

引用格式: 吕潇然, 尹晓天, 宫阿都, 等. 基于植被状态指数的云南省农业干旱状况时空分析[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(12): 1634-1644. [Lv X R, Yin X T, Gong A D, *et al.* 2016. Temporal and spatial analysis of agricultural drought in yunnan province based on vegetation condition Index. Journal of Geo-information Science, 18(12): 1634-1644.] DOI:10.3724/SPJ.1047.2016.01634

基于植被状态指数的云南省农业干旱状况时空分析

吕潇然^{1,2,3}, 尹晓天^{1,2,3}, 宫阿都^{1,2,3}, 王前锋⁴, 李 静^{1,2,3}, 张 慧^{3,5}

1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 4. 福州大学 环境与资源学院, 福州 350116; 5. 北京社会管理职业学院, 北京 101601

Temporal and Spatial Analysis of Agricultural Drought in Yunnan Province based on Vegetation Condition Index

LV Xiaoran^{1,2,3}, YIN Xiaotian^{1,2,3}, GONG Adu^{1,2,3*}, WANG Qianfeng⁴, LI Jing^{1,2,3} and ZHANG Hui^{3,5}

1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China;
2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing, 100875;
3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing, 100875;
4. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, 350116;
5. Beijing Social Administration Vocational College, Beijing, 101601

Abstract: Considering the normalization characteristic of drought in Yunnan Province during recent years, it's very significant to study the drought in Yunnan province. Nowadays, major studies focus on the meteorological drought in Yunnan Province and the studies focus on agricultural drought in Yunnan Province are few. But the data used in the study methods of meteorological drought can't represent vegetation growth state. Also they cannot be used to evaluate the effect of drought on vegetation or analyze temporal and spatial distribution of agricultural drought in Yunnan Province. Because of these disadvantages, this paper calculated the vegetation condition index(VCI) of Yunnan Province during 2004–2013, identified agriculture drought events and analyzed temporal and spatial distribution of agricultural drought. Before the temporal and spatial distribution was analyzed, agricultural drought events identified by VCI were compared with meteorological drought events identified by the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and the Pearson correlation coefficient was calculated between VCI and precipitation to evaluate the capability of VCI index. We found the similarities and differences between these two types of drought events and analyzed the possible reasons. The results revealed that there were differences between drought events identified by these two indices because drought events identified by SPEI index are based on meteorological elements such as precipitation and temperature while drought events identified by VCI index are based on vegetation growth state which is not only affected by meteorological elements. The low Pearson correction coefficient also demonstrates precipitation is just one of the key factors which affect vegetation growth state. Though there are differences between these two types of drought events, VCI and SPEI can both monitor drought and identify classical drought events well. Based on this conclusion, temporal and spatial distribution characteristics of agricultural drought in Yunnan Province were analyzed using drought frequency index and drought-area-ratio index. The results showed that: drought frequency of spring and winter is higher than that of autumn and the drought frequency of summer is the lowest. The spatial distribution of drought frequency during spring, summer and winter is relatively uniform while the drought frequency of northern Yunnan during autumn is higher than that of southern Yunnan. Overall, the drought frequency of northern Yunnan is higher than southern Yunnan and drought-area-ratio of Yunnan during 2004-2013 shows a decreasing-increasing and fluctuating trend. Drought-area-ratio index of spring and winter is the highest whose values are 46.63% and 47.18%, respectively. Both of them show a

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-06-29.

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(201411003); 中央高校基本科研业务费专项项目。

作者简介: 吕潇然(1993-), 女, 硕士生, 研究方向为土壤水分反演与旱灾。E-mail: 201421480013@mail.bnu.edu.cn

*通讯作者: 宫阿都(1976-), 男, 副教授, 研究方向为灾害遥感。E-mail: gad@bnu.edu.cn

decreasing trend. Drought-area-ratio index of summer is the lowest whose value is 43.81% and shows an increasing trend. The value of drought-area-ratio index of autumn is between spring and summer and has a decreasing tendency. Based on these results, agricultural drought of spring and winter is most prone to happen and the extent is the maximum while the agricultural drought of summer is least prone to happen and the extent is the minimum. Since vegetation growth state is not only affected by drought but also can be affected by plant diseases and insect pests, irrigation, frozen injury and improper fertilization, this study monitoring agricultural drought based on VCI index has some limitations. Future work should focus on the physical mechanism of agricultural drought and the biophysical response of vegetation to drought in order to monitor and forecast agricultural drought more accurately.

Key words: Vegetation Condition Index (VCI); agricultural drought; Yunnan Province; temporal and spatial characteristics; MODIS

***Corresponding author:** GONG Adu, E-mail: gad@bnu.edu.cn

摘要: 本文首先计算了云南省 2004–2013 年农业干旱指数 VCI, 然后使用 Pearson 相关系数评价降水与 VCI 的相关性, 基于 VCI 识别云南省 2004–2013 年农业干旱事件, 最后, 与 SPEI 气象干旱识别结果进行对比分析, 在 VCI 农业干旱识别的基础上, 使用干旱频率和干旱面积占比指标分析了云南省 2004–2013 年农业干旱时空特征。结果表明: 降水只是影响 VCI 指数的重要因素之一; VCI 和 SPEI 指数均能够较好对干旱进行监测并识别典型干旱, 但两者的识别结果存在差异; 云南省农业干旱频率在春冬两季较高, 夏季较低, 秋季介于夏季和春冬季之间; 春夏冬三季农业干旱频率空间分布较为均匀, 秋季农业干旱频率呈南低北高的分布态势, 整体上北部干旱频率高于南部; 2004–2013 年云南省整体干旱面积占比呈现先减小后增加再波动的趋势, 春冬两季整体干旱面积占比最高, 分别为 46.63% 和 47.18%, 呈现下降趋势, 夏季整体干旱面积占比最低, 为 43.81%, 呈现上升趋势, 秋季整体干旱面积占比介于冬春季和夏季之间, 为 45.74%, 呈现下降趋势。总之, 云南省农业干旱春冬易发性最高, 影响范围最大, 夏季易发性最低, 影响范围最小。

关键词: 植被状态指数(VCI); 农业干旱; 云南省; 时空特征; MODIS

1 引言

旱灾是一种常见的自然灾害, 具有很大影响, 据统计中国每年遭受各种自然灾害影响的农田面积和粮食作物减产损失中, 旱灾占一半以上^[1]。一般将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和水分供给干旱^[2]4 类。目前, 区域尺度上的干旱研究主要集中在气象干旱和农业干旱 2 个方面^[3]。

遥感是农业干旱监测的重要手段, 基于遥感数据的农业干旱监测方法主要分为热惯量法、植被指数法、微波遥感方法和冠层温度方法^[4]4 类。植被指数直接反映植被生长状态, 而植被生长状态与土壤水分密切相关, 同时植被指数也具有计算简单、可获得性强的优点, 因此基于植被指数的遥感监测是监测农业干旱的重要途径。应用较为广泛的基于植被指数的农业干旱监测指数是 Kogan 提出的植被状态指数^[5] (Vegetation Condition Index, VCI), VCI 指数能够反应短期天气信号如降水减少对植被的影响。Kogan 以美国为研究区, 发现 VCI 指数能够很好地监测大区域尺度干旱, 并且与作物产量呈现很好的相关性^[6]; Tagel^[7]、Farai Kuri^[8]和 Parinaz^[9]分别使用 VCI 指数对不同研究区的干旱及时空变化进行研究, 发现 VCI 指数能够更好地识别出干旱对作物的影响进而对农业干旱进行监测^[6,8]。

云南省受地理环境、气候条件和人为因素的影响, 干旱发生频率高, 平均每年有 50 个县受灾^[10], 给当地社会发展尤其是农业生产造成了严重影响。目前, 国内外已有多位学者对云南省干旱进行研究, 任菊章^[11]、韩元元^[12]、王佳津^[13]、张冬冬^[14]、张雷^[15]分别基于相对湿润度指数、SPI、Palmer 和 SPEI 指数对 1961–2010 或者 1954–2010 年云南省气象干旱时空特征进行分析; Dongdong Zhang^[16]和 HuiCong Jia^[17]分别基于综合气象干旱指数和降水数据评估云南省气象干旱风险; Sawaid Abbas^[18]和王海^[19]分别基于归一化植被供水指数和 TVDI 指数从农业干旱的角度对云南省 2009–2010 年旱灾进行时空分析。现有的云南省干旱研究多集中在气象干旱领域, 关于农业干旱的研究较少, 但是气象干旱方法使用的数据无法代表植被的生长状况、无法评价干旱对植被的影响, 无法直接分析云南省农业干旱的时空特征。

因此, 本文以云南省为研究区, 采用 VCI 指数作为农业干旱监测指标, 对 VCI 和降水进行 Pearson 相关分析, 评价降水对 VCI 的影响; 识别云南省 2004–2013 年农业干旱事件, 并与 SPEI_3 识别出的气象干旱事件进行对比分析。在此基础上, 将干旱频率和站次比气象干旱定义引入为农业干旱的干旱频率和干旱面积占比指标, 分析农业干旱的时空

特征,为农业干旱预警提供参考。

2 研究区和数据

2.1 研究区

本文选择云南省作为典型研究区(图1)。云南地处我国西南边陲,经纬度范围为 $97^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}$ 。气候类型复杂,兼具低纬气候、季风气候、山原气候的特点。全省多年年均降水量为1258 mm,降水时空分布极不均匀^[20],南多北少,夏多冬少。有明显的干季、雨季。气温南高北低,年较差小,日较差大,春温高于秋温。云南省的气候特点决定了其是干旱多发区,通过资料分析也证实,近年来云南省干旱呈“常态化”的特点^[21]。

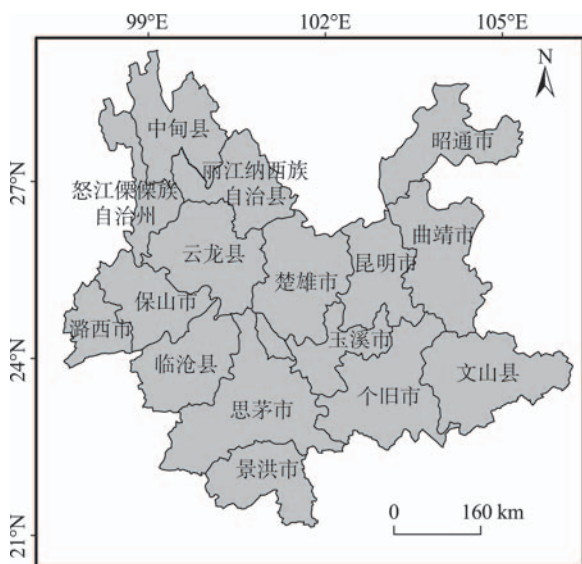


图1 研究区(云南省)概况图

Fig. 1 Map of Study area

2.2 数据

2.2.1 MODIS数据

MODIS(Moderate resolution imaging spectroradiometer)搭载于EOS Terra和Aqua两颗卫星上,具有36个光谱通道,每1-2d可获取一次全球地表数据。因其光谱范围广,覆盖范围大,数据更新频率快并且数据接收免费的优点对于农业干旱研究具有独特优势。

MOD13A3数据是基于限定角度最大值合成法(Constrained view angle- Maximum Value Composite, CV-MVC)得到的NDVI产品,空间分辨率为1km,时间分辨率为月,每年共12个数据。

本文使用2004-2013年MOD13A3NDVI产品

对云南省农业干旱进行研究。

2.2.2 气象数据

从中国气象科学数据共享网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)提供的中国地面气候资料日值数据集中下载1984-2013年云南省气象站点数据,包括气温、降水等气象要素。下载的数据中某些气象站点的数据采集时间并不能完全涵盖研究时段,因此剔除掉不能涵盖研究时段的站点,最终使用的气象站点为29个,站点分布如图2所示。

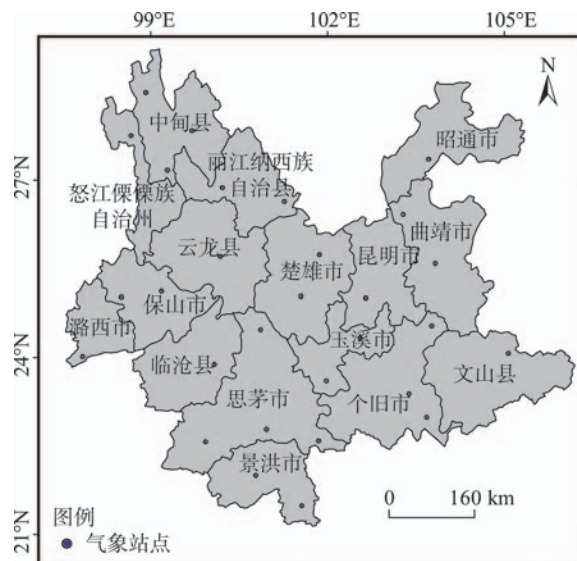


图2 云南省气象站点分布

Fig. 2 Distribution of meteorological stations in Yunnan Province

3 研究方法

3.1 农业干旱状态识别方法

植被覆盖区的植被指数变化由2类因素导致:生态系统因素和极端天气因素。极端天气因素并不能通过植被指数(如NDVI)直接监测。Kogan于1993年提出VCI指数^[5],假设VCI指数的变化只受天气因素的影响,从而将生态系统因素与极端天气因素剥离开,评价极端天气对植被的影响,监测农业干旱。VCI指数越小表明干旱程度越大。VCI指数的计算方法如式(1)所示。

$$VCI_j = \frac{(NDVI_j - NDVI_{\min})}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (1)$$

式中: $NDVI_j$ 为某年时期 j 的NDVI值; $NDVI_{\max}$ 为多年的时期 j 的NDVI最大值; $NDVI_{\min}$ 为多年的时期 j 的NDVI最小值。表1是Kogan提出的VCI指数农业干旱判别标准^[6]。

表1 农业干旱判别标准

Tab. 1 Discrimination standard of agriculture drought

VCI指数	干旱状态
≤ 0.35	干旱
> 0.35	非干旱

3.2 气象干旱状态识别方法

常用的气象干旱指数有标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)、帕尔默干旱指数(PDSI)、标准化降水蒸散指数(the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)和降水距平指数等。其中SPEI指数由Vicente-Serrano^[22]于2010年提出,SPEI在SPI指数的基础上考虑温度对干旱的影响,是应用于干旱趋势分析的较新并且较为理想的气象干旱指数,在干旱评估和水资源管理领域得到广泛应用^[23-25]。SPEI基于多年的月或周时间尺度降水和温度气象数据计算,首先基于Penman-Monteith方程计算区域潜在蒸散,进而使用降水数据计算每月或每周的水分亏损/盈余量并累计为不同时间尺度的水分亏损/盈余量,最后将水分亏损或盈余量时间序列调整为log-logistic概率分布,计算出每月或每周不同时间尺度的SPEI值。SPEI指数气象干旱判别标准^[22],如表2所示。

表2 气象干旱判别标准

Tab. 2 Discrimination standard of meteorological drought

SPEI指数	干旱状态
≤ -0.5	干旱
> -0.5	非干旱

3.3 农业干旱发生程度评估方法

本文采用干旱频率和干旱面积占比2个指标来评价2004-2013年云南省农业干旱发生程度。

3.3.1 干旱频率

类似于气象上干旱频率 P_i 的定义^[26],定义干旱频率评价云南省各地区在2004-2013年内农业干旱发生的频繁程度,使用式(2)计算。

$$P_i = \frac{n}{10} \times 100\% \quad (2)$$

式中: n 代表2004-2013年发生干旱的总年数。由式(2)可知,干旱频率指示研究时段内干旱的易发性。干旱频率高说明在研究时段内多次发生干旱,干旱频率低说明在研究时段内干旱发生次数少。

基于式(2)计算2004-2013年云南省春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)和冬季(12-2月)的干旱频率。

3.3.2 干旱面积占比

类似于气象上干旱站次比的定义,用云南省发生农业干旱的面积占云南省总面积的比例来评价农业干旱发生范围的大小^[26],定义为干旱面积占比,使用式(3)计算。

$$P_j = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m 代表云南省发生农业干旱的面积; M 代表云南省的总面积; j 代表不同的年(月、季)。由式(3)可知,干旱面积占比不仅表示某一区域干旱范围的大小,也间接反映干旱的严重程度,干旱面积占比越大,说明该区域大面积发生干旱,干旱影响范围大,较为严重。

本文分别计算了2004-2013年每年的干旱面积占比与每个季节的干旱面积占比。

4 结论与分析

4.1 VCI指数与降水量Pearson相关分析

在对比分析农业干旱和气象干旱识别结果前,首先定量分析气象干旱关键诱导因子之一降水对VCI指数的影响,因此对云南省29个气象站点的VCI和不同时间尺度的累积降水量进行Pearson相关分析。结果如表3所示。

从表3可得到如下结论:① VCI和降水相关性较低,相关系数最高只有0.2498,这说明降水只是影响植被生长状态的关键因素之一,植被生长状态不仅受降水减少所导致的干旱的影响,病虫害、灌溉、施肥不当、田间管理等因素均会导致植被生长状态的变化。② 仅有6个站点VCI与当月降水相关系数最高,其余站点Pearson系数均在多月尺度取得最大值,这说明VCI对降水响应具有滞后性。

4.2 2004-2013年农业干旱指数和气象干旱指数干旱事件识别对比分析

SPEI常用的时间尺度为1、3、6、12个月,SPEI₁仅考虑当月标准化降水量,SPEI_n($n > 1$)考虑当月与前 $n-1$ 个月的累积标准化降水量。不同时间尺度的SPEI指数识别的干旱起始终止时间和严重程度不同^[24],随着时间尺度的增加,识别的干旱事件数目减小,起始终止时间和重现期增加^[27]。由于气象干旱指数和农业干旱指数分别基于不同因素识别和评价干旱,多位学者研究了气象干旱指数与农业干旱指数的关系,Singh^[28]、Bhuiyan^[29]研究表明VCI

表3 云南省气象站点VCI与降水Pearson相关分析

Tab. 3 Pearson correlation analysis of VCI and precipitation of meteorological stations in Yunnan Province

站点名称	VCI与当月降水相关系数	VCI与前2个月累积降水相关系数	VCI与前3个月累积降水相关系数	VCI与前4个月累积降水相关系数
德钦	0.0110	0.0390	0.0195	0.0433
贡山	-0.0890	-0.0838	-0.0645	-0.0373
中甸	-0.0600	-0.0794	-0.0579	-0.0679
维西	-0.0230	-0.0162	-0.0741	-0.0841
昭通	0.0856	0.0594	-0.0126	-0.0653
丽江	0.1067	0.1542	0.1798	0.1942*
华坪	0.0425	0.0075	-0.0397	-0.0635
会泽	0.1517	0.1738	0.1680	0.1566
腾冲	-0.0844	-0.0453	-0.0311	-0.0430
保山	0.1214	0.1548	0.1889*	0.1894*
大理	0.0415	0.0400	0.0706	0.0709
元谋	0.0778	0.1768	0.1382	0.0815
楚雄	-0.0207	0.0044	0.0308	0.0596
昆明	0.0999	0.0638	-0.0076	-0.0833
沾益	0.1050	0.2498**	0.2240*	0.2235*
瑞丽	0.1300	0.1608	0.1879*	0.2012*
景东	0.0100	-0.0373	-0.0425	-0.0396
玉溪	0.0350	0.0984	0.1059	0.0957
泸西	-0.0126	-0.0379	0.0026	0.0458
临沧	-0.0228	0.0022	-0.0153	-0.0469
澜沧	-0.0863	-0.0372	0.0567	0.0907
景洪	0.1079	0.0635	0.0259	0.0081
思茅	-0.0536	-0.1290	-0.1518	-0.1239
元江	0.0775	0.0967	-0.0081	0.0294
勐腊	0.0369	0.0861	0.0983	0.0964
江城	0.0871	0.0911	0.1078	0.1145
蒙自	-0.0367	-0.0459	-0.0467	-0.0016
屏边	-0.1179	-0.1282	-0.0768	-0.0626
广南	-0.1081	-0.0648	-0.0138	0.0134

注:**表示双尾检验显著性水平为0.01;*表示双尾检验显著性水平为0.05

与水文、气象干旱指数的相关性很弱;Cui Hao^[30]以中国西南地区为研究区,发现SPEI_3和SPEI_6与农业干旱指数VCI相关性最高,Zhiyong Wu^[27]以中国西南地区为研究区发现SPEI_3与农业干旱指数土壤水分异常百分比(Soil moisture anomaly percentage index, SMAPI)相关性最好。借鉴已有研究成果,本文分别计算2004–2013年研究区VCI和SPEI_3、SPEI_6的相关系数,结果如表4所示。

从表4可看出,VCI与SPEI_3、SPEI_6的相关系数均很低,这和Singh、Bhuiyan的研究相符,但

表4 VCI与SPEI_3、SPEI_6相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between VCI and SPIE_3、SPEI_6

SPEI指数	相关系数
SPEI_3	0.1699
SPEI_6	0.1457

SPEI_3与VCI的相关系数略高于SPEI_6,因此本文使用SPEI_3作为气象干旱监测指数。

图3是2004–2013年共120个月的云南省VCI和SPEI_3时间序列图,根据表1和表2给出的干旱指标判别标准,分别对气象干旱和农业干旱进行识别。

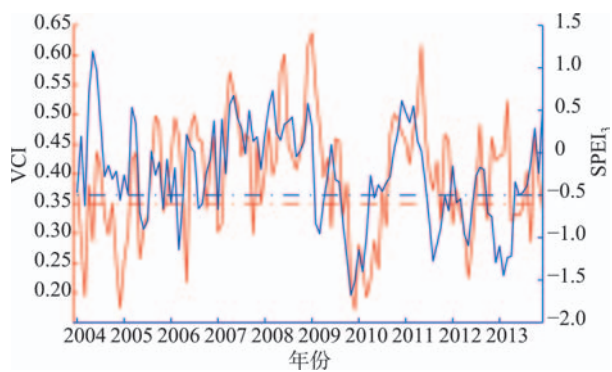


图3 2004–2013年云南省VCI和SPEI_3时间序列图
Fig. 3 Time series of VCI and SPEI_3 from 2004 to 2013 in Yunnan province

从图3可看出,除去2012年12月到2013年3月,2个指数的变化趋势不同,VCI和SPEI_3呈现基本一致的变化趋势。为了对2种干旱事件识别结果进行精确对比分析,统计2个指数所识别的干旱事件及干旱事件的起始终止时间,将结果分为共同识别的干旱事件、VCI识别但SPEI_3未识别和SPEI_3识别但VCI未识别的干旱事件3类,如表5所示。

从表5可知,VCI和SPEI_3所识别的干旱事件及日期并不完全相同,对于前人研究中已记录的典型干旱事件:2004年12月干旱^[31]、2005年5–7月气象干旱^[30]、2009年9月至2010年3月^[16]、2011年6月–2011年9月^[17]、2012年1月–2012年5月^[17]、2012年10–11月^[17]和2013年1–5月干旱^[17],除了2011年6–9月干旱仅仅被SPEI_3指数识别,其他的典型干旱均被2个指数识别,但是干旱事件的持续时间有所差异。

VCI识别但SPEI_3未识别的干旱事件可分为2类:①多月尺度的干旱,2004年8–9月和2005年1–

表5 2004–2013年农业干旱事件与气象干旱事件统计表
Tab. 5 Statistics of agriculture drought events and meteorological drought events during 2004-2013

共同识别的干旱	VCI识别	SPEI_3识别
	SPEI_3未识别	VCI未识别
2004年3月	2004年2月	2006年1月
2004年12月	2004年5月	2009年2–4月
2005年5–7月	2004年8–9月	2011年7–9月
2005年11月	2004年11月	2011年11–12月
2006年3–5月	2005年1–2月	2012年11–12月
2006年8–10月	2007年10月	2013年1–3月
2007年1–2月	2009年6月	
2009年9–12月	2010年8月	
2010年1–5月	2013年9月	
2011年10月	2013年12月	
2012年1–6月		
2012年10月		
2013年4–7月		
共计35个月	共计12个月	共计14个月

2月；②月尺度的零星干旱。对于2005年1–2月VCI识别但SPEI_3未识别的干旱,这是由于农业干旱相对于气象干旱的延迟效应所导致^[3],从表5可看出,2004年12月发生气象干旱和农业干旱,当2005年1月降水增加气象干旱结束后,植被并不能即刻恢复到健康状态,植被指数低,仍显示为农业干旱状态。对于2004年8–9月干旱和1个月尺度的零星干旱,主要原因为:①植被状态不仅受降水的影响,其他因素如病虫害、施肥不当等的影响,也会导致NDVI减小,VCI减小,识别为农业干旱^[32];②NDVI数据本身的系统误差也会造成误判。

SPEI_3识别但VCI未识别的干旱事件主要为多月尺度干旱,对于此类干旱,主要是由2个原因造成:①灌溉影响,由于VCI基于植被状态监测干旱,因此当降水减少时,农田管理如灌溉措施,仍能保证或者短时间内保证植被的正常生长,因此监测到的农业干旱历时短甚至无农业干旱发生;②植被对降水减少响应的滞后性,植被的生理特性使得植被对降水减少的响应需要一定时间,因此会出现当SPEI_3指数识别为气象干旱时,所对应的VCI指数并未指示发生了农业干旱。

整体而言,VCI指数和SPEI_3指数均能够较好地监测干旱,并识别同一典型干旱事件,但由于VCI和SPEI_3分别从不同的方面对干旱进行监测,因此识别的干旱事件以及干旱事件的起始终止日

期存在差异^[32],这和4.1节中VCI与降水具有较低相关性的结论相符。

4.3 基于干旱频率的农业干旱空间特征分析

使用3.3.1节的方法,计算云南省春季(3–5月)、夏季(6–8月)、秋季(9–11月)和冬季(12–2月)的农业干旱频率并统计不同干旱频率区间的面积百分比,如图4、5和表6所示。

从图4、5和表6可看出,冬春两季干旱频率较高,冬春季干旱频率均主要分布在30%~75%之间,面积百分比分别为89.301%和92.108%;夏秋两季干旱频率较低,夏秋季干旱频率均主要分布在15%~60%之间,面积百分比分别为94.701%和91.57%。

春季干旱频率面积百分比取得峰值的干旱频率区间为45%~60%。干旱频率在空间上分布比较均匀,高值区域主要分布在云南省北部和西南部,东南部干旱频率较低。夏季,受海洋气团的影响,云南省受赤道低压带和副热带高压天气系统的控制,降水增多,日照小,进入雨季^[33],夏季整体干旱频率较春季明显降低,面积百分比取得峰值的干旱频率区间为30%~45%,并且干旱频率区间为15%~30%的面积百分比为四季最高值,空间分布较均匀,高值区域主要分布在玉溪市北部和昆明市南部。秋季干旱频率较夏季呈增加趋势,面积百分比取得峰值的干旱频率区间为45%~60%,干旱频率呈现北高南低的空间分布模式;冬季由于受到西方干暖气团和北方干冷气团的影响,云南省主要受西风带天气系统控制,降水少,日照充足,进入干季^[34]。从图4(d)可看出,冬季干旱频率较秋季增大,面积百分比取得峰值的干旱频率区间为45%~60%,并且干旱频率区间为60%~75%的面积百分比为四季最高值,云南省南部干旱频率较秋季大幅度增加,干旱频率的空间分布基本均匀,只有云南省东南角的文山县区域干旱频率较低。

综上所述,云南省农业干旱频率在春季和冬季较高,空间分布相对均匀,秋季干旱频率低于冬春两季,空间分布呈现南低北高的态势,夏季干旱频率最低,空间分布相对均匀。从空间分布上看,整体上云南省北部干旱频率高于南部。其中,西北部夏季干旱频率较低,春秋冬三季干旱频率较高;西南部夏秋两季干旱频率较低,春冬两季干旱频率较高;东北部和东南部各季节间干旱频率相差不大。

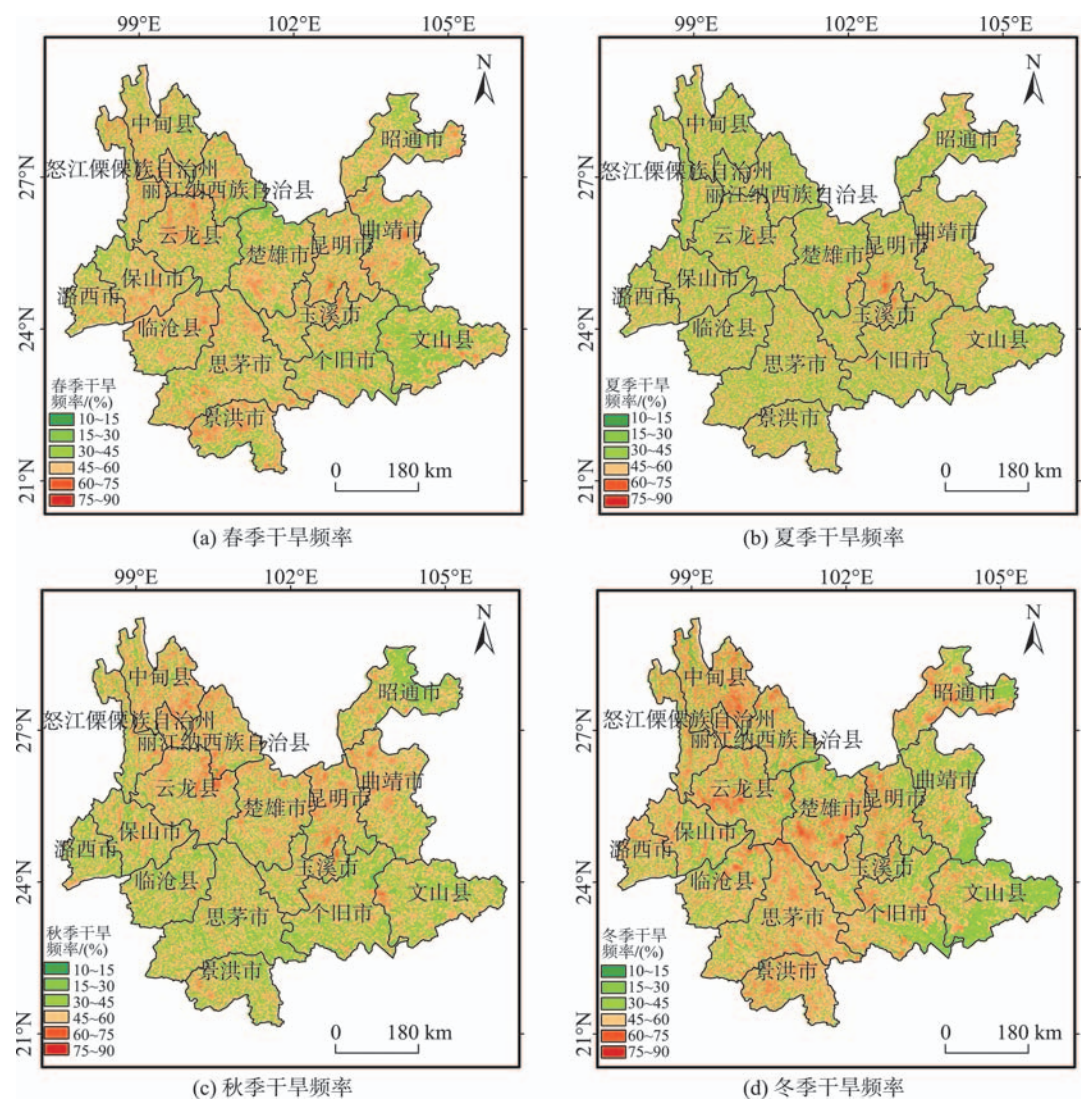


图4 云南省2004–2013年不同季节干旱频率图

Fig. 4 Maps of drought frequency of each season during 2004–2013 in Yunnan Province

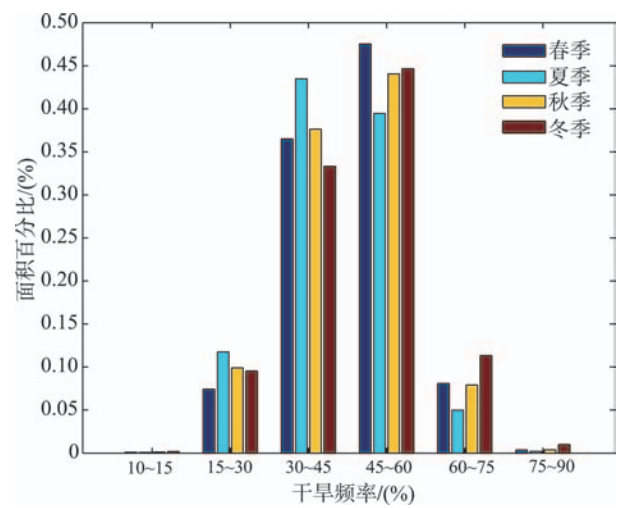


图5 云南省干旱频率面积百分比

Fig. 5 Area percentage of different drought frequency in Yunnan Province

表6 云南省干旱频率面积百分比
Tab. 6 Area percentage of different drought frequency in Yunnan province

区间	春季/(%)	夏季/(%)	秋季/(%)	冬季/(%)
10%~15%	0.108	0.097	0.141	0.192
15%~30%	7.420	11.758	9.900	9.531
30%~45%	36.493	43.478	37.618	33.305
45%~60%	47.523	39.465	44.052	44.656
60%~75%	8.092	4.997	7.906	11.340
75%~90%	0.364	0.205	0.382	0.976

4.4 基于干旱面积占比的农业干旱时间特征分析

使用3.3.2节的方法,计算云南省2004–2013年以年和季节为单位的农业干旱面积占比得到图6、7。

4.4.1 干旱面积占比年际变化

云南省多年平均整体干旱面积占比为45.84%。

如图6所示,2004、2005、2010和2012年是干旱面积占比最高的年份,其值均超过了50%。从年际变化上看,2004–2013年均干旱面积占比呈先减小后增加再减小再增加的波动趋势。2004–2008年干旱面积占比整体呈下降趋势,由55%左右下降到35%左右,干旱强度呈降低趋势;2009年干旱面积占比开始上升,2010干旱面积占比达到52%左右,2011年干旱面积占比下降到39%左右,2011–2012年干旱面积占比上升,在2009–2013年内,干旱强度呈波动趋势。

4.4.2 干旱面积占比季节变化

在干旱面积占比年际变化分析的基础上,分析干旱面积占比的季节间变化和同一季节干旱面积占比的年际变化。图7是2004–2013年云南省不同季节的干旱面积占比时间序列图,表7是2004–2013年云南省不同季节的平均干旱面积占比。

从图7可看出,对于春季,2004、2006、2010和2012年干旱面积占比超过50%,十年间整体呈略微下降的趋势;对于夏季,2005、2010和2013年干旱

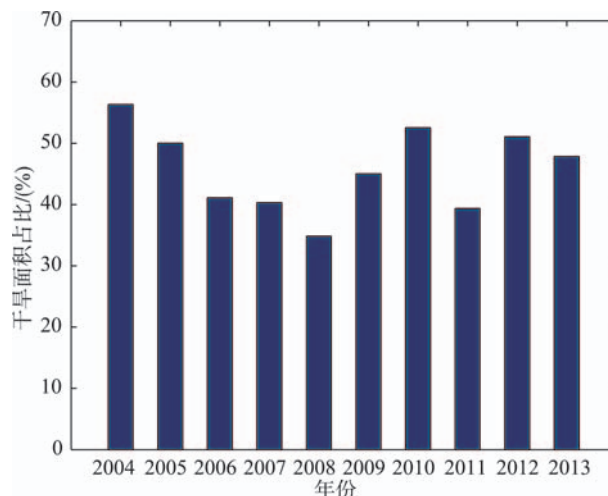


图6 云南省干旱面积占比年际变化图

Fig. 6 Interannual variation of drought-area-ratio in Yunnan province

面积占比超过50%,10年间整体呈增加趋势;对于秋季,2004年和2009年干旱面积占比超过50%,整体呈下降的趋势;对于冬季,2004、2005、2007和2010

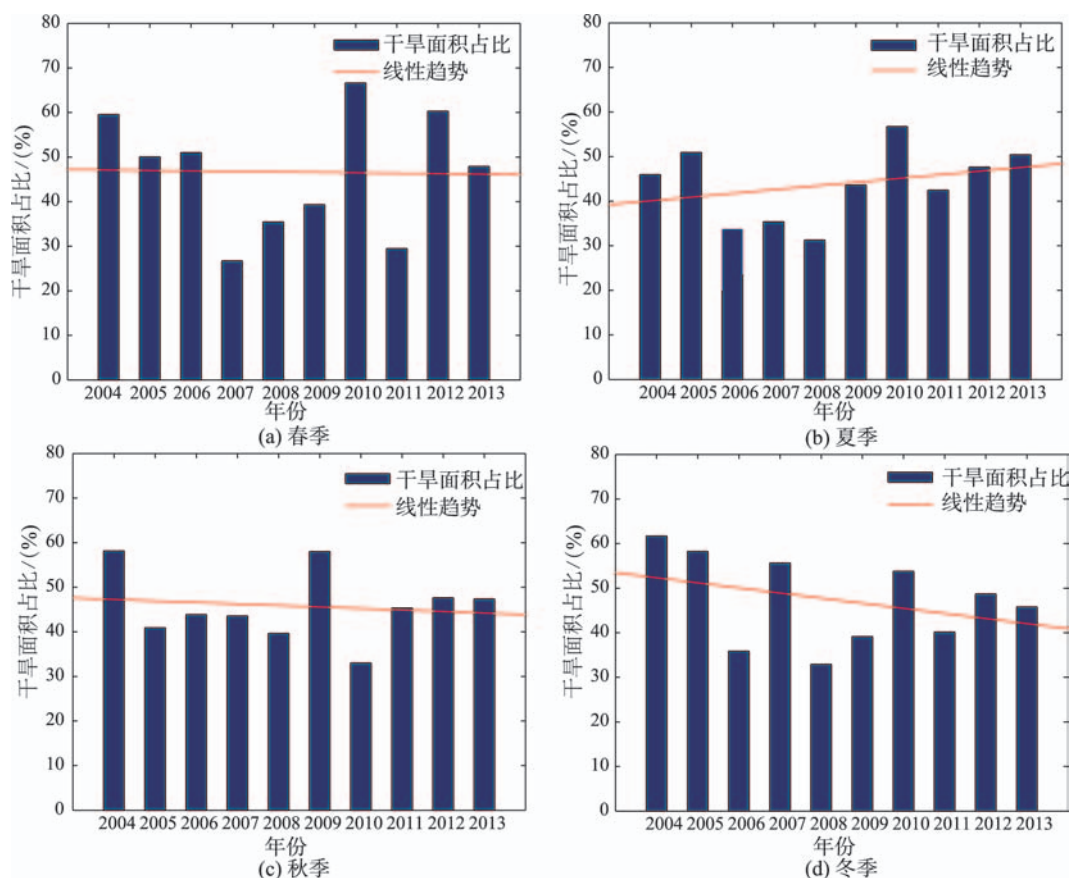


图7 云南省不同季节干旱面积占比时间序列

Fig. 7 Time series of drought-area-ratio in Yunnan province by seasons

表7 云南省2004–2013年不同季节平均干旱面积占比
Tab. 7 Average drought-area-ratio in Yunnan Province
by seasons during 2004-2013

季节	干旱面积占比/(%)
春季	46.63
夏季	43.81
秋季	45.74
冬季	47.18

年干旱面积占比超过50%，整体呈下降趋势。从表7可知，冬季干旱面积占比最大，春季干旱面积占比次之，秋季干旱面积占比小于春季，夏季干旱面积占比最小。因此，云南省冬季和春季农业干旱范围较大，秋季农业干旱范围略低于春冬两季，夏季农业干旱范围最小。

分析同一年份不同季节干旱面积占比的相对大小发现，2004、2006、2008和2012年夏季干旱面积占比最低，其他年份夏季干旱面积占比居中；2006、2010和2012年春季干旱面积占比最大，2007、2009和2011年春季干旱面积占比最低；2004、2005、2007和2013年冬季干旱面积占比最高，其他年份冬季干旱面积占比居中；2008、2009和2011年秋季干旱面积占比最高，2005年秋季干旱面积占比最低，其他年份干旱面积占比居中。干旱面积占比的季节间变化再次论证了云南省冬季和春季农业干旱状况较为严重，干旱范围较大，夏季农业干旱范围最小，秋季农业干旱范围介于冬春季和夏季之间。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文计算云南省2004–2013年农业干旱指数VCI，使用Pearson相关系数评价降水与VCI的相关性，基于VCI指数识别云南省农业干旱，并将识别结果与基于SPEI_3气象干旱指标的气象干旱识别结果进行对比分析；在此基础上，参照气象上干旱频率和站次比指标的定义并提出农业干旱的干旱频率和干旱面积占比指标，对云南省2004–2013年农业干旱的时空分布特征进行分析，主要结论如下：

(1)降水与VCI指数具有较低的相关性，降水只是影响植被状态的关键因素之一。VCI指数和SPEI_3指数均能较好地监测干旱并识别同一典型干旱事件。但2个指数的识别结果并非完全相同，

这是由于VCI指数和SPEI_3指数是分别基于植被生长状态和气象要素对干旱进行识别。降水与VCI指数相关性分析说明降水只是影响植被生长状态的关键因素之一，其他因素如病虫害、施肥不当、田间管理等均会影响植被状态，从而导致VCI识别为干旱但SPEI_3不识别为干旱的情况。当降水减少时，人为措施如灌溉会保证植被状态不受影响或受影响较轻，从而导致VCI监测到的农业干旱历时短甚至无农业干旱发生。同时降水与VCI较高的相关系数大部分出现在多月尺度，这说明植被状态对降水的响应有滞后性，从而导致VCI识别的农业干旱时间滞后于SPEI_3识别的气象干旱。

(2)云南省农业干旱频率在不同季节具有不同的空间分布特点，春冬季干旱频率较高，空间分布相对均匀；秋季干旱频率低于冬春两季，空间分布呈南低北高的态势；夏季干旱频率最低，空间分布相对均匀。从空间分布上看，云南省整体上北部干旱频率高于南部。其中西北部夏季干旱频率较低，春秋两季干旱频率较高；西南部夏秋两季干旱频率较低，春冬两季干旱频率较高；东北部和东南部各季节间干旱频率相差不大。

(3)云南省多年平均整体干旱面积占比为45.84%。2004–2008年，干旱面积占比整体呈下降趋势，2009–2013年，干旱面积占比呈波动趋势；不同季节干旱面积占比的年际变化显示冬春季干旱面积占比较高，干旱范围大并且均呈下降趋势；夏季干旱面积占比最低，干旱范围小但呈上升趋势；秋季干旱面积占比介于中间，干旱范围呈下降趋势。

(4)基于干旱频率和干旱面积占比两个指标可以发现，云南省冬季和春季农业干旱易发性高，并且影响范围大，夏季农业干旱易发性最低，影响范围最小，秋季农业干旱易发性和影响范围介于冬春和夏季中间^[35]。

5.2 讨论

本文基于VCI指数监测2004–2013年云南省农业干旱及其时空特征，但是VCI指数是植被生长状态的函数，而植被生长状态的优劣不仅仅受干旱影响，病虫害、施肥不当、冻害或者灌溉等其他因素也会引起植被生长状态变化。因此VCI反映的是植被生长状态的综合信息，而不只是降水等气象因素对植被状态的影响，本文仅基于VCI指数监测农业干旱具有一定的局限性。

为了深入研究农业干旱,较好地掌握农业干旱的发生规律,下一步应该从农业干旱发生的物理机制入手,研究剔除掉其他环境因素的影响,仅考虑降水、温度等气象因子对植被状态影响的农业干旱指标,同时研究植被对干旱的生物物理响应过程,结合以上2点更好地研究农业干旱,进而为农业干旱的精确监测甚至预测提供可能。

参考文献 (References):

- [1] 冯强,田国良.全国干旱遥感监测运行系统的研制[J].遥感学报,2003,7(1):14-18. [Feng Q, Tian G L. Research on the operational system of drought monitoring by remote sensing in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2003,7(1):14-18.]
- [2] Kallis G. Droughts[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2008,33(1):85-118.
- [3] 唐饶,孙睿.基于气象和遥感数据的河南省干旱特征分析[J].自然资源学报,2013,28(4):646-655. [Tang Y, Sun R. Analysis of drought characteristics in Henan province with meteorological and remote sensing data[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(4):646-655.]
- [4] 孙丽,陈焕伟,赵立军,等.遥感监测旱情的研究进展[J].农业环境科学学报,2004,23(1):202-206. [Su L, Chen H W, Zhao L J, et al. The advances of drought monitoring by remote sensing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004,23(1):202-206.]
- [5] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data[J]. Advances in Space Research, 1993,13(5):219-222.
- [6] Kogan F. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1995,76(5):655-668.
- [7] Gebrehiwot T, Van der Veen A, Maathuis B. Spatial and temporal assessment of drought in the Northern highlands of Ethiopia[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011,13(3):309-321.
- [8] Kuri F, Murwira A, Murwira K S, et al. Predicting maize yield in Zimbabwe using dry dekads derived from remotely sensed Vegetation Condition Index[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014,33(12):39-46.
- [9] Bajgiran P R, Darvishsefat A A, Khalili A, et al. Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the Northwest of Iran[J]. Journal of Arid Environments, 2008,72(6):1086-1096.
- [10] 黄宝俊.灾害管理文库第六卷灾害防御对策研究[Z].北京:当代中国出版,1999. [Huang B J. The sixth volume of Disaster management library: Research on disaster prevention countermeasures[Z]. Beijing: Contemporary China Publishing House, 1999.]
- [11] 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. [Ren J Z, Huang Z Y, Zheng J M. Analysis on drought climate change in Yunnan based on relative moisture index[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014,35(5):567-574.]
- [12] 韩元元,刘辉.云南中北部地区1954-2012年干旱评价研究[J].水资源与水工程学报,2015,22(1):111-115. [Han Y Y, Liu H. Study on evaluation of drought in central north region of Yunnan province from 1954 to 2012[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015,22(1):111-115.]
- [13] 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. [Wang J J, Meng Y B, Zhang Z, et al. Establishment of Palmer drought severity model for Yunnan Province: analysis of characteristics of drought disaster in 2010[J]. Journal of Natural Disasters, 2012,21(1):190-197.]
- [14] 张冬冬,鲁帆,严登华,等.云南省干旱时空演变规律及季节连旱的概率特征分析[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(4):705-717. [Zhang D D, Lu F, Yan D H, et al. Spatio-temporal analysis of drought and the characteristic of continuous seasonal droughts probability in Yunnan province[J]. Journal of Basic Science And Engineering, 2014,22(4):705-717.]
- [15] 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,2014,31(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.]
- [16] Zhang D, Yan D, Lu F, et al. Copula-based risk assessment of drought in Yunnan province, China[J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2199-2220.
- [17] Jia H, Pan D. Drought risk assessment in Yunnan province of China based on wavelet analysis[J]. Advances in Meteorology, 2016,2016(3):1-10.
- [18] Abbas S, Nichol J, Qamer F, et al. Characterization of drought development through remote sensing: a case study in central Yunnan, China[J]. Remote Sensing, 2014,6(6):4998-5018.
- [19] 王海,杨祖祥,王麟,等.TVDI在云南2009/2010年干旱监

- 测中的应用[J].云南大学学报(自然科学版),2014,36(1): 59-65. [Wang H, Yang Z X, Wang L, *et al.* The application of TVDI in drought monitoring over Yunnan Province during 2009 to 2010[J]. Journal of Yunnan University, 2014,36(1):59-65.]
- [20] 许玲燕,王慧敏,段琪彩,等.基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J].资源科学, 2013,35(5): 1024-1034. [Xu L Y, Wang H M, Duan Q C, *et al.* The temporal and spatial distribution of droughts during summer corn growth in Yunnan Province based on SPEI[J]. Resources Science, 2013,35(5):1024-1034.]
- [21] 付奔,胡关东,杨帆,等.云南干旱“常态化”的分析[J].水文,2014,34(4):82-85. [Fu B, Hu G D, Yang F, *et al.* Analysis of drought normalization in Yunnan province[J]. Journal of China Hydrology, 2014,34(4):82-85.]
- [22] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index-SPEI[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [23] Zhao H, Gao G, An W, *et al.* Timescale Differences between SC-PDSI and SPEI for Drought Monitoring in China[J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c, 2015: 1-11.
- [24] Wang K Y, Li Q F, Yang Y, *et al.* Analysis of spatio-temporal evolution of droughts in Luanhe River Basin using different drought indices[J]. Water Science & Engineering, 2015,8(4):282-290.
- [25] Wang W, Zhu Y, Xu R, *et al.* Drought severity change in China during 1961-2012 indicated by SPI and SPEI[J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2437-2451.
- [26] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J].农业工程学报, 2010,26(7):50-59. [Huang W H, Yang X G, Li M S, *et al.* Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(7):50-59.]
- [27] Wu Z, Mao Y, Li X, *et al.* Exploring spatiotemporal relationships among meteorological, agricultural, and hydrological droughts in Southwest China[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2015,2016(30): 1-12.
- [28] Corresponding R P S, Kogan S R F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003,24(22):4393-4402.
- [29] Bhuiyan C, Singh R P, Kogan F N. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2006,8(4):289-302.
- [30] Hao C, Zhang J, Yao F. Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2015,35:270-283.
- [31] 李振. 云南省干旱发生时空特征研究[D].昆明:昆明理工大学,2014. [Li Z. Study on the temporal and spatial distribution of drought in Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.]
- [32] 沙莎,郭锐,李耀辉,等.植被状态指数 VCI 与几种气象干旱指数的对比——以河南省为例[J].冰川冻土,2013,35(4):990-998. [Sha S, Guo N, Li Y H, *et al.* Comparison of the vegetation condition index with meteorological drought indices: a case study in Henan Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013,35(4):990-998.]
- [33] 索渺清,尤卫红,马学文,等.思茅境内澜沧江径流变化量与云南气候变化的关系[J].云南地理环境研究,2005,17(3):1-8. [Suo M Q, You W H, Ma X W, *et al.* Correlation characteristics between the Simao Lancang river flows and the climate variations in Yunnan[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2005,17(3):1-8.]
- [34] 陶云,樊风,段旭,等.云南不同气候带气温变化特征[J].云南大学学报(自然科学版),2013,35(5):652-660. [Tao Y, Fan F, Duan X, *et al.* On the features of temperature variations indifferent climate zones in Yunnan[J]. Journal of Yunnan University, 2013,35(5):652-660.]
- [35] 段琪彩,黄英,王杰,等.云南省干旱时空分布规律[J].水电能源科学,2014,32(8):1-4. [Duan Q C, Huang Y, Wang J, *et al.* Study on spatial and temporal distribution of drought in Yunnan Province[J]. Water Resources and Power, 2014,32(8):1-4.]