D]. 成都:四川大学,2014.
- [17] 牛纪萍,栗晓玲. 石羊河流域参考作物蒸发表蒸腾量对气候变化的响应模拟及预测[J]. 水利学报,2014,45(3):286-295.
- [18] 詹存,梁川,赵璐. 川中丘陵区季节性干旱时空分布特征及成因分析[J]. 农业工程学报,2013,29(21):82-90.
- [19] 祁俊青,于文金,谢涛,等. 云南省干旱灾害时空变化特征[J]. 江苏农业学报,2019,35(3):631-638.
- [20] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学,2010,25(1):39-44.