

基于 RDI 指数的云南 1960~2013 年旱涝变化特征分析^{*1}

程清平 王平*

(云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南昆明 650092)

【摘要】:利用云南省 40 个气象站逐日降水量和蒸发量数据,采用 RDI 指数研究云南旱涝灾害的时空分布特征。结果表明:云南年际、季节旱涝与历史记录十分一致,1960~2013 年云南年 RDI 指数呈下降趋势,表现为变干趋势,但不显著;2001 年以前发生雨涝年的强度和站次比较干旱年明显,在此之后,发生干旱年的强度和站次比较雨涝年明显。季节尺度上,春季呈显著的变湿趋势,夏、秋、冬季呈不显著的变干趋势;春、夏季分别突变于 1980 年和 1965 年。从空间分布上来看,年、夏、秋、冬季整体以滇南和滇东北呈变干趋势,而滇西北呈变湿趋势;春季除滇东北外,其余区域均呈变湿趋势;年际、季节干旱频率以滇西北、滇西南、滇东南较高;年、春、夏、秋季重旱频率以滇中和滇东十分突出;年、夏、秋季特旱频率均以滇东北十分突出,春季滇中和滇东极易发生特旱;冬季以滇中重旱频率较高,特旱极易发生在滇西北、滇西南、滇东北。年际、季节雨涝频率以滇西、滇东南较突出。年重、特涝频率以滇西南十分突出;春季重涝频率以滇西南和滇中较突出,特涝频率以滇中和滇东南较突出;夏季重、特涝频率均以滇西北较高;秋季重涝频率以滇西北较高,特涝频率以滇东南较高;冬季重涝频率以滇东南较突出,特涝频率以滇西北较高。

【关键词】:云南省;RDI 指数;旱涝变化趋势;时空特征

【中图分类号】:P467 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2018)01-0185-12

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201801021

全球范围内,极端天气、气候事件频发,各种气象灾害也就不可避免地应运而生。旱涝是最主要的气象灾害之一;且未来极端降雨和无雨日数将呈增加趋势,部分地区将可能经历更加严重和频繁的旱涝灾害^[1]。旱涝灾害是中国发生频率最高、影响范围最广的自然灾害之一。从地域上来看,西南地区是我国旱涝灾害最为频发的地区之一,该地区几乎每年都有不同程度的旱涝灾害发生,尤其是大范围、长时间的严重干旱每 5~10a 就会出现 1 次^[2]。2009~2012 年,西南 5 省(滇、川、渝、黔、桂)部分地区连续遭遇严重连旱^[3~5],这次严重干旱不仅使灾区大量农作物歉收或绝收,2500 万人生活用水困难,而且还带来巨大的经济损失^[6],是西南地区有气象记录以来最严重的干旱事件^[7]。西南地区严重干旱事件发生频率正在不断增加的事实,表明干旱正在从中国北方开始向西南地区蔓延^[8]。云南作为西南地区旱涝灾害发生频繁的地区之一,引起了许多学者的广泛关注,并针对云南旱涝灾害的时空分布特征^[9~15]和成因^[16~20]进行分析和研究,得出了许多有价值的研究成果。

¹ 收稿日期:2017-04-05;修回日期:2017-06-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41261007)

作者简介:程清平(1987~),男,硕士研究生,主要从事气候变化与灾害风险评估研究。E-mail:446925163@qq.com

*通讯作者 E-mail:ynwangping@163.com

旱涝指标的选取是研究旱涝气候的基础,也是衡量旱涝程度的关键环节。相关研究表明,如果旱涝指标制定得客观、合理,那么对旱涝过程就反映得准确;否则,对旱涝进行评估时,一是有可能遗漏一些过程,二是有可能增加一些并非旱涝的过程[21]。目前研究旱涝灾害的指标有CI指数、SPI指数、SPEI指数、RDI指数等^[22~26]。各种指数在分析和监测旱涝时均表现出不同程度的优势,同时也有局限。例如,近几年特别是在2010年西南干旱气象服务研究过程中发现,CI指数存在旱情“突然加剧”的问题;因此,有学者提出了改进的CI指数^[27, 28]。SPI指数能够反映多时间、多尺度标量的降水异常^[29],但忽略了气温上升引起的蒸散量变化对干旱的影响;对此Vicente—Serrano等提出了SPEI指数;而针对SPEI利用Thornthwaite方法主要适用于相对湿润区潜在蒸发的计算,而对广大的干旱、半干旱地区并不适用,因此赵静等^[30]提出了改进的SPEI指数;并运用于中国541个台站,发现改进蒸发能力计算方法能够显著提高标准化降水蒸发指数在区域和季节的适用范围。Tsakiris等^[25, 26]提出的干旱侦测指数(Reconnaissance drought index)综合考虑了降雨、蒸散对旱、涝的影响,近几年在我国旱涝研究中得到应用^[31, 32],并取得了较好的效果。因此,本文采用干旱侦测指数研究云南旱涝灾害的干旱强度、频率和站次比演变特征,以期为进一步发展利用以及云南旱涝灾害评估和监测、防灾减灾、水资源的管理等提供依据。

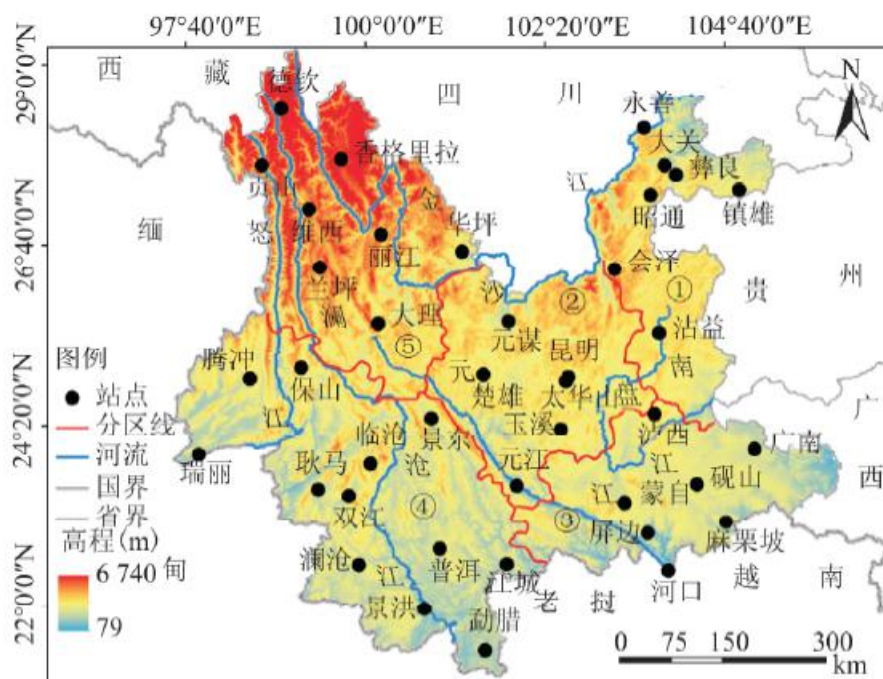
1 研究区域概况

云南地处我国西南边陲,北回归线横贯南部,属低纬高原地区,总面积39.4万km²。北依广袤的亚洲大陆,南临辽阔的印度洋和太平洋,同时与被称为世界屋脊的青藏高原相邻。云南特殊的地理位置以及地形使得云南气候地域差异明显,呈“一山分四季,十里不同天”的立体气候特征。同时受东亚、南亚两支季风的共同作用,形成了鲜明的区域气候特征^[33]。全省降雨充沛,多年平均降雨量达1278.8mm,但降水量时空分布极不均匀,由北部、中部向东、南、西三面逐渐增多,同时汛期(5~10月)降水量占全年的80%以上;全省多年平均径流深为576.7mm,多年平均产水模数为57.7万m³/km²,汛期(5~10月)径流量占全年60%以上;导致冬春、夏初极易出现干旱灾害,夏、秋出现洪涝灾害^[34]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

资料来源于中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>),高程数据(DEM)为分辨率90m的SRTM,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),研究站点分布见图1。各站点数据均经过严格的质量控制,包括极值检验、时间一致性检验,最终选择数据完整的1960年1月1日至2014年2月28日逐日降水量和蒸发量数据,其中蒸发量数据部分站点2001年以后采用E601B观测,根据相关学者研究表明^[35, 36],采用线性回归校正E601B型蒸发量为小型蒸发皿效果较好。因此,本文利用1998~2001年20cm小型蒸发皿和E601B蒸发数据,校正2002~2014年E601B数据为20cm小型蒸发皿数据。按照春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)、冬季(12月翌年2月)统计各季旱涝强度和频率以及站次比。



注：①为滇东北；②为滇中；③为滇东南；④为滇西南；⑤为滇西北

图 1 云南气象站点分布图

Fig. 1 Location distribution of meteorological in Yunnan

2.2 研究方法

2.2.1 RDI 指数

干旱侦测指数(Reconnaissance drought index)由 Tsakiris 等^[25, 26]提出,综合考虑了降雨、蒸散对旱、涝的影响。RDI 指数有 3 种表达方式,即初始值(a_k)、归一化 RDI 指数(RDI_n)、标准 RDI 指数(RDI_{st})。其中,初始值 a_k 可以通过以下公式来计算 a_0 :

$$a_0^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中: P_{ij} 和 PET_{ij} 分别为第 i 年第 j 个月的降雨量和潜在蒸散量(在这里使用 20cm 口径蒸发皿蒸发量)。归一化 RDI 指数 RDI_n 的计算公式如下:

$$RDI_n^{(i)} = \frac{a_0^{(i)}}{\overline{a_0}} - 1 \quad (2)$$

标准 RDI 指数 (RDI_{st}) 的计算公式如下:

$$RDI_{st}k^{(i)} = \frac{y_k^{(i)} - \overline{y_k}}{\overline{\sigma_{y_k}}} \quad (3)$$

式中: $y_k^{(i)} = \ln(a_0^{(i)})$, $\overline{y_k}$ 为 $y_k(i)$ 的算术平均值, 而 $\overline{\sigma_{y_k}}$ 为 $y_k^{(i)}$ 的标准偏差。旱涝等级划分如下表。

表 1 RDI 旱涝等级划分标准

指数	轻旱 (涝)	中旱 (涝)	重旱 (涝)	特旱 (涝)
RDI 值	$0 \leq RDI < - (1.0)$	$- (1.5) < RDI \leq - (1.0)$	$- (2.0) < RDI \leq - (1.5)$	$RDI \leq - (2.0)$

注: 括号外为干旱等级, 括号内为雨涝等级。

(1) 旱涝频率

旱涝频率是用来评价某站有资料年份内发生旱涝频繁程度, 计算公式如下:

$$RDI_i = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (4)$$

式中: i 为某站点下标; n 为某站点发生干旱或雨涝的年数; N 为评价时段总年数。为了方便分析比较, 在此把中度旱涝 (含中度及以上旱涝) 发生的年份均记为旱涝, 重旱涝 (含重度旱涝及以上) 发生的年份均记为重旱涝, 特旱涝发生的年份均记为特旱涝。

(2) 旱涝站次比

(RDI_j) 是用某一区域内旱涝发生站数多少占全部站数的比例来评价旱涝影响范围的大小, 可用以下公式表示:

$$RDI_j = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (5)$$

式中:下标 j 为某年份; m 为发生干旱或雨涝的站数; M 为评价区域总气象站数。旱涝发生站次比表示一定区域旱涝发生的范围的大小,也间接反映旱涝的影响范围的严重程度。旱涝的影响范围定义:当 $RDI_j \geq 50\%$ 时,表示研究区域内有一半以上的站发生旱涝,记为全域性旱涝; $50\% > RDI_j \geq 33\%$ 时为区域性旱涝; $33\% > RDI_j \geq 25\%$ 时为部分区域性旱涝; $25\% > RDI_j \geq 10\%$ 时为局域性旱涝;当 $RDI_j < 10\%$ 时可认为无明显旱涝发生。统计云南省各年份发生旱涝的气象站点数,计算历年旱涝站次比(旱涝站次比是指中度及以上旱涝的站点数占全部站点数的百分比)。

2.2.2 Mann-Kendall 趋势检验和突变检验

为了检测 RDI 指数时间序列的演变趋势和突变特点,采用世界气象组织推荐的由 Mann^[37] 和 Kendall^[38] 提出的已经广泛应用于气象、水文演变趋势和突变检验的 Mann-Kendall 法(简称 M-K),它的优点在于不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k 可以进一步分析序列 x 的趋势变化,而且可以明确突变的时间,指出突变的区域。若 UF_k 值大于 0,则表明序列呈上升趋势;小于 0 则表明呈下降趋势;当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。如果 UF_k 和 UB_k 这两条曲线出现交点,且交点在临界直线之间,那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻。对于统计量 Z ,大于 0 时是上升趋势;小于 0 时是下降趋势。当显著性水平为 0.05 时, $Z > 1.96$ 表示时间序列呈显著上升的趋势; $Z < -1.96$ 表示时间序列呈显著下降的趋势。同时,由于 Sen 式斜率能避免时间序列数据缺失及数据分布形态对分析结果的影响,并剔除异常值对时间序列的干扰^[39],因此采用 Sen 式斜率计算云南省各站点旱涝变化趋势幅度。

2.2.3 空间分析

对于旱涝频率的空间分析采用普通克里金法进行插值。

3 结果分析

3.1 旱涝指数时空变化特征

3.1.1 年际、季节旱涝指数变化趋势和突变特征

2009~2013 年为连续 5a 干旱,1962~1964 年、1978~1980 年、1987~1989 年为连续 3a 干旱,1992~1993 年、2005~2006 年为连续 2a 干旱;其中,1960 年、2009 年、2011 年为极旱,1969 年、2003 年、2012 年为重旱(图 2a)。雨涝年比较突出年份有 1999~2001 年,均为重涝,未有极涝年发生。54a 中干旱年占 48.1%,雨涝年占 51.9%;雨涝年集中于 2001 年以前,在此之后,发生干旱 8a,雨涝 5a,且干旱强度较雨涝强度明显偏强。M-K 趋势检验发现,年尺度 Z 值为 -0.4327 ,变化率为 $-0.03/10a$,呈不显著的下降趋势。在 0.05 的显著性水平下, UF 、 UB 曲线于 1980 年相交一点,但相交之后未超过显著性水平线,因此年尺度旱涝强度突变不显著;1960~1964 年、1968 年、1978~1989 年、1991~1993 年、2011~2013 年 $UF < 0$,呈变干趋势,其余时段 $UF > 0$,呈现变湿趋势,尤其是 1999~2003 年连续 5a 呈明显的湿润化态势。

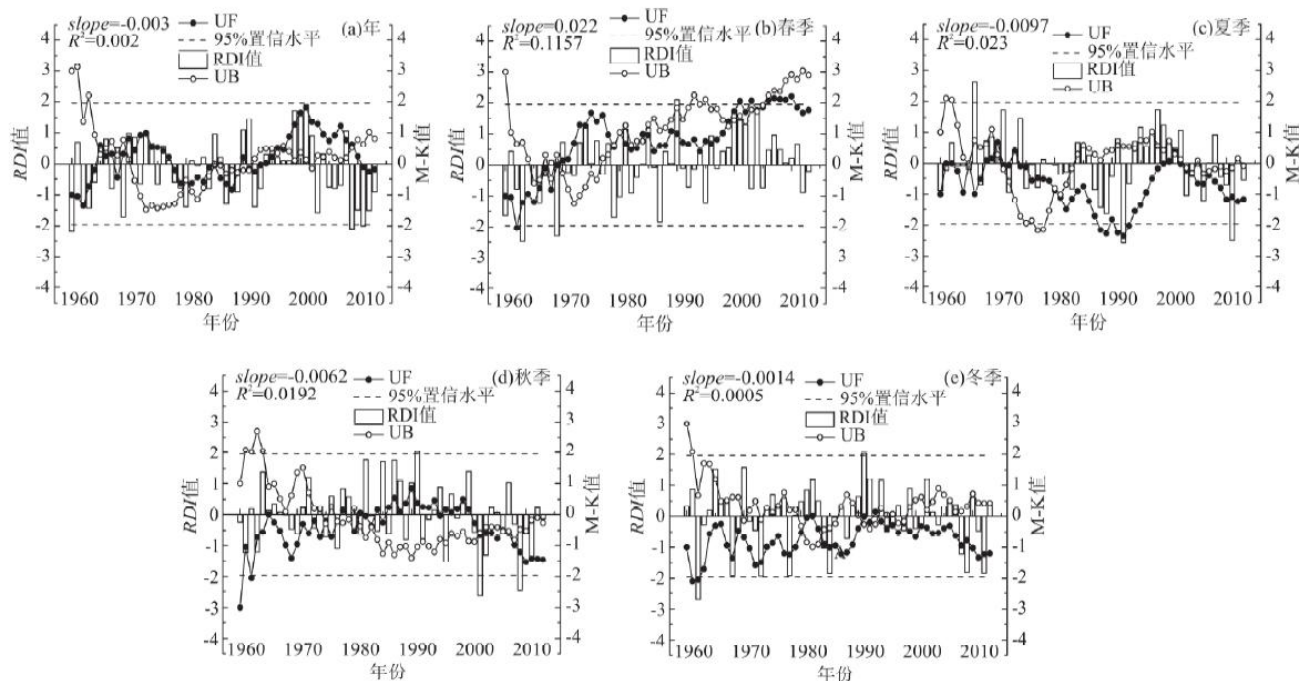


图2 云南 RDI 值年际、季节变化特征及 M-K 突变检验

Fig.2 RDI change trend and Mann-Kendall abrupt test of annual and seasonal

从季节尺度来看,春、夏、秋、冬季 Z 值分别为 2.36、-0.64、-0.75、-0.39,变化率分别为 0.22/10a、-0.097/10a、-0.062/10a、-0.014/10a;其中,春季通过 0.05 的显著性水平检验,说明春季湿润化态势显著,而夏、秋、冬季呈不显著的变干趋势。54a 中春季干旱年占 46.3%,雨涝年占 53.7%;其中,1963 年、1969 年极旱,1960 年、1979 年、1980 年、1987 年重旱;1990 年特涝,2000 年、2004 年重涝(图 2b)。从突变特征来看,春季在 UF 和 UB 之间于 1980 年交于一点,经历由旱转涝,突变时间区域为 2001 年、2003 年、2006~2010 年。夏季干旱年份占 55.6%,1992 年、2011 年为特旱年,1989 年为重旱年;雨涝年份占 44.4%,其中,1966 年为特涝年、1971 年、1974 年、1998 年为重涝年(图 2c);UF 和 UB 曲线于 1965 年相交,54a 中仅有 6aUF 值大于 0,呈现明显的变干趋势。秋季干旱年份占 51.9%,2002 年和 2009 年为特旱年、1996 年为重旱年;雨涝年份占 48.1%,1991 年为特涝年,1982 年、1985 年、1987 年为重涝年(图 2d);UF 和 UB 曲线于 1977 年和 1978 年相交,但未超过显著性水平线,突变不显著;1960~1977 年、1979~1985 年、2001~2013 年为连续多年 UF 值<0,呈现变干趋势,1986~1994 年、1996~2000 年 UF 值>0,呈湿润态势。冬季 1962 年为特旱年、1968 年、1973 年、1978 年、1985 年、2009 年、2012 年为重旱年,1991 年为特涝年、1965 年和 1970 年为重涝年(图 2e);从突变特征来看,UF 和 UB 曲线于 1998 年交于一点,但未超过显著性水平线,因此突变不显著,54a 中 UF 值仅有 2a>0,冬季变干趋势十分明显。

3.1.2 年际、季节旱涝变化趋势空间分析

从年尺度来看,云南干湿站点交叉分布(图 3a);总体来看,滇西南、滇东呈现显著变干趋势;干旱化站点占 60%,显著性站点占 7.5%;湿润化站点占 40%,显著性站点占 12.5%,尤以滇西北湿润化趋势明显。春、夏、秋、冬季干旱化站点分别为 5%、65%、75%、65%,其中显著性站点为 0%、13%、15%、5%;湿润化趋势站点分别为 95%、35%、25%、35%,显著性站点分别为 22.5%、1.9%、5%、2.5%,可见夏、秋季呈显著的干旱化趋势,而春季呈显著的湿润化趋势。从空间分布来看,春季干旱化站点主要分布在滇东北区域,其余区域呈明显的湿润化趋势(图 3b)。夏季干湿站点交叉分布于全省,尤以滇西南呈显著的干旱化趋势(图 3c)。秋季在滇中、滇东、滇西南地区干旱化趋势明显,而滇西北呈湿润化趋势(图 3d)。冬季干旱区域较夏、秋季减少,干旱化站点主要分布在滇西南(图 3e),而呈明显的湿润化态势站点主要集中于金沙江流域和滇东南地区。

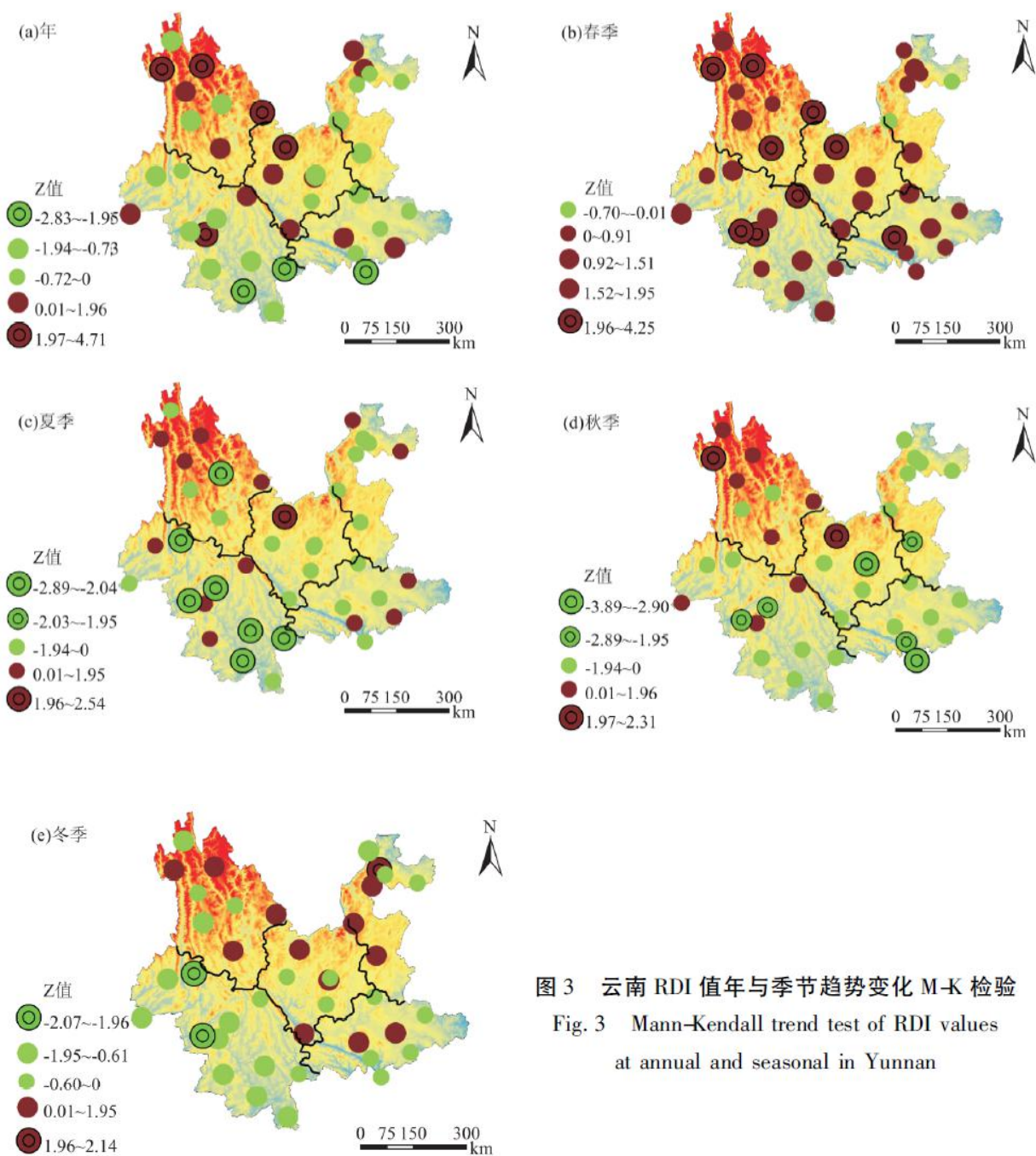


图3 云南 RDI 值年与季节趋势变化 M-K 检验

Fig. 3 Mann-Kendall trend test of RDI values at annual and seasonal in Yunnan

3.2 旱涝频率空间分布特征

3.2.1 年际、季节干旱频率空间分布

年干旱发生频率在 13%~24.1%之间, 高低频率交错分布, 高频率中心出现在滇西北、滇西南部分地区, 低频率分布在滇东北、滇东南和滇中部分地区; 重旱频率在 1.9%~13.0%之间, 高频率主要发生在滇中和滇西部分区域; 特旱频率在 0%~5.6%之间, 极易发生在滇东北区域(图 4)。春季干旱频率在 11.1%~37.5%之间, 以滇西地区较典型, 其余地区相对较低; 重旱频率在 5.6%~20.8%之间, 高频率地区主要发生在滇东南, 以广南、砚山、麻栗坡站为代表; 此外, 滇西北的华坪、丽江、兰坪一带也较高,

滇中、滇西南地区发生频率相对较低;特旱频率在 0%~5.6%之间,除滇西北、滇东北、滇东南部分地区外几乎发生于全省,以玉溪、泸西、镇雄、普洱站发生频率最高。夏季干旱频率在 11.1%~24.1%之间,较高的地区主要发生在滇东,以滇东南频率最高;重旱频率在 0%~11.1%,高频率中心发生在滇中;特旱频率在 0%~5.6%,空间上呈现斑块状分布,高发地区主要集中于滇东北。秋季干旱频率在 11.1%~24.1%之间,以滇东发生频率较高;重旱频率在 0%~13.0%之间,空间分布上以滇中、滇东北相对较高;特旱频率在 0%~5.6%之间,空间分布上仍以滇东北相对较高。冬季干旱频率在 11.1%~20.4%之间,以滇西南和滇东发生频率相对较高;重旱频率在 3.7%~13.0%之间,以滇中和滇东南较高;特旱频率在 0%~5.6%之间,空间分布上以东北—西南走向呈“低—高一低—高一低”的空间分布。

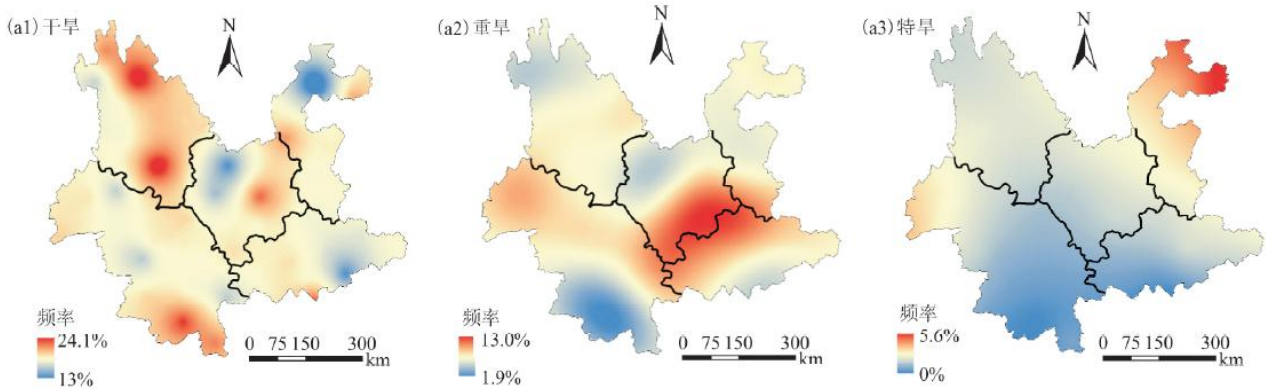


图 4 云南年际干旱频率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of drought frequency for inter-annual in Yunnan

3.2.2 年际、季节雨涝频率空间分布

年雨涝发生频率在 9.3%~21.9%之间,空间上以滇西北、滇西南为高频率中心;重涝频率在 1.9%~7.4%之间,空间上以东北—西南走向呈“高一低—高”分布,尤以滇西南发生频率相对较高;特涝频率在 0%~5.6%,空间分布上与重涝频率较一致(图 5)。春季雨涝频率在 11.1%~20.4%之间,空间分布上以滇西北、滇西南发生频率相对较高;重涝频率在 3.7%~13.0%之间,呈现“两边低中间高”的特点;特涝频率在 0%~5.6%之间,形成以河口、屏边、楚雄站为中心向外辐射的高频率中心(图 5a3)。夏季雨涝频率在 5.6%~24.1%之间,以滇西北、滇东南相对较高;重涝频率在 3.7%~11.1%之间,以西北—东南走向呈“高一低—高”的分布形式,尤以滇西北相对较高;特涝频率在 0%~5.6%之间,以滇西北、滇西南相对较高。秋季雨涝频率在 9.3%~24.1%之间,形成以沾益、元江、河口、广南站为中心向外辐射的 4 个高频率中心;重涝频率在 1.9%~13.0%之间,以滇西北相对较高;特涝频率在 0%~3.7%之间,呈斑块状分布在云南部分地区。冬季雨涝频率在 13.0%~22.2%之间,以滇西南为高频发地区,此外滇东北发生频率也较高;重涝频率在 1.9%~14.8%之间,以滇东南相对较高;特涝频率在 0%~5.6%之间,形成以丽江、华坪、双江、镇雄站为中心向外辐射的 4 个高频率中心。

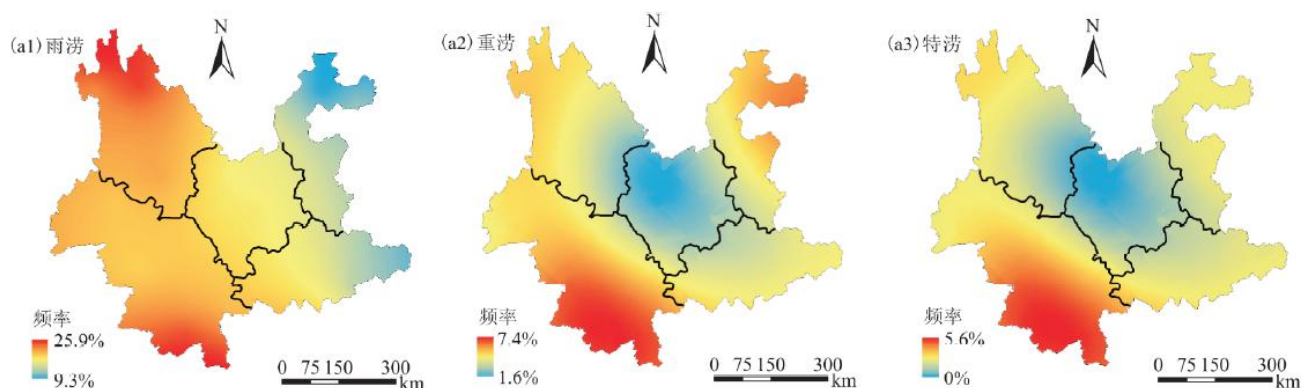


图 5 云南年际雨涝频率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of flood frequency for inter-annual in Yunnan

3.3 旱涝站次比变化特征

3.3.1 年际、季节干旱站次比

年干旱站次比在 0%~70%之间,变化率为 1.27%/10a,呈上升趋势;54a 中,1960 年、2009 年、2011 年为全域性干旱,1963 年、1969 年、1980 年、1987 年、1992 年、2003 年、2012 年为区域性干旱;1962 年、1972 年、1979 年、1988 年、1989 年、2005 年、2010 年、2013 年为部分区域性干旱;局域性干旱 11a、无明显干旱 25a;其中,1985 年、1995 年、2001 年、2008 年干旱站次比为 0(图 6a)。春、夏、秋、冬季变化率分别为-4.0%/10a、1.06%/10a、2.4%/10a、1.14%/10a,春季呈下降趋势,夏、秋、冬季呈上升趋势(图 6)。春季发生全域性干旱 5a(1960 年、1963 年、1969 年、1979 年、1987 年),区域性干旱 4a(1966 年、1992 年、1995 年、2012 年)。夏季发生全域性干旱 3a(1989 年、1992 年、2011 年),区域性干旱 5a(1967 年、1972 年、1977 年、1988 年、2006 年)。秋季发生全域性干旱 2a(2002 年、2008 年),区域性干旱 4a(1963 年、1996 年、2003 年、2011 年)。冬季发生全域性干旱 7a(1962 年、1968 年、1973 年、1978 年、1985 年、2009 年、2012 年),区域性干旱 2a(1988 年、2008 年)。

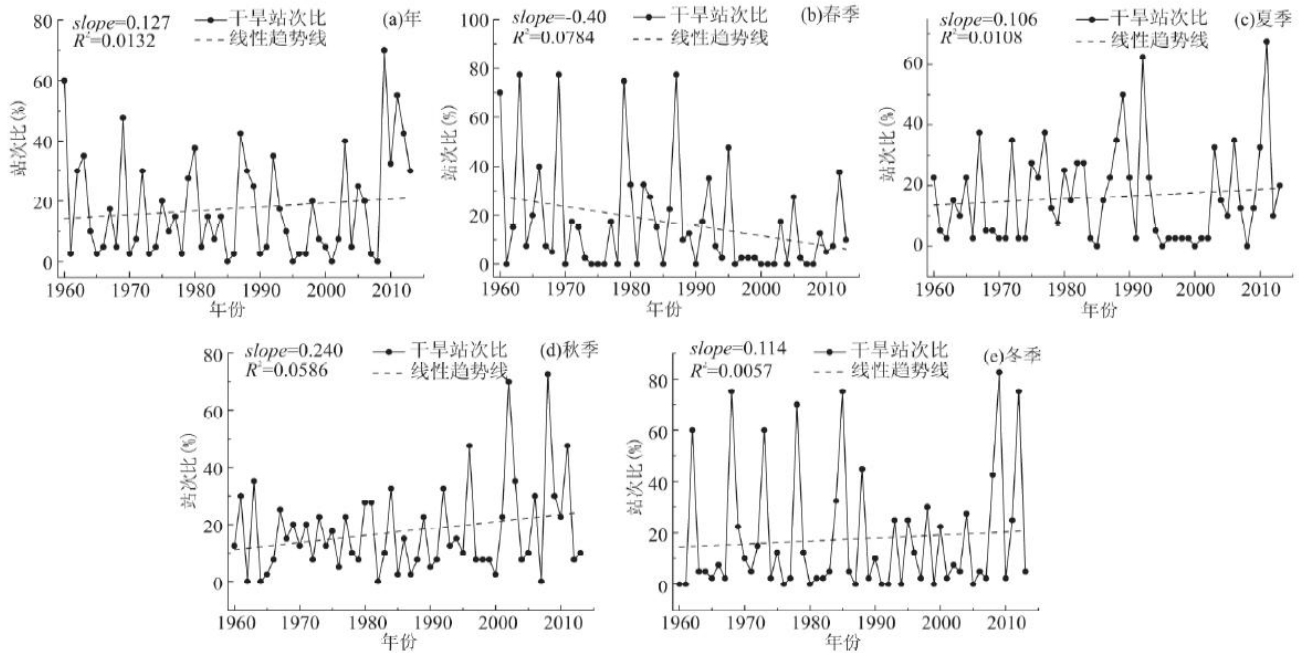


图 6 1960~2013 年云南雨涝站次比变化趋势

Fig. 6 Change trend of drought stations proportion in Yunnan during 1960-2013

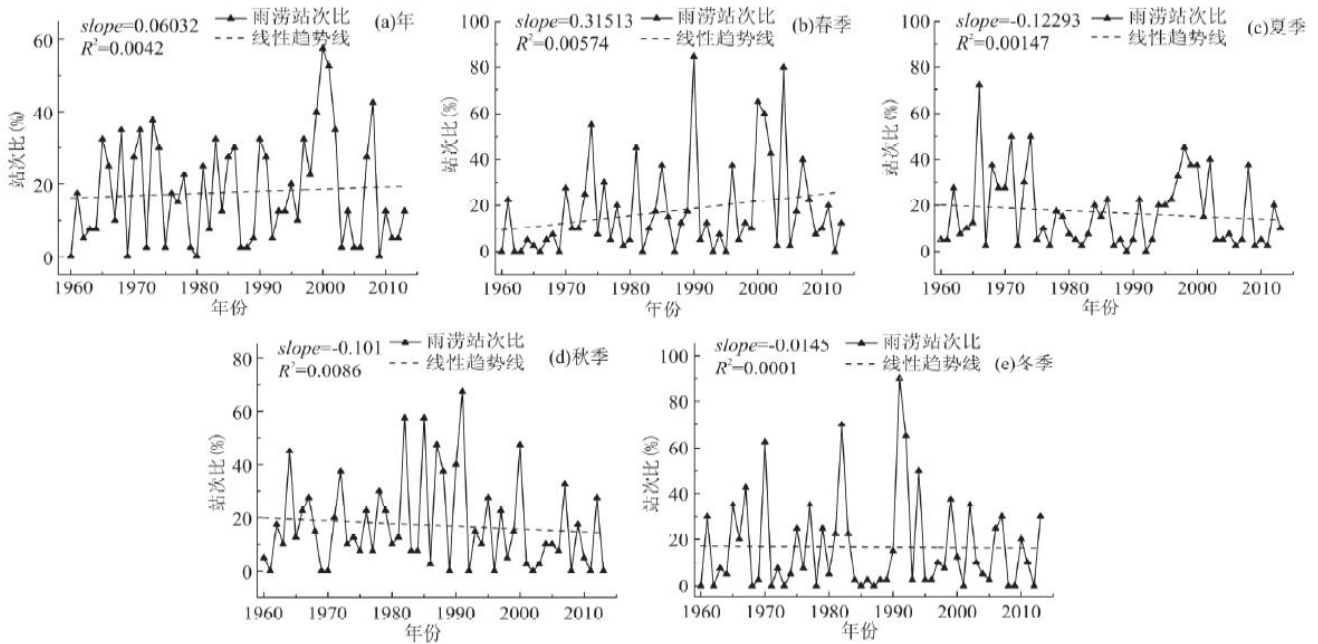


图 7 1960~2013 年云南雨涝站次比变化趋势

Fig. 7 Change trend of flood stations proportion in Yunnan during 1960-2013

3.3.2 年际、季节雨涝站次比

年雨涝站次比在 0%~57.5%之间,变化率为 0.6%/10a,呈上升趋势;54a 中,2000 年、2001 年为全域性雨涝,1968 年、1971

年、1973 年、1999 年、2002 年、2008 年为区域性雨涝;1965 年、1966 年、1970 年、1974 年、1981 年、1983 年、1985 年、1986 年、1990 年、1991 年、1997 年、2007 年为部分区域性雨涝;局域性雨涝 14a, 无明显雨涝 20a, 其中, 1960 年、1969 年、1980 年、2009 年雨涝站次比为 0(图 7a)。春季变化率为 3.15%/10a, 呈上升趋势, 发生全域性雨涝 5a(1974 年、1990 年、2000 年、2001 年、2004 年), 区域性雨涝 5a(1981 年、1985 年、1996 年、2002 年、2007 年)(图 7b)。夏季变化率为-1.23%/10a, 呈下降趋势, 发生全域性雨涝 3a(1966 年、1971 年、1974 年), 区域性雨涝 6a(1968 年、1998 年、1999 年、2000 年、2002 年、2008 年)(图 7c)。秋季变化率为-1.01%/10a, 呈下降趋势, 发生全域性雨涝 3a(1982 年、1985 年、1991 年), 区域性雨涝 6a(1964 年、1972 年、1987 年、1988 年、1990 年、2000 年)(图 7d)。冬季变化率为-0.15%/10a, 呈下降趋势, 发生全域性雨涝 5a(1970 年、1982 年、1991 年、1992 年、1994 年), 区域性雨涝 5a(1965 年、1967 年、1977 年、1999 年、2002 年)(图 7e)。

4 讨论

RDI 指数检测的典型干旱年($RDI \leq -1$), 如 1960 年、1962~1963 年、1969 年、1980 年、1987 年、1992 年、2003 年、2009 年、2011 年、2012 年;典型雨涝年($RDI \geq 1$), 如 1970 年、1973 年、1985 年、1990~1991 年、1999~2001 年、2008 年与《中国气象灾害大典·云南卷》[40]和《云南气象灾害总论》[41]记录的旱涝年份十分一致;此外, 其余强度较弱的旱涝年也检测出来, 说明 RDI 指数能够较客观刻画云南实际旱涝情况;由此可知, RDI 指数用于分析云南旱涝变化特征是十分合理的。计算 1960~2013 年 RDI 指数分析发现, 90 年代, 年、春、夏、秋、冬季旱涝指数分别为 0.6、0.2、0.4、0.2、0.5, 均表现为变湿;2000~2013 年, 年、春、夏、秋、冬季旱涝指数分别为-0.2、0.5、-0.3、-0.5、-0.2, 春季表现为变湿, 年与夏、秋、冬季表现为变干, 这与 Zhang 等^[42]研究指出西南地区 90 年代转湿, 进入 21 世纪以来发生干旱趋势增强, 尤其是极端干旱相一致。从变化趋势来看, 年旱涝表现为不显著的下降趋势, 说明年尺度可能由涝转旱, 但不显著;春季呈显著的上升趋势, 说明春季将可能由旱转湿, 且这种趋势十分显著;夏、秋、冬季呈下降趋势, 说明夏、秋、冬季将可能呈干旱化趋势, 但不显著;这与何娇楠等^[9]和李运刚等^[12]基于 SPI/SPEI 指数对云南和红河河流域研究得出的结果一致。结合旱涝站次比来看, 云南年干旱站次比较雨涝站次比高, 春季雨涝站次比大于干旱站次比, 夏季旱涝站次比相当, 秋季干旱站次比大于雨涝站次比, 冬季旱涝站次比相差不大。年干旱站次比和雨涝站次比变化率均呈不显著的上升趋势, 这说明将来年尺度上发生干旱和雨涝均有可能呈上升趋势;春季干旱站次比呈下降趋势, 而雨涝站次比相应呈上升趋势, 夏、秋、冬季干旱站次比呈上升趋势, 相应雨涝站次比呈下降趋势;这也与何娇楠等^[9]研究云南和李运刚等^[12]研究红河河流域得出的结果一致。从变化趋势的空间分布来看, 年尺度上呈现变干的地区主要分布在滇中、滇南, 变湿的地区主要分布在滇西北, 也与何娇楠等^[9]得出的结果一致。春季除滇东北呈变干趋势外, 其余地区均呈变湿态势。夏、秋季干湿变化趋势空间分布较一致, 均表现出滇中、滇东南、滇西南、滇东北呈变干趋势, 而滇西北呈变湿趋势;但秋季变干的趋势较夏季变干的趋势明显;夏、秋节呈干旱化的站点分别为 65%和 75%, 其中显著性站点分别为 13%和 15%, 且主要集中在滇东, 也与何娇楠等^[9]的结果相一致;冬季以滇西南呈显著的变干趋势, 这与王东等^[43]对西南地区干湿变化趋势的空间分布描述相一致, 尤其是显著变干和变湿的地区。从干旱频率的空间分布来看, 云南省中东部较西部更容易发生干旱也与王栋等^[34]研究结果一致。

有关学者指出, 西南地区 and 云南旱涝的发生与大气环流异常和特殊地形有密切的相关性^[12, 16~20, 34, 39, 42, 44]。例如, 杨辉等^[16]研究表明西风带环流系统异常是造成云南 2009/2010 年干旱灾害的主要成因;王东等^[43]研究发现西南地区在厄尔尼诺年和拉尼娜年都会出现干旱, 但前者爆发干旱灾害的概率比后者高;秦剑等^[41]指出 Elnino 年云南初夏雨量少, 西太平洋副高偏西、偏强;而 LaNina 年则相反, 云南初夏雨量偏多, 西太平洋副高偏东、偏弱, 同时西南季风建立日期的推迟和季风建立后无明显冷空气活动也会导致云南初夏干旱。此外, Li 等^[44]研究发现云南大部分地区连续最大无雨日数呈增加趋势, 大于 10mm 降水量日数呈减少趋势(1960~2012 年)是云南干旱的重要原因之一。刘瑜等^[44]等研究表明云南年平均降水量趋于减少;季节上, 春、冬两季增加而夏秋两季减少, 区域上, 滇东地区呈明显减少趋势, 这与云南季节和区域干旱特点相一致。再者, 云南降雨量的季节分布不均和地形特殊性(纵向岭谷地形区和干热河谷区^[12]、滇东南喀斯特地形区^[43, 46])也是导致云南旱涝发生的重要原因;此外, 人类活动的影响也是一个不可忽视的重要因素。

前人研究者利用 SPI、PDSI、RDI、SPEI 等^[32, 47]指数研究时, 主要采用 Thornthwaite 和 PenmanMonteith 公式计算潜在蒸

发量, PDSI 对潜在蒸发量表现出低敏感性, 而 SPEI 和 RDI 对潜在蒸发量变化趋势表现十分敏感; RDI 指数利用 Thornthwaite 方程计算时由于过高估计了空气温度的影响而夸大了干旱影响程度。SPI、RDI、SPEI 指数对湿润地区干旱刻画较一致, 而 SPI、RDI 指数刻画相对干旱地区较 SPEI 指数更合理。本文通过 20cm 小型蒸发皿和降水量计算的 RDI 指数与气象灾害大典和相关研究对比发现, 采用 20cm 小型蒸发皿计算的 RDI 指数与气象灾害大典记录的重、特旱涝发生的等级和区域十分一致, 这对云南干旱研究具有重要借鉴价值。

5 结论

(1) 1960~2013 年云南年尺度呈不显著的变干趋势, 春季呈显著的变湿趋势, 夏、秋、冬季呈不显著的变干趋势。春、夏季发生显著的旱涝突变, 春季于 1980 年发生由旱转涝的突变, 夏季于 1965 年发生由涝转旱的突变, 年、秋、冬季突变不显著。年、夏、秋、冬季干旱站次比呈上升趋势, 春季呈下降趋势; 年、春季雨涝站次比呈上升趋势, 夏、秋、冬季呈下降趋势; 2001 年以来发生干旱的站次比较雨涝站次比大。

(2) 年干旱、重旱、特旱频率较高的地区分别为滇西北、滇西南、滇中、滇东; 年雨涝频率以滇西北、滇西南部分地区十分突出, 而滇西南重、特涝频率均十分突出。春季干旱、重旱、特旱频率较高的地区分别为滇西、滇西南、滇中和滇东北; 春季雨涝、重涝、特涝频率较高的地区分别为滇西北和滇西南、滇中和滇西南、滇中和滇东南。夏季干旱、重旱、特旱发生频率较高的地区分别为滇东南、滇中、滇东北; 雨涝、重涝、特涝频率均以滇西北较高, 此外, 滇东南也较高。秋季干旱、重旱、特旱频率较高的地区分别为滇东、滇中和滇东、滇东北; 雨涝、重涝、特涝频率较高的分别为滇中和滇东、滇西北、滇东南。冬季干旱频率、重旱、特旱频率较高的地区分别为滇东和滇西南、滇中、滇东北; 雨涝频率滇西北较低, 其余地区较高, 重涝频率以滇东南较高, 特涝频率以滇西北较高。

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate Change [C] //Cambridge, United Kingdom and New York. NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

[2] 张强, 潘学标, 马柱国, 等. 干旱 [M]. 北京: 气象出版社, 2009: 195.

ZHANG Q, PAN X B, MA Z G, et al. Drought [M]. Beijing: Meteorology Press, 2009: 195.

[3] 王遵娅, 曾红玲, 高歌, 等. 2010 年中国气候概况 [J]. 气象, 2011, 37(4): 439—445.

WANG Z Y, ZENG H L, GAO G, et al. Climatic characters in 2010' China [J]. Meteorological, 2011, 37(4): 439—445.

[4] 李莹, 高歌, 叶殿秀, 等. 2011 年中国气候概况 [J]. 气象, 2012, 38(4): 464—471.

LI Y, GAO G, YE D X, et al. Climatic characters in 2011' China [J]. Meteorological, 2012, 38(4): 464—471.

[5] 王有民, 叶殿秀, 艾婉秀, 等. 2012 年中国气候概况 [J]. 气象, 2013, 39(4): 500—507.

WANG Y M, YE D X, AI W X, et al. Climatic characters in 2012' China [J]. Meteorological, 2013, 39(4) : 500—507.

[6] 王林, 陈文. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征 [J]. 气象科技进展, 2012, 2(4) : 21—26.

WANG L, CHEN W. Characteristics of multi-timescale variabilities of the drought over last 100 years in Southwest China [J]. Advances in Meteorological Science & Technology, 2012, 2(4) : 21—26.

[7] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近 60 a 来中国西南春季持续性干旱异常特征分析 [J]. 干旱区地理, 2015, 38(2) : 215—222.

YANG J H, ZHANG Q, WANG J S, et al. Spring persistent droughts anomaly characteristics of over the southwest China in recent 60 years [J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2) : 215—222.

[8] 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征 [J]. 地理学报, 2011, 66(9) : 1179—1190.

HE J Y, ZHANG M J, WANG P, et al. Climate characteristics of the extreme drought events in Southwest China during recent 50 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9) : 1179—1190.

[9] 何娇楠, 李运刚, 李雪, 等. 云南省 1961—2012 年干旱时空变化特征 [J]. 山地学报, 2016, 34(1) : 19—27.

HE J N, LI Y G, LI X, et al. Temporal and spatial characteristics of droughts over Yunnan Province during 1961—2012 [J]. Mountain Research, 2016, 34(1) : 19—27.

[10] 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.

ZHANG L, WANG J, HUANG Y, et al. Characteristics of drought based on standardized precipitation evapotranspiration index from 1961 to 2010 in Yunnan province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(5) : 141—146.

[11] 吴志杰, 何云玲. 基于 SPEI 的云南中部区域干旱时空变化特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7) : 1238—1245.

WU Z J, HE Y L. Temporal and spatial variation of drought over the central Yunnan plateau based on SPEI [J]. Resources and environment in the Yangtze River Basin, 2015, 24(7) : 1238—1245.

[12] 李运刚, 何娇楠, 李雪. 基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析 [J]. 地理科学进展, 2016, 35(6) : 758—767.

LI Y G, HE J N, LI X. Hydrological and meteorological droughts in the Red River Basin of Yunnan Province based on SPEI and SDI Indices [J]. Progress in Geography, 2016, 35(6) : 758—767.

[13] 赵平伟, 郭萍, 李立印, 等. SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的对比分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1) : 142—149.

ZHAO W P W, GUO P, LI L Y, et al. Comparative of SPEI and SPI index on account of the droughts Southwest Yunnan area

[J]. Resources and environment in the Yangtze River Basin, 2017, 26(1) : 142—149.

[14] 杨晓静, 左德鹏, 徐宗学. 基于标准化降水指数的云南省近 55 年旱涝演变特征 [J]. 资源科学, 2014, 36(3) : 473—480.

YANG X J, ZUO D P, XU Z X. Characteristics of droughts and floods analyzed using the standardized precipitation index in Yunnan Province during the past 55 years [J]. Resources Science, 2014, 36(3) : 473—480.

[15] 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]. 地球信息科学学报, 2016, 18(8) : 1077—1086.

LIU J X, LI L J, LI J Y, et al. 2016. Characteristics of precipitation variation and potential drought—flood regional responses in Yunnan Province from 1954 to 2014 Journal of Geo—information Science, 18(8) : 1077—1086.

[16] 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析 [J]. 气候与环境研究, 2012, 17(3) : 315—326.

YANG H, SONG J, YAN H M, et al. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010 [J]. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(3) : 315—326.

[17] 宋洁, 杨辉, 李崇银. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析 [J]. 大气科学, 2011, 35(6) : 1009—1019.

SONG J, YANG H, LI C Y, et al. A further study of causes of the severe drought in Yunnan Province during the 2009/2010 winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(6) : 1009—1019.

[18] 晏红明, 程建刚, 郑建萌, 等. 2009 年云南秋季特大干旱的气候成因分析 [J]. 大气科学学报, 2012, 35(2) : 229—239.

YAN H M, CHENG J G, ZHENG J M, et al. The climate cause of heavy drought in Yunnan in autumn 2009 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(2) : 229—239.

[19] 陶云, 张万诚, 段长春, 等. 云南 2009—2012 年 4 年连旱的气候成因研究 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2014, 34(6) : 866—874.

TAO Y, ZHANG W C, DUAN C C, et al. Climatic causes of continuous drought over Yunnan Province from 2009 to 2012

[J]. Journal of Yunnan University, 2014, 36(6) : 866—874.

[20] 郑建萌, 张万诚, 陈艳, 等. 2009—2010 年云南特大干旱的气候特征及成因 [J]. 气象科学, 2015, 35(4) : 488—496.

ZHENG J M, ZHANG W C, CHEN Y, et al. Analysis on climatologic characteristics and causes of the severe drought during 2009—2010 in Yunnan province [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(4) : 488—496.

[21] 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 J S, GUO J Y, ZHOU Y W, et al. Progress and prospect on drought indices research [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1) : 60—65.

[22] 张强, 高歌. 我国近 50 年旱涝灾害时空变化及监测预警服务 [J]. 科技导报, 2004, (7) : 21—4.

ZHANG Q, GAO G. The spatial and temporal features of drought and flood disasters in the past 50 years and monitoring and warning services in china [J]. Science and Technology Review, 2004, (7) : 21—4.

[23] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales, paper presented at 8th conference on applied climatology [J]. American Meteorological Society, Anaheim, CA, 1993.

[24] VICENTE—SERRANO S M, LOPEZ—MORENO J I, LORENZO—LACRUZ J, et al. The NAO impact on droughts in the Mediterranean region [J]. Advances in Global Change Research, 2011, 46: 23—40.

[25] TSAKIRIS G, VANGELIS H. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration [J]. European Water, 2005, 9—10: 3—11.

[26] TSAKIRIS G, PANGALOU D, VANGELIS H. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index(RDI) [J]. Water Resources Management, 2007, 21(5) : 821—833.

[27] 王春林, 郭晶, 薛丽芳, 等. 改进的综合气象干旱指数 CI—(new) 及其适用性分析 [J]. 中国农业气象, 2011, 32(4) : 621—626.

WANG C L, GUO J, XUE L F, et al. An improved comprehensive meteorological drought Index CI_ (new) and its applicability analysis [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(4) : 621—626.

[28] 杨丽慧, 高建芸, 苏汝波, 等. 改进的综合气象干旱指数在福建省的适用性分析 [J]. 中国农业气象, 2013, 33(4) : 603—608.

YANG L H, GAO J Y, SU R B, et al. Analysis on the suitability of improved comprehensive meteorological drought index in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4) : 603—608.

[29] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1) : 178—182.

LI W G, CHEN H L, ZHU N H, et al. Analysis of drought monitoring on Hainan Island from standardized precipitation index [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(1) : 178—182.

[30] 赵静, 严登华, 杨志勇, 等. 标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价 [J]. 物理学报, 2015, 64(4) : 378—386.

ZHAO J, YAN D H, YANG Z Y, et al. Improvement and adaptability evaluation of standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64 (4) : 378 —386.

[31] 郑太辉, 陈晓安, 杨洁. 近 50 a 江西省旱、涝变化趋势及驱动因素研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4) : 664—670.

ZHENG T H, CHEN X A, YANG, J. Studies on the shifting trends in droughts and floods of Jiangxi province in recent fifty years and main driving factors [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4) : 664—670.

[32] XU K, YANG D, YABG H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961 — 2012: A climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 26(3) : 253—264.

[33] 秦剑, 琚建华, 解明恩. 低纬高原天气气候 [M]. 北京:气象出版社, 1997: 14—15.

QIN J, JU J H, XIEME, et al. Weather and climate over low latitude plateau [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997: 14—15.

[34] 王栋, 梁忠民, 王靖, 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, 28.

WANG D, LIANG Z M, WANG J, et al. Natural zoning of drought in Yunnan Province based on principal component cluster analysis [J]. South — to — North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2) : 15 —21, 28.

[35] 祁栋林, 李晓东, 肖宏斌, 等. 近 50 a 三江源地区蒸发量的变化特征及其影响因子分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(9) : 1613—1620.

QI D L, LI X D, XIAO H B, et al. Study on changing characteristics and impact factor of evaporation over three —river source area in recent 50 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(9) : 1613 —1620.

[36] 祁栋林, 肖宏斌, 李晓东, 等. 1964 ~ 2013 年青海省不同生态功能区蒸发皿蒸发量的变化特征 [J]. 干旱气象, 2016, 34(2) : 234—242.

QI D L, XIAO H B, LI X D, et al. Variation characteristics of pan evaporation in different ecological function areas of Qinghai Province During 1964—2013 [J] . Journal of Arid Meteorology, 2016. 34(2) : 234—242.

[37] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J] . Econometrica, 1945, 13(3) : 245—259.

[38] KENDALL M G. Rank correlation methods [M] . Griffin, London, UK, 1975.

[39] GILBERT R O. Statistical methods for environmental pollution monitoring [M] . New York: Van Nostrand Reinhold, 1987:208—217.

[40] 刘建华. 中国气象灾害大典·云南卷 [M] . 北京: 气象出版社, 2006: 47—88.

LIU J H. China Meteorological Disaster(Yunnan volume) [M] . Beijing: China Meteorological Press, 2006: 47—88.

[41] 秦剑, 解明恩, 刘瑜, 等. 云南气象灾害总论 [M] . 北京: 气象出版社, 2000: 18—33.