

基于土壤相对凋萎湿度构建的干旱 监测指标在云南的应用分析

马思源^{1,2}, 何雨岑¹, 金 燕^{1,2}, 张明达¹, 闫伟兄³, 范立张¹

(1. 云南省气候中心, 云南 昆明 650034; 2. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750004;
3. 宁夏回族自治区气象科学研究所, 宁夏 银川 750004)

摘 要:在分析云南土壤水文参数的基础上,构建基于土壤相对凋萎湿度的干旱监测指标 I_{RWM} ,并分析其在云南地区的适用性。结果表明:云南 0~20 cm 土层土壤水文参数空间分布较为一致,土壤水分利用率总体呈现东高西低,南高北低的特点;从 I_{RWM} 指标来看,云南轻旱、中旱、重旱和特旱上限对应的土壤相对湿度分别为 45.6%、36.5%、27.5%和 18.4%;当大部地区土壤相对湿度低于 60%时,云南发生中等干旱灾害的可能极大;云南的西部边缘地区对土壤水分更为敏感,有旱情发展波动大的特点;在干旱监测中, I_{RWM} 指标能够降低极端降水对旱情监测的干扰,且对干旱灾害的描述与实际更接近。综合来看, I_{RWM} 指标在云南的适用性优于 MCI 指数。

关键词:干旱监测;土壤水文参数;土壤相对凋萎湿度;MCI 指数;云南省
中图分类号:S423 **文献标志码:**A

Application of drought monitoring index constructed based on soil relative wilting moisture in Yunnan

MA Siyuan^{1,2}, HE Yuqin¹, JIN Yan^{1,2}, ZHANG Mingda¹, YAN Weixiong³, FAN Lizhang¹

(1. Yunnan Climate Center, Kunming, Yunnan 650034, China; 2. Key Laboratory of Monitoring, Warning and Risk Management of Characteristic Agrometeorological Disasters in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan, Ningxia 750004, China;
3. Institute of Meteorological Sciences of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750004, China)

Abstract: By analyzing the hydrogeological parameters of Yunnan soil, the drought monitoring index I_{RWM} based on soil relative wilting moisture was constructed in this paper, and its applicability in Yunnan region was analyzed. The results indicated that the spatial distribution characteristics of the hydrogeological parameters about Yunnan 0~20 cm soil were consistent relatively, which was the utilization rate of soil moisture was higher in east and lower in west, and higher in south and lower in north generally. In terms of the I_{RWM} , the corresponding upper line indexes of light drought, moderate drought, severe drought and extreme drought in Yunnan were 45.6%, 36.5%, 27.5% and 18.4% soil moisture respectively, and the moderate drought was very likely to occur when the relative soil moisture was lower than 60% in most parts of Yunnan. The western edge of Yunnan soil was more sensitive to moisture, and it has the characteristic of high fluctuation of drought. I_{RWM} reduced the interference of extreme precipitation in drought monitoring, and its description on drought disaster was more accurate than MCI. To sum up, the applicability of I_{RWM} was superior to MCI in Yunnan.

Keywords: drought monitoring; soil hydrological parameter; relative wilting moisture; MCI index; Yunnan Province

干旱是全球最常见、最广泛的自然灾害^[1-3],每年因干旱造成的全球经济损失高达 80 亿美元,远超其他气象灾害。尤其在气候变暖背景下,干旱灾害发生频率和强度不断增加,使其异常性和成灾率更加明显^[4-6],因此利用可靠的观测资料开展干旱的定量化监测评估,准确实时地反映旱情变化,是提高干旱灾害风险管理的重要决策依据。

长期以来,国内外学者一直致力于干旱监测技术的研究,目前已提出 100 余种干旱监测指标^[7],按其描述的侧重点不同,大致可分为气象指标、农业指标、水文指标及其他综合监测指标等^[8-9]。由于干旱是一种长期的干燥少雨、气候水热不平衡的气象灾害,因此,通过将降水量和多要素进行组合的气象干旱指标,是目前气象部门干旱监测业务中较为常用的^[10-11]。其中,由单一降水因子构建的干旱指标主要有标准化降水指数(SPI)、Z 指数、GEVI 指数等,这类指数适用于任意时间尺度的干旱监测,资料容易获取,意义明确且反应灵敏^[12]。但该类指标没有考虑作物、下垫面及其蒸散发等相关因素的影响,只能大致反映干旱趋势,不能准确表征干旱的实际状况^[13-15]。因此,考虑多影响因子,如降水、蒸发、气温等因素的多要素干旱指标,如帕默尔干旱指数(PDSI)、标准化蒸散发指数(SPEI)、综合气象干旱指数(MCI)等在干旱监测中得到广泛应用^[16-18]。其中,PDSI 指数引入了温度对干旱的影响,适用于全球变暖背景下对干旱的研究,但由于时间尺度固定,限制了对多时间尺度干旱监测应用的灵活性^[19-20]。因此,兼具 PDSI 指数的温度变化和 SPI 指数多时间尺度特征的 SPEI 指数具有较好的应用前景^[18]。从适用性分析来看,SPEI 指数与干旱实况有较高的吻合率^[21],在冬季且时间尺度大于 3 个月以及夏季的任何时间尺度,SPEI 指数监测性能可靠,而对于冬、春季节内尺度的干旱监测能力相对较弱^[22],特别在西南地区 SPEI 指数对降水的响应偏慢^[23]。目前气象干旱综合指数 MCI 在全国范围内的旱情实时监测业务中被广泛应用,且效果较 SPEI 指数有所提高^[24]。在实际应用中,MCI 指数对较长持续时间的干旱过程刻画较好,但也存在旱情不连续性跳跃点、干旱缓解阶段对于实际旱情描述偏重、对有效降水反应不敏感、对“骤发性”干旱反应迟缓等问题^[25-28]。由于农业和农村可能是未来 50 年受全球气候变化特别是干旱影响最大的部门与地区^[29],土壤墒情指标能直接反映土壤的湿度状况,是表征旱情对农作物水分胁迫的最直接、最成熟的标志^[30-31]。因此,土壤湿度作为干旱

监测的重要指标,在农业气象等领域是更加适用的。

云南属典型的季风性气候区,干湿季分明^[32],是我国干旱发生频率较高的地区之一^[33-34],近年来云南干旱发生的频次和影响强度呈增加趋势^[35]。2009—2014 年持续性极端干旱的发生,给旱区人民的生产生活,特别是农业生产造成了巨大的经济损失^[36-38]。近年来,云南地区除了 2016 年降水时空分布均匀,未出现明显干旱灾害外,其余年份均有旱情出现。其中 2019 年高温少雨引发严重的春夏连旱,旱情评估为 21 世纪以来仅次于 2009—2010 年严重干旱的次大值。同年秋末初冬,云南南部地区气象干旱严重,影响强度与 2009 年同期相当,但历时稍短。此后,2020 年又发生了严重的春夏连旱,强度及影响在近 10 年中仅次于 2019 年^[39-44]。上述监测印证了近年来在云南地区干旱灾害偏多发生的事实。因此,准确监测旱情的发生发展对有效防御干旱灾害、减轻灾害损失至关重要。云南在干旱监测和研究中主要运用年、季、月和候等常规时间尺度上的气象要素构建干旱指标来对旱情进行宏观描述^[45-47],这对于干旱发生、演变的动态过程的监测显然是不全面的。由于气象因子构建的干旱监测指数主要反映降水、气温和蒸散发的波动变化,难以准确描述下垫面干湿变化对农业旱涝的监测评估,因此在云南农业干旱监测中引入土壤水分监测指标是很有必要的^[48]。

在前人的研究和应用中,不论采用土壤相对湿度还是绝对湿度,主要以划分固定区间来评定^[49],没有考虑当地土壤性质的差异;或者只考虑了土壤有效水上限而忽略了有效水下限的问题,不能体现植物可吸收利用的土壤有效水量^[50]。近年来随着土壤自动水分观测站的大量建设,云南土壤水文参数的空间密度得到了有效改善,这为在干旱评估中引入土壤有效水进行评估提供了有利条件。目前,内蒙古、宁夏引入土壤有效水(相对凋萎湿度)的概念^[31,51],改进当地的土壤水分监测指标,提高了土壤有效水描述的准确性,为干旱评估提供了新思路。云南与上述两个区域同处于我国西南-东北向的干旱化带^[52],但地形、地质更为复杂,立体性气候强,区域差异大,农业种植相对分散,由降水分布不均匀造成的区域性干旱强度和频率差异显著^[45]。因此,在云南监测评估中构建基于土壤有效水区间的干旱等级指标,以期弥补使用统一标准来监测全省旱情的不足,对土壤墒情监测指标的改良及云南干旱灾害风险管理能力的提升有着重要意义。

1 研究区域基本概况

云南省位于我国西南地区,全境西北高、东南低,高原、山地、盆地、河谷相间,地形地貌复杂多样。气候兼具低纬度气候、季风气候、山原气候的特点,“立体气候”特征显著^[53]。复杂的地理环境、多样的气候类型使得云南光、热、水等农业资源地区差异、垂直差异明显,是我国“立体农业”特征最为明显的地区之一^[54]。加之云南下垫面土壤质地类型丰富,砂土、壤土和黏土交错分布,不具备大规模农业的形成条件,农业产业结构多样性显著(图 1)。

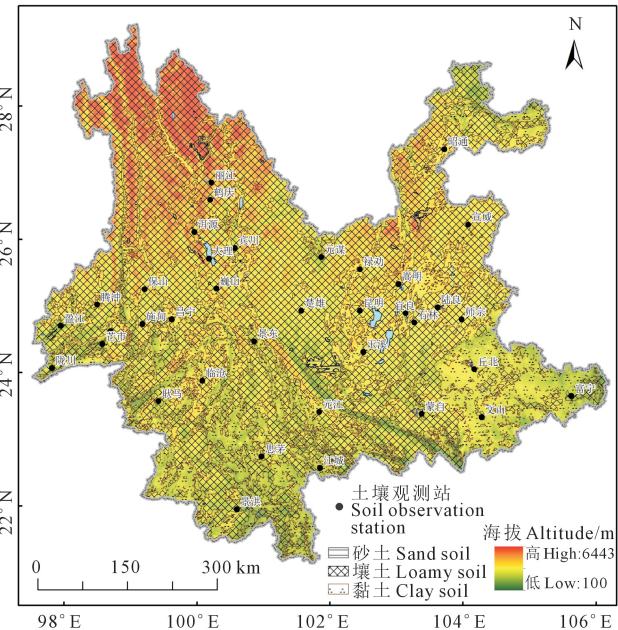


图 1 云南土壤质地、海拔高程及观测站空间分布
Fig.1 Soil texture, elevation and spatial distribution of observation stations in Yunnan

2 资料与方法

2.1 数据来源

使用云南 125 个气象站逐日降水、气温资料;云南 37 个土壤水分观测站的水文常数和逐日土壤水分观测数据,分 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 cm 共 10 层观测。由于云南冬春季降水仅占全年降水量的近 2 成^[53],因此,冬春季干旱发生的概率较高^[35],这个时段农作物多数处于播种期和苗期,因此本文将重点关注 0~20 cm 土层土壤的水文参数的变化特征。降水、气温、土壤相对湿度等数据由云南省气象信息中心进行质量控制。

HWSD 土壤类型数据来源于国际粮农组织全球土壤类型数据库,下载网址 <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12> (accessed data),分辨

率为 1 km×1 km。其中土壤质地类别类型根据 T_TEXTURE (Topsoil texture class)将土壤质地重新合并分类。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤水文相关参数

田间持水量(Field capacity,FC):土壤所能稳定保持的最高含水量,为衡量土壤保水性的重要指标,通常被视作有效水的上限^[55],是作物水管理的重要常数。

凋萎湿度(Wilting points,WP):由于土壤水分严重不足,植物吸收不到水分而使细胞失去膨压,呈现萎蔫状态时的土壤湿度,凋萎湿度是作物有效水的下限。

土壤相对湿度(Relative soil moisture,R):土壤含水量与田间持水量的百分比。土壤相对湿度是一个应用广泛并且得到普遍认可的农业旱涝监测评估指标,但应用统一标准就降低了其在干旱评估中的敏感性和准确性。

土壤有效水:土壤中可以被子植物有效利用的水分,通常为田间持水量和凋萎湿度之间的土壤水分,越接近田间持水量,可利用性越强,越接近凋萎湿度,可利用性越差。

相对凋萎湿度:在充分考虑有效水上、下限的基础上,提出的土壤墒情改良指标,更能准确、直观地体现测站土壤水分的盈亏状况^[56]。

$$W_{RH} = \frac{WP}{FC} \times 100\% \tag{1}$$

式中, W_{RH} 为相对凋萎湿度, WP 为土壤凋萎湿度, FC 为田间持水量。

当土壤相对湿度低于相对凋萎湿度时,可认为土壤水对植物已无效。基于土壤相对凋萎湿度的干旱评估指标,将低于相对凋萎湿度作为评定干旱发生的标准,相比于传统的根据土壤质地划分的干旱等级,能够更真实地体现土壤水分的有效性,在生产中更具实际意义。

2.2.2 土壤水分干旱等级指标 根据前面所提出的相对凋萎湿度的相关概念,以田间持水量作为 100%土壤相对湿度,参照闫伟兄等^[31]提出的方法,并兼顾云南地区土壤水文参数的特性,将各测站土壤凋萎湿度至田间持水量等间距划分来确定干旱等级。本文中为便于与 MCI 指数划分的干旱等级进行比较,将标准划分为 5 个等级,划分结果见表 1。此做法考虑了土壤有效水的上、下限,直观体现土壤水分对植物的有效性。

2.2.3 MCI 指数 按照《气象干旱等级》国家标准 (GBT 20481—2017)^[11], 计算公式:

$$MCI = Ka \times (aSPIW_{60} + bMI_{30} + cSPI_{90} + dSPI_{150})$$
 (2)

式中, $SPIW_{60}$ 为近 60 天标准化权重降水指数, MI_{30} 为近 30 天相对湿润指数, SPI_{90} 为近 90 天标准化降水指数, SPI_{150} 为近 150 天标准化降水指数, Ka 为季节调节系数; a,b,c,d 为经验权重系数,在云南分别取 0.3,0.5,0.3,0.2,根据 MCI 划分的气象干旱等级详见《气象干旱等级》^[11]。

3 结果与分析

3.1 土壤水文参数的空间分布

云南 0~20 cm 土壤田间持水量在 14.4%~44.7%,<25%的站点主要集中在滇中及滇西南的中

北部地区,>30%的站点主要分布在滇东南和滇西北南部地区(图 2a);0~20 cm 土层土壤凋萎湿度在 2.1%~28.3%,其中有超过 6 成的站点波动主要集中

表 1 基于相对凋萎湿度的干旱等级划分

Table 1 Drought classification based on relative wilting moisture

干旱等级 Drought grade	土壤相对湿度取值范围 Value range of soil relative moisture
无旱 Normal	$R > W_{RH} + \frac{4}{10}(100\% - W_{RH})$
轻旱 Light drought	$W_{RH} + \frac{3}{10}(100\% - W_{RH}) < R \leq W_{RH} + \frac{4}{10}(100\% - W_{RH})$
中旱 Moderate drought	$W_{RH} + \frac{2}{10}(100\% - W_{RH}) < R \leq W_{RH} + \frac{3}{10}(100\% - W_{RH})$
重旱 Heavy drought	$W_{RH} + \frac{1}{10}(100\% - W_{RH}) < R \leq W_{RH} + \frac{2}{10}(100\% - W_{RH})$
特旱 Extreme drought	$R \leq W_{RH} + \frac{1}{10}(100\% - W_{RH})$

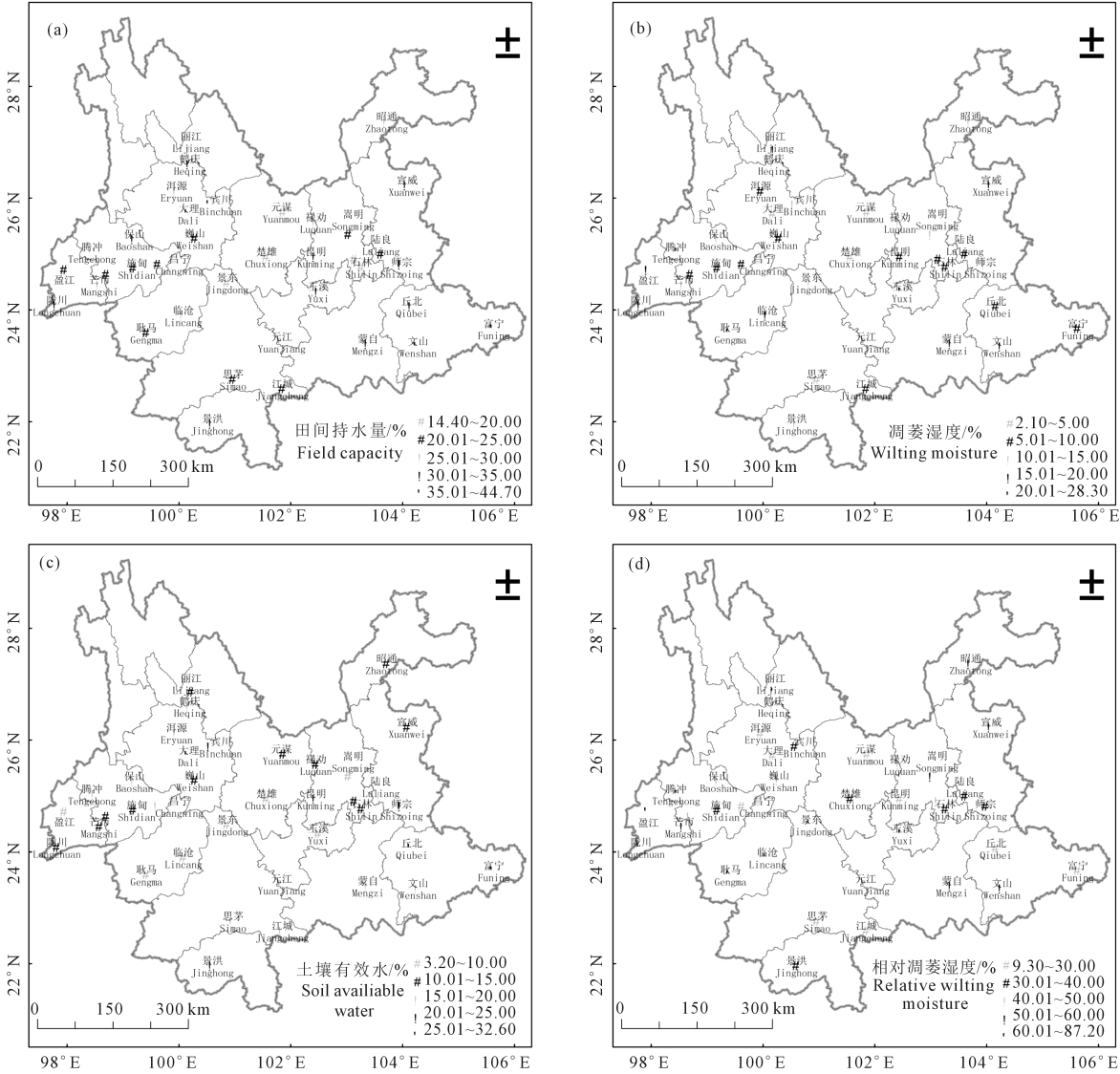


图 2 0~20 cm 土层土壤水文参数空间分布
Fig.2 Spatial distribution of soil hydrological parameters in 0~20 cm soil layer

在 5%~15%, <5% 的站点主要分布在滇中及滇西北部地区, >15% 的站点主要分布在滇东南及滇西地区(图 2b)。云南 0~20 cm 土层土壤有效水波动范围在 3.2%~32.6%, 有近 7 成的站点波动范围以 10%~20% 为主, <10% 的测点主要分布在滇中及滇西南地区(图 2c)。上述分析可见, 田间持水量、凋萎湿度与土壤有效水空间分布较为相似, 即滇中、滇西南中北部偏低, 滇西北南部和滇南、滇东南偏高。

云南 0~20 cm 土层土壤相对凋萎湿度在 9.3%~87.2%(图 2d), 全省有近 6 成的测站相对凋萎湿度在 30%~60%, 有 2 成的测站相对凋萎湿度 >60%。相对凋萎湿度越大, 表明凋萎湿度和田间持水量越接近, 土壤有效水就越少, 其中耿马、盈江站相对凋萎湿度最高, 均超过 70%。从空间分布来看, <30% 的站点主要分布在滇中、滇南及滇东中北部, 说明上述区域土壤有效水下限低。>60% 的站点主要分布在西部地区, 说明上述区域土壤有效水下限高。整体来看, 云南相对凋萎湿度西部高于东部, 地域差异明显, 这与云南的土壤质地分布有关。

3.2 干旱等级指标空间分布

按前文所述方法, 将每个测站的相对凋萎湿度至 100% 土壤相对湿度这一区间等间隔划分, 得到基于 0~20 cm 土层单站土壤相对凋萎湿度的干旱监测指标, 记为 I_{RWM} (Drought index based on relative wilting moisture)。37 个测站按照 I_{RWM} 划分的各等级干旱对应的土壤相对湿度最小值分别为 45.6%、36.5%、27.5% 和 18.4%, 即在云南, 当测站土壤相对湿度均小于 45.6% 时, 全省大部发生轻旱; 当测站土壤相对湿度均小于 36.5%、27.5% 和 18.4% 时, 将分别达到中旱、重旱和特旱。从全省不同干旱等级上限值所占比例来看(表 2), 其中有 73.0% 的测站轻旱上限大于 60%, 而中旱、重旱和特旱的等级上限分别有 51.4%、62.2% 和 73.0% 的测站小于 60%, 说明在云南, 当大部土壤相对湿度低于 60%, 则发生中旱以上等级干旱灾害的可能极大。从重旱、特旱的土

壤相对湿度判别标准空间分布来看, 在云南中部、东部较低, 在云南的西部边缘地区, 重旱、特旱等级上限较高, 干旱等级上限越高的区域, 土壤对水分更为敏感, 有旱情发展波动大的特点(图略)。

3.3 I_{RWM} 与综合气象干旱指数(MCI) 对干旱过程描述能力对比

云南 2019 年 1—7 月降水持续偏少, 气温持续偏高, 21 个旬中有 16 个旬降水偏少~特少, 气温偏高~特高(图 3a), 持续高温少雨致使 2019 年春季至初夏云南发生严重干旱灾害。至 5 月下旬, 干旱发展最强时段, 全省 125 个站点中有 117 个站点出现气象干旱, 其中 MCI 监测到重度以上气象干旱站点有 83 个, 灾害强度为 2000 年以来, 仅次于 2009—2010 年秋冬春连旱的次大值^[43]。本文以此次春夏连旱为例, 选取和土壤湿度观测一致的 37 个站点的 MCI 指数来检验 I_{RWM} 干旱指标在云南的适用性。

从 MCI 指数的逐日演变来看(图 3b), 4 月下旬干旱开始迅速发展, 6 月上旬, 干旱发展最为严重。从 I_{RWM} 干旱指标的逐日演变来看(图 3c), 1 月下旬干旱开始逐渐发展, 由于 3 月上旬的降雨过程, 导致特旱、重旱发展变缓。3 月下旬开始, 由于降水持续偏少, 气温持续偏高, 至 5 月下旬 MCI 和 I_{RWM} 监测的干旱发展均达到峰值。6 月开始, 全省进入雨季, 无论是 MCI 还是 I_{RWM} 影响的干旱站数逐渐减少, 大部地区干旱得到了缓解。值得注意的是, MCI 在干旱缓解阶段旱情描述偏重, 这也印证了王素萍等^[26]的研究成果。结合降水、气温和实际旱情实况来看, 滇中及其以西等地在 2—3 月已有旱情出现, MCI 未能监测到旱情, 这可能与极端降水对 MCI 指数的干扰有关。由于 2019 年 1 月上旬云南中南部降水异常偏多, 全省平均偏多 6 倍以上, 南部的 35 个县市降水偏多 10 倍以上(图略), 导致标准化降水指数偏高, 影响了 MCI 指数的监测结果, 造成其与实际旱情发展不符, 相对来说 I_{RWM} 更能反映实时的土壤水分情况, 对云南省干旱过程能较好地识别与诊断。

表 2 不同干旱等级上限测站占总测站比例

Table 2 Proportion of upper limit stations of different drought grades to total stations

干旱等级上限	轻旱 Light drought		中旱 Moderate drought		重旱 Heavy drought		特旱 Extreme drought	
Upper limit of drought grade	测站数 Number	占总测站比例 Ratio of total/%	测站数 Number	占总测站比例 Ratio of total/%	测站数 Number	占总测站比例 Ratio of total/%	测站数 Number	占总测站比例 Ratio of total/%
>80	4	10.8	2	10.8	2	5.4	2	5.4
>70	14	37.8	9	24.3	8	21.6	4	10.8
>60	27	73.0	18	48.6	14	37.8	10	27.0
≤60	10	27.0	19	51.4	23	62.2	27	73.0
≤50	3	8.1	8	21.6	15	40.1	20	54.1
≤40	\	\	2	5.4	7	18.9	10	27.0

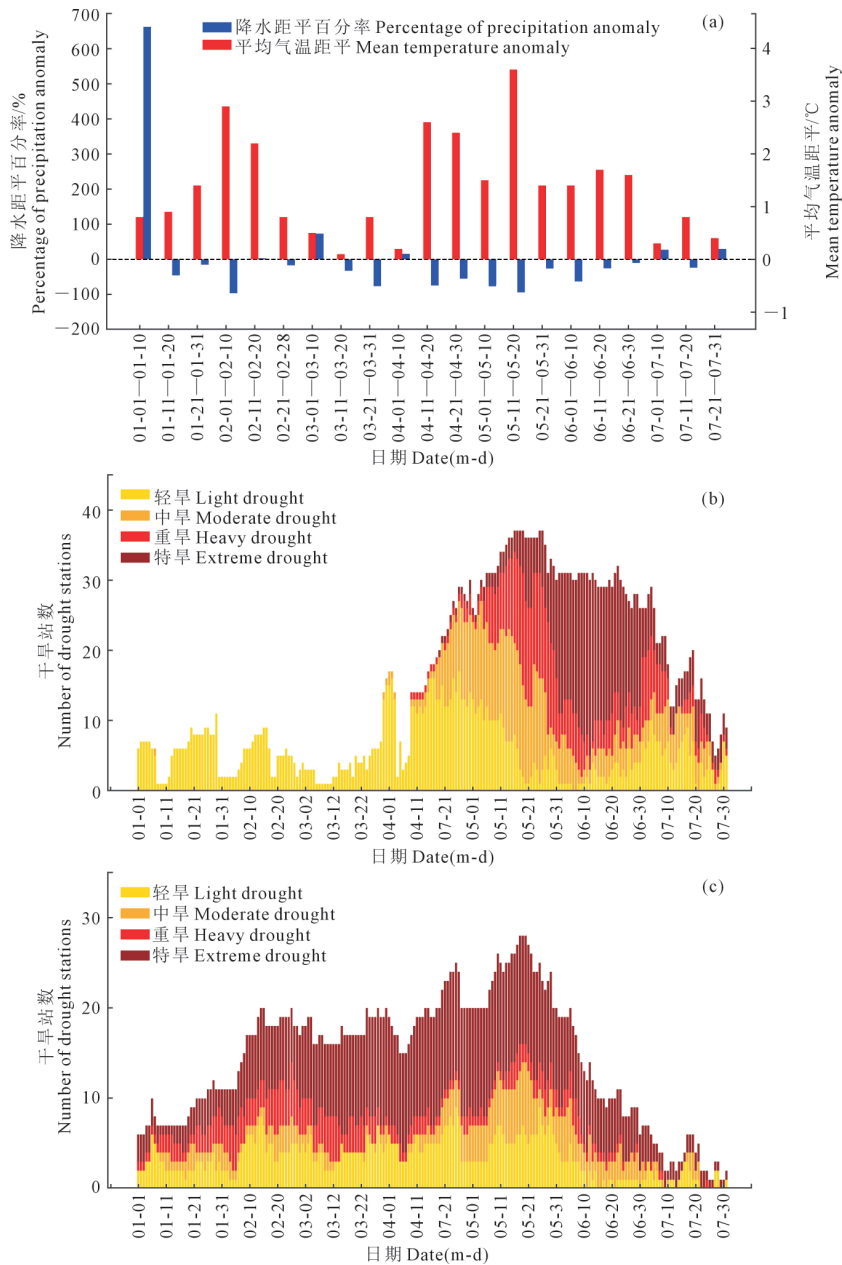


图 3 云南省 2019 年 1—7 月逐旬降水距平百分率和平均气温距平变化 (a)、同期 37 个站点 MCI 指数 (b) 和 I_{RWM} (c) 逐日干旱站数演变

Fig.3 Percentage precipitation anomaly and mean temperature anomaly of ten-day in Yunnan from January to July in 2019 (a), the daily variations of MCI index (b) and I_{RWM} (c) of 37 water observation stations in the same period

为检验在不同土质区域, MCI 指数和 I_{RWM} 指数的干旱监测能力, 选取在云南不同区域, 旱情发展情况不同 (楚雄旱情严重, 文山旱情中等), 且土壤质地有显著差别的楚雄、文山 2 个代表站来进行比较。结合灾情信息 (表 3), 楚雄 2 月开始出现旱情, 一直持续到 6 月上旬; 文山从 2 月开始, 降水偏少, 出现旱情, 干旱一直持续到 6 月上旬。

从两站逐日 MCI 指数、 I_{RWM} 指标和降水量变化来看 (图 4), I_{RWM} 指标监测到的旱情出现较 MCI 指数偏早, 但灾情严重程度的描述没有 MCI 指数剧

烈。在干旱发展阶段, 无明显降水时, MCI 指数的值逐渐降低, I_{RWM} 指标在下降到一定值时, 处于比较平缓发展的状态, 特别是楚雄的砂土区更为明显 (图 4a); 当出现明显降水时, MCI 指数和 I_{RWM} 指标对降水都比较敏感, 对于干旱的缓解反应较为迅速; 在旱情缓解阶段 MCI 指数和 I_{RWM} 指标在砂土和黏土区域监测的旱情变化趋势较为相近, 但 MCI 指数对旱情的描述偏重。

结合灾情信息 (表 3) 与逐日干旱指标的变化 (图 4a), 楚雄 2 月开始出现旱情, 一直持续到 6 月

上旬,MCI 指数在 4 月上旬至 6 月上旬由轻旱发展至特旱;而 I_{RWM} 指标表明在 1 月下旬当地旱情就有所发展,2 月上旬至 6 月中旬一直维持中旱至重旱等级,旱情发展与灾情调查概述更为相符。由于楚雄站土壤质地属于砂土,土壤的保水能力相对最弱,所以对于降水影响最为敏感。文山站土壤质地

属于黏土,土壤的渗透能力相对弱、保水能力相对最强,在 1 月上旬强降水过程后土壤湿度缓慢下降,非明显降水(小雨)对于 I_{RWM} 指标监测的旱情缓解不明显,这也是 I_{RWM} 指标监测旱情较 MCI 指数监测偏早的原因之一(图 4b)。

表 3 代表站灾情概况

Table 3 Disaster overview of representative stations

站点 Station name	地理位置 Geographical position	0~20 cm 土层土壤质地 0~20 cm soil texture	灾情概况 Disaster overview
楚雄 Chuxiong	滇中 Central Yunnan	砂土 Sandy soil	楚雄自 2 月份以来,降水偏少,气温偏高,小春作物和大春生产受到严重影响,全市干旱叠加效应突显,群众生活困难问题突出。截止 6 月 10 日旱灾造成全市 15 个乡镇 72 458 人受灾,43 270 人、15 102 头大牲畜饮水困难,农作物受灾 16 872.3 hm²、成灾面积 10 768.9 hm²、绝收 3 214.9 hm²,直接经济损失 9 564 万元。 Since February, there has been less precipitation and higher temperature in Chuxiong, which has seriously affected the production of spring crops,the superposition effect of drought in the city is outstanding, and the problem of people's living difficulties is prominent. As of June 10, the drought has affected 72 458 people in 15 towns, 43 270 people and 15 102 large livestock have difficulty in drinking water, 16 872.3 hectares of crops have been affected, 10 768.9 hectares have been caused disaster, 3 214.9 hectares have been lost, direct economic loss of 95.64 million yuan.
文山 Wenshan	滇东南 Southeast Yunnan	黏土 Clay	文山市 4 月 15 日至 5 月 20 日,降水量仅 9.6 mm,较历年同期偏少 90.2%,导致 17 个乡镇、街道办出现旱灾。2 月下旬开始降水持续偏少,截止 5 月 20 日,155 106 人受灾,农作物受灾 5 554.1 hm²、成灾面积 2 039.3 hm²、绝收面积 8.8 hm²,直接经济损失 6 641 万元。 From April 15 to May 20, the precipitation in Wenshan was only 9.6 mm, 90.2% less than the same period of previous years, resulting in 17 towns and street offices appeared drought. Since late February, the precipitation continued to be low, as of May 20, 155,106 people have been affected, 5 554.1 hectares of crops have been affected, 2 039.3 hectares have been caused disaster, 8.8 hectares have been lost, direct economic loss of 66.41 million yuan.

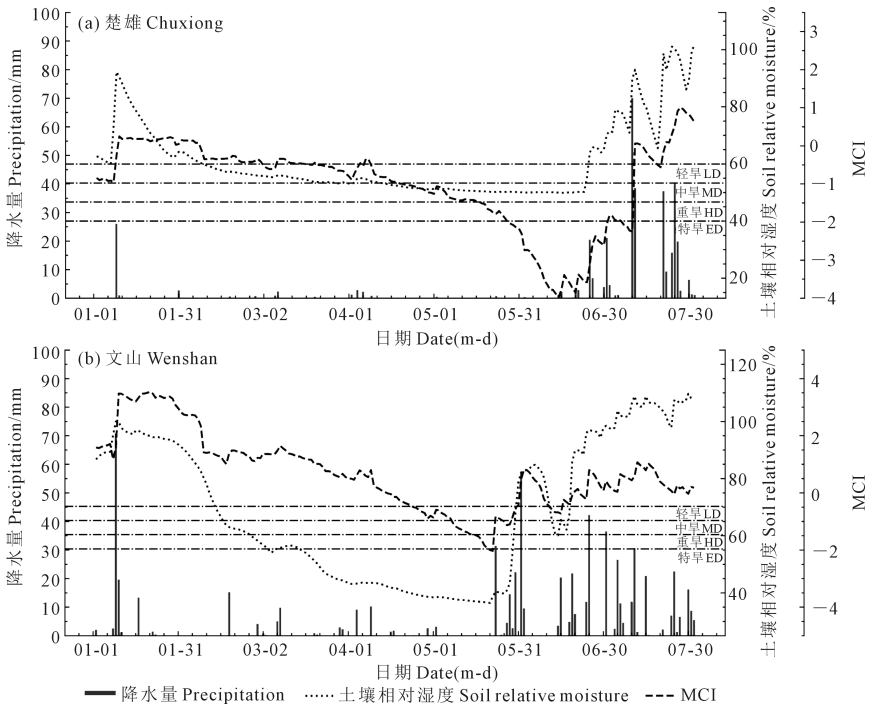


图 4 代表站 2019 年 1—7 月逐日 MCI、土壤相对湿度及降水演变
(点虚线表示土壤相对湿度达到不同干旱等级的阈值)

Fig.4 The daily changes of MCI, soil relative moisture and precipitation at representative stations from January to July 2019
(The dash dot line indicates that soil relative moisture threshold of different drought grades)

从以上个例分析可以看出按照 I_{RWM} 指标识别的干旱等级与实际最接近,且变化连续; I_{RWM} 指标在云南旱情监测中,效果优于 MCI 指数,可作为由极端降水导致的 MCI 指数旱情监测不准确及早情缓解阶段描述偏重的订正参考。

4 结论与讨论

4.1 结 论

(1) 云南 0~20 cm 土层土壤水文参数在数值波动、空间分布上较为相似,土壤水分的利用率总体呈现东高西低,南高北低的区域分布特点,这与云南的土壤质地分布关系密切。

(2) 从基于土壤相对凋萎湿度的 I_{RWM} 指标来看,轻旱、中旱、重旱和特早上限对应的土壤相对湿度分别为 45.6%、36.5%、27.5% 和 18.4%。根据测站干旱指标上限来看,当云南大部土壤相对湿度低于 60%,则发生中旱以上等级干旱灾害的可能极大。云南中部、东部重旱、特旱等级上限较低,而云南的西部边缘地区重旱、特旱等级上限较高,干旱等级上限越高的区域,土壤对水分更为敏感,有旱情发展波动大的特点。

(3) 从监测能力对比来看,在不同土质地区, I_{RWM} 指标能降低极端降水对旱情监测的影响,对灾情描述连续、平缓,对灾情严重程度的描述没有 MCI 指数剧烈。在旱情发展过程中,MCI 指数和 I_{RWM} 指标对降水都比较敏感,能对降水做出迅速反应。在旱情缓解阶段 MCI 指数对旱情的描述总体偏重, I_{RWM} 指标描述更为准确。

4.2 讨 论

近年来,大量实测和模拟的土壤水文参数成果为改进基于土壤湿度的干旱指标提供了条件。本文分析表明,引入土壤相对凋萎湿度构建的干旱指标,能更好反映云南干旱情况,并弥补单纯采用等间隔土壤相对湿度分作物生育期和土壤质地确定干旱等级或土壤墒情的不足。一些研究认为在土壤有效水范围内,土壤水分对植物的有效性是等效的^[57],而一些研究则认为并非等效^[58],不管怎样,本文基于凋萎湿度确定的最早等级是客观和明确的。事实上,从土壤水分特征曲线可得出,土壤水分与作物吸水关系复杂,故而干旱等级是等比例、等间隔或是其他方法划分,均有必要进一步试验和研究。

前人基于土壤相对湿度确定的干旱等级均为固定区间,很可能出于两种考虑,一种是无法获得足够多的土壤水文水参数,另一种则出于诸如农田

等扰动后的土壤其水文参数发生一定程度变化的考虑,仅粗略给出不同土壤质地的指标值。故而,获得大量准确的土壤水文参数是本研究能否实际应用的关键所在。我们在前面研究中也发现耿马、盈江站相对凋萎湿度偏高,均超过 70%。经过现场调查,发现测站的土壤质地偏黏。因此,可借助已有估算或模拟的相关土壤数据成果(如世界土壤地图),对现有云南自动土壤水分测站的水文参数进行代表性验证分析,及为后续自动土壤水分观测站的建设提供参考。

参 考 文 献:

[1] 秦大河,丁一汇,王绍武,等.中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展,2002,17(3):314-319.
QIN D H, DING Y H, WANG S W, et al. Ecological and environmental change in west China and its response strategy[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(3): 314-319.

[2] 张强,韩兰英,张立阳,等.论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J].地球科学进展,2014,29(1):80-91.
ZHANG Q, HAN L Y, ZHANG L Y, et al. Analysis on the character and management strategy of drought disaster and risk under the climatic warming[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 80-91.

[3] HUANG J P, YU H P, GUAN X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166-171.

[4] WILHITE D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions [C]//WILHITE D. Drought: a global assessment. London: Routledge, 2000: 3-18.

[5] ALLEN S K, BARROS V, BURTON I, et al. Summary for policymakers [C]//FIELD C B, RROS V, STOCKER T, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 3-21.

[6] ZHANG C C, YANG Y T, YANG D W, et al. Multidimensional assessment of global dryland changes under future warming in climate projections[J]. Journal of Hydrology, 2021, 592: 125618.

[7] SVOBODA M D, FUCHS B A. Handbook of drought indicators and indices[M]. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2017: 6-41.

[8] AMS. Meteorological drought-policy statement [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(5): 847-849.

[9] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].生态学报,2014,34(5): 1043-1052.
LI B Z, ZHOU G S. Advance in the study on drought index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1043-1052.

[10] 张强,张良,崔显成,等.干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战 [J].地球科学进展,2011,26(7):763-778.
ZHANG Q, ZHANG L, CUI X C, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7): 763-778.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 20481-2017 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社, 2017:1-6.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20481-2017 Grades of

- meteorological drought[S]. Beijing: China Standards Press, 2017: 1-6.
- [12] 王澄海,王芝兰,郭毅鹏.GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验[J].地球科学进展,2012,27(9):957-968.
- WANG C H, WANG Z L, GUO Y P. Application and verification of drought index in meteorology drought monitoring and prediction[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(9): 957-968.
- [13] 王春林,陈慧华,唐力生,等.基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J].气候变化研究进展,2012,8(3):157-163.
- WANG C L, CHEN H H, TANG L S, et al. A daily meteorological drought indicator based on standardized antecedent precipitation index and its spatial-temporal variation[J]. Climate Change Research, 2012, 8(3): 157-163.
- [14] DEO R C, BYUN H R, ADAMOWSKI J F, et al. Application of effective drought index for quantification of meteorological drought events: a case study in Australia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 128(1/2): 359-379.
- [15] 韩海涛,胡文超,陈学君,等.三种气象干旱指标的应用比较研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):237-241,247.
- HAN H T, HU W C, CHEN X J, et al. Application and comparison of three meteorological drought indices[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 237-241, 247.
- [16] 李忆平,李耀辉.气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J].干旱气象,2017,35(5):709-723.
- LI Y P, LI Y H. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 709-723.
- [17] 陈家宁,孙怀卫,王建鹏,等.综合气象干旱指数改进及其适用性分析[J].农业工程学报,2020,36(16):71-77.
- CHEN J N, SUN H W, WANG J P, et al. Improvement of comprehensive meteorological drought index and its applicability analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 71-77.
- [18] VICENTE-SERRANO S M, BEGUER'A S, LO'PEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [19] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating palmer drought severity index[J]. Journal of Climate, 2004, 17(12): 2335-2351.
- [20] VICENTE-SERRANO S M, BEGUER'A S, LO'PEZ-MORENO J I. Comment on "Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900+2008" by Aiguo Dai[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2011, 116:D19112.
- [21] 容锦盟,周丹,罗静,等.4种干旱指标在华北地区气象干旱监测中的适用性分析[J].干旱地区农业研究,2019,37(1):259-267.
- RONG J M, ZHOU D, LUO J, et al. Applicability analysis of four drought indices for meteorological drought monitoring in northern China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(1): 259-267.
- [22] 王林,陈文.标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J].高原气象,2014,33(2):423-431.
- WANG L, CHEN W. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431.
- [23] 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 and Technology, 2012, 2(4): 21-26.
- [24] 谢五三,张强,李威,等.干旱指数在中国东北、西南和长江中下游地区适用性分析[J].高原气象,2021,40(5):1136-1146.
- XIE W S, ZHANG Q, LI W, et al. Analysis of the applicability of drought indexes in the northeast, southwest and middle-lower reaches of Yangtze River of China[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1136-1146.
- [25] 张强,姚玉璧,李耀辉,等.中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J].气象学报,2020,78(3):500-521.
- ZHANG Q, YAO Y B, LI Y H, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3): 500-521.
- [26] 王素萍,王劲松,张强,等.几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价[J].高原气象,2015,34(6):1616-1624.
- WANG S P, WANG J S, ZHANG Q, et al. Applicability evaluation of drought indices in monthly scale drought monitoring in southwestern and southern China[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(6): 1616-1624.
- [27] 杨玮,谢五三,王胜,等.气象干旱综合监测指数在安徽省的适用性分析[J].气象科技,2018,46(5):988-998.
- YANG W, XIE W S, WANG S, et al. Comparison of comprehensive meteorological drought index with other drought indices and its applicability in Anhui Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(5): 988-998.
- [28] 高睿娜,王素艳,高娜,等.CI 和 MCI 干旱指数在宁夏的适应性对比[J].干旱气象,2021,39(2):185-192.
- GAO R N, WANG S Y, GAO N, et al. Application comparison of CI and MCI drought indexes in Ningxia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(2): 185-192.
- [29] 秦大河,丁一汇,王绍武,等.中国西部生态环境变化与对策建议[J].地球科学进展,2002,17(3):314-319.
- QIN D H, DING Y H, WANG S W, et al. Ecological and environmental change in west China and its response strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3): 314-319.
- [30] 张杰,张强,赵宏,等.定量遥感反演作物水势的原理及其应用[J].生态学杂志,2008,27(6):916-923.
- ZHANG J, ZHANG Q, ZHAO H, et al. Theory and application of leaf water potential retrieved from remote sensing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(6): 916-923.
- [31] 闫伟兄,张永霞,朱永宁,等.宁夏土壤水文参数空间分布及干旱指标改进研究[J].生态环境学报,2020,29(2):266-274.
- YAN W X, ZHANG Y X, ZHU Y N, et al. Spatial distribution of soil hydrological parameters and improvement of drought index in Ningxia Hui autonomous regions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 266-274.
- [32] 王宇.云南山地气候[M].昆明:云南科技出版社,2006:13-42.
- WANG Y. Yunnan mountain climate[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2006: 13-42.
- [33] 张强,姚玉璧,王莺,等.中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策[J].生态学报,2017,37(21):7206-7218.
- ZHANG Q, YAO Y B, WANG Y, et al. Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7206-7218.
- [34] 李韵婕,任福民,李忆平,等.1960-2010年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J].气象学报,2014,72(2):266-276.
- LI Y J, REN F M, LI Y P, et al. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960-2010[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(2): 266-276.
- [35] 金燕,况雪源,晏红明,等.近55年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J].气象,2018,44(9):1169-1178.
- JIN Y, KUANG X Y, YAN H M, et al. Studies on distribution charac-

teristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(9): 1169-1178.

[36] 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.

[37] 胡学平,王式功,许平平,等.2009-2013 年中国西南地区连续干旱的成因分析[J].气象,2014,40(10):1216-1229.

HU X P, WANG S G, XU P P, et al. Analysis on causes of continuous drought in Southwest China during 2009-2013[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(10): 1216-1229.

[38] 荣艳淑,琳琳,卢寿德.云南 2009-2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J].水资源保护,2018,34(3):22-29.

RONG Y S, GONG L, LU S D. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29.

[39] 云南省气象局.2015 年云南省气候公报[R].昆明:云南省气象局,2016:14-19.

Yunnan Provincial Meteorological Bureau. 2015 climate bulletin of Yunnan Province[R]. Kunming: Yunnan Provincial Meteorological Bureau, 2016:14-19.

[40] 云南省气象局.2016 年云南省气候公报[R].昆明:云南省气象局,2017:15-20.

Yunnan Provincial Meteorological Bureau. 2016 climate bulletin of Yunnan Province[R]. Kunming: Yunnan Provincial Meteorological Bureau, 2017:15-20.

[41] 云南省气象局.2017 年云南省气候公报[R].昆明:云南省气象局,2018:12-17.

Yunnan Provincial Meteorological Bureau. 2017 climate bulletin of Yunnan Province[R]. Kunming: Yunnan Provincial Meteorological Bureau, 2018:12-17.

[42] 云南省气象局.2018 年云南省气候公报[R].昆明:云南省气象局,2019:21-30.

Yunnan Provincial Meteorological Bureau. 2018 climate bulletin of Yunnan Province[R]. Kunming: Yunnan Provincial Meteorological Bureau, 2019: 21-30.

[43] 云南省气象局.2019 年云南省气候公报[R/OL].[2020-10-13]http://yn.cma.gov.cn/zfxgk/zwgk/qxbg/202010/t20201013_2260446.html.

Yunnan Provincial Meteorological Bureau. 2019 climate bulletin of Yunnan Province[R/OL].[2020-10-13]. http://yn.cma.gov.cn/zfxgk/zwgk/qxbg/202010/t20201013_2260446.html.

[44] 云南省气象局.2020 年云南省气候公报[R/OL].[2021-12-17].http://yn.cma.gov.cn/zfxgk/zwgk/qxbg/202112/t20211217_4313089.html.

Yunnan Provincial Meteorological Bureau. 2020 climate bulletin of Yunnan Province[R/OL].[2021-12-17]. http://yn.cma.gov.cn/zfxgk/zwgk/qxbg/202112/t20211217_4313089.html.

[45] 张万诚,郑建萌,任菊章.云南极端气候干旱的特征分析[J].灾害学,2013,28(1):59-64.

ZHANG W C, ZHENG J M, REN J Z. Climate characteristics of extreme drought events in Yunnan[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(1): 59-64.

[46] 段旭,陶云,郑建萌,等.气象干旱时空表达方式的探讨[J].高原气象,2012,31(5):1332-1339.

DUAN X, TAO Y, ZHENG J M, et al. Discussion on the spatial-temporal express ways for meteorological drought[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(5): 1332-1339.

[47] 郑建萌,黄玮,陈艳,等.云南极端气象干旱指标的研究[J].高原气象,2017,36(4):1039-1051.

ZHENG J M, HUANG W, CHEN Y, et al. Study on meteorological extreme-drought index for Yunnan Province[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(4): 1039-1051.

[48] 黄中艳,钟楚,张明达,等.若干干旱指标在云南大旱年农业干旱监测评估中的适用性分析[J].中国农业气象,2013,34(2):221-228.

HUANG Z Y, ZHONG C, ZHANG M D, et al. Applicability analysis for several drought indices to agricultural drought evaluation during the severe drought year in Yunnan[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 221-228.

[49] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等.气象、农业干旱指标综述[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):185-189, 211.

YAO Y B, ZHANG C J, DENG Z Y, et al. Overview of meteorological and agricultural drought indices[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(1): 185-189, 211.

[50] 中国气象局.GB/T 32136-2015 农业干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2015:2-6.

China Meteorological Administration. GB/T 32136-2015 Grade of agricultural drought[S]. Beijing: China Standards Press, 2015: 2-6.

[51] 代海燕,吴建华,贾成朕,等.土壤水分监测指标修订在内蒙古地区的应用[J].干旱地区农业研究,2020,38(1):274-279.

DAI H Y, WU J H, JIA C Z, et al. Revision of soil moisture monitoring index and its application in Inner Mongolia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(1): 274-279.

[52] 马柱国,任小波.1951-2006 年中国区域干旱化特征[J].气候变化研究进展,2007,3(4):195-201.

MA Z G, REN X B. Drying trend over China from 1951 to 2006[J]. Climate Change Research, 2007, 3(4): 195-201.

[53] 秦剑,据建华,解明思.低纬高原天气气候[M].北京:气象出版社,1997:14-15.

QIN J, JU J H, XIE M S. Weather & climate over low latitude plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997: 14-15.

[54] 王宇.云南省农业气候资源及区划[M].北京:气象出版社,1990:235-350.

WANG Y. Agricultural climatic resources and regionalization in Yunnan Province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 235-350.

[55] 林大仪.土壤学[M].北京:中国林业出版社,2002:152-153.

LIN D Y. Soil science[M]. Beijing: China Forestry Press, 2002: 152-153.

[56] 代海燕,孙小龙,那顺,等.有效水下限在土壤墒情评估中的应用[J].农学报,2013,3(5):31-33.

DAI H Y, SUN X L, NA S, et al. The application of effective water lower limit in the assessment of soil moisture[J]. Journal of Agriculture, 2013, 3(5): 31-33.

[57] 邵明安,杨文治,李玉山.黄土区土壤水分有效性研究[J].水利学报,1987,(8):38-44.

SHAO M A, YANG W Z, LI Y S. Study on the validity of soil in loess area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987,(8): 38-44.

[58] 刘倩,张国壮,李海超,等.土壤水分有效性对梨枣叶片光合参数和抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):1-6.

LIU Q, ZHANG G Z, LI H C, et al. Effects of soil water availability on leaf photosynthetic and drought-tolerant parameters of pear-jujube tree[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 1-6.