

西南地区不同类型干旱下VCI的监测适用性对比评估

王 欣, 李谢辉*

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月18日; 录用日期: 2026年8月7日; 发布日期: 2026年8月18日

摘 要

全球气候变化背景下, 中国西南地区干旱频发, 制约区域农业与生态发展。植被状态指数(Vegetation Condition Index, VCI)是常用的遥感干旱监测指标, 但在西南复杂地形区的适用性尚缺乏系统验证, 尤其缺少对不同类型干旱的对比评估。本文基于2010~2022年MODIS遥感数据计算VCI, 以SPEI为参照, 结合空间分析与典型事件对比, 评估了VCI在2010年降水持续亏缺型冬春连旱与2022年高温型极端干旱中的监测表现。结果表明: 降水持续亏缺主导的2010年干旱中, VCI与SPEI及灾情记录高度吻合, 能准确刻画干旱时空演变; 高温胁迫主导的2022年干旱中, VCI整体响应偏弱, 难以有效识别。空间上, VCI更适配高海拔裸地区域, 而在高植被覆盖区及高温干旱场景下敏感性不足。由于单一遥感干旱指数局限明显, 因此需按干旱类型与区域差异化选用或组合多指数, 以提升西南地区干旱遥感监测精度。

关键词

干旱监测, 植被状态指数(VCI), 西南地区, 适用性评估, 不同干旱类型

Comparative Assessment of the Applicability of VCI for Drought Monitoring under Different Drought Types in Southwest China

Xin Wang, Xiehui Li*

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: June 18, 2026; accepted: August 7, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

Under global climate change, Southwest China experiences frequent droughts that restrict regional

*通讯作者。

文章引用: 王欣, 李谢辉. 西南地区不同类型干旱下 VCI 的监测适用性对比评估[J]. 地理科学研究, 2026, 15(4): 645-659. DOI: 10.12677/gser.2026.154059

agricultural and ecological development. The Vegetation Condition Index (VCI) is a widely used remote sensing drought monitoring indicator, yet its applicability in the complex terrain of Southwest China lacks systematic verification, particularly in comparative assessments across different drought types. Based on MODIS remote sensing data from 2010 to 2022, this study calculated VCI and, with reference to the SPEI, combined spatial analysis with typical event comparisons to evaluate the monitoring performance of VCI for the 2010 persistent precipitation-deficit autumn-winter drought and the 2022 high-temperature extreme drought. The results show that for the 2010 drought dominated by persistent precipitation deficit, VCI is highly consistent with SPEI and disaster records, accurately characterizing the spatiotemporal evolution of drought. For the 2022 drought dominated by high-temperature stress, the overall response of VCI is weak, making it difficult to effectively identify high-temperature compound droughts. Spatially, VCI performs better in high-altitude bare land areas, but shows insufficient sensitivity in densely vegetated regions and under high-temperature drought scenarios. Given the significant limitations of a single remote sensing drought index, differentiated selection or combination of multiple indices according to drought type and region is necessary to improve the accuracy of remote sensing drought monitoring in Southwest China.

Keywords

Drought Monitoring, VCI, Southwest China, Applicability Assessment, Different Drought Types

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变暖背景下,中国西南地区干旱问题日益突出[1]。该区域山地与喀斯特地貌广布,降水时空分布不均,土层浅薄、保水能力差,干旱灾害频发,且干旱频次与持续时长显著上升,对农业生产、生活用水及生态环境造成严重影响[2]。传统干旱监测主要依托气象站点,但西南地区地形复杂、气象站点相对稀疏,难以全面反映区域干旱状况[3]。遥感技术具备大范围、高时效优势,已成为干旱监测的核心手段。其中,植被状态指数(VCI)从植被长势表征干旱程度,计算简便,应用广泛。当前多数研究集中于北方干旱、半干旱区域,相关方法直接应用于气候湿润、地形复杂的西南地区时,存在监测精度不足、适应性较差等问题。VCI在西南地区的干旱响应特征、敏感程度及适用条件仍缺乏系统论证。基于此,本文针对西南复杂地形与湿润气候特征,系统验证VCI的干旱监测适用性,以期提升区域干旱遥感监测精度提供科学依据[4]。

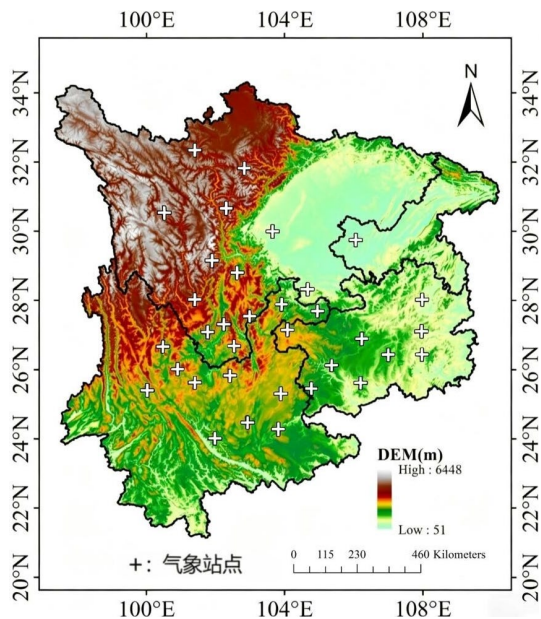
国外干旱遥感监测发展成熟,为弥补归一化差值植被指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)易受季节、物候、地形及土壤背景干扰的缺陷,VCI被提出并成为重要突破[5][6]。VCI通过NDVI多年极值归一化处理,消除植被类型、地形及季节物候带来的背景差异,可精准识别干旱引发的植被长势异常。国外学者在全球不同气候区已验证了VCI的响应灵敏度与监测精度,在亚热带湿润区、喀斯特地貌区及山地高原区积累了地形校正、云雾去除及指数优化技术,可为西南地区提供参考[4]。

国内干旱遥感监测研究起步较晚,初期以引进国外技术为主[7]。随着国产卫星与观测网络完善,国内研究进入快速发展阶段[8][9]。早期在北方干旱区验证了VCI的适用性[10],目前该指数已广泛应用于农业干旱监测、生态评估及风险预判[11]。后续研究逐步拓展至西南山地、喀斯特区域,利用DEM数据进行地形校正,结合区域气候与植被特征动态调整参数[12],并采用时序重构、去云及插值技术解决多云雾导致的数据缺损问题[13]。此外,国内也结合多源数据与机器学习算法优化模型,开展了西南干旱时空特征分析[14]。但现阶段针对西南复杂地貌区,仍缺少分场景的VCI系统性适用性分析,现有成果也难

以满足高精度监测需求。

2. 研究区概况

中国西南地区(97°27'E~110°18'E, 20°53'N~34°14'N)涵盖四川、重庆、贵州、云南三省一市, 属亚热带季风气候与高原山地气候[15]。地势西高东低、北高南低, 地形复杂, 自西向东依次分布着川西高原高山、云贵高原中高山山地丘陵及四川盆地。受孟加拉湾水汽与南支槽影响, 该区是中国旱情高发区之一[16]。高原季风与东南季风在此交汇, 气候类型多样, 呈现湿润半湿润、干湿季分明的典型特征。受上述自然地理背景控制, 降水时空分布不均, 多集中于夏季, 冬季降水偏少。加之喀斯特地区土层浅薄、保水蓄水能力弱, 长时间少雨或持续高温极易诱发干旱灾害。研究区的地理位置与高程分布见图 1 所示。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2923 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Geographical location and elevation distribution of Southwest China
图 1. 西南地区地理位置和高程分布

3. 数据与方法

3.1. 数据资料

MODIS 遥感数据来源于国家青藏高原科学数据中心, 研究选取 2010~2022 年逐月 NDVI 数据, 重点针对 2010 和 2022 年两次不同类型典型干旱事件进行分析。原始数据经大气校正、去云掩膜、投影转换及研究区裁剪等预处理后, 计算得到基于 VCI 的数据序列。气象数据来源于中国气象数据网, 选取研究区及周边 115 个地面站点 2010~2022 年逐月降水与月平均气温数据, 用于计算标准化降水蒸散指数 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), 并以此作为干旱验证的基准指标数据。

3.2. 研究方法

采用历史干旱事件典型案例对比法与气象站点 SPEI 计算对照验证法进行适用性评估。前者选取 2010

年(冬春持续性降水亏缺型)与 2022 年(夏秋季极端高温型)两次成因与季节不同的典型特大干旱事件, 通过对比 VCI 监测结果与实际灾情记录的吻合程度, 定性评估 VCI 对不同类型干旱时空演变过程的捕捉能力, 进而判断其在不同干旱类型和地貌单元下的监测优势与局限性。后者以地面气象站点数据计算的 SPEI 作为反映区域真实干湿状况的基准值, 通过对比 VCI 与 SPEI 的空间分布及月际变化趋势, 计算两者间的相关系数与显著性水平, 定量评估 VCI 对地面水分盈亏状况的表征精度与响应能力, 从而综合判断 VCI 对西南干旱的监测适用性。

3.2.1. 植被状态指数(VCI)

VCI 是表征农业干旱的关键指标, 用于监测植被健康程度。该指数通过 NDVI 相对于历史同期极值的偏离程度, 通过消除不同植被类型和地理区域的基础差异, 从而客观评价植被生长状态。其计算公式如下[17]:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \times 100\%$$

式中, $NDVI_i$ 为当期 NDVI 值, $NDVI_{\max}$ 和 $NDVI_{\min}$ 分别为历史同期 NDVI 的最大值与最小值。VCI 取值范围为 0%~100%, 数值越低表示植被生长状况越差, 越高则表示生长状况越好。

3.2.2. 气象干旱指数

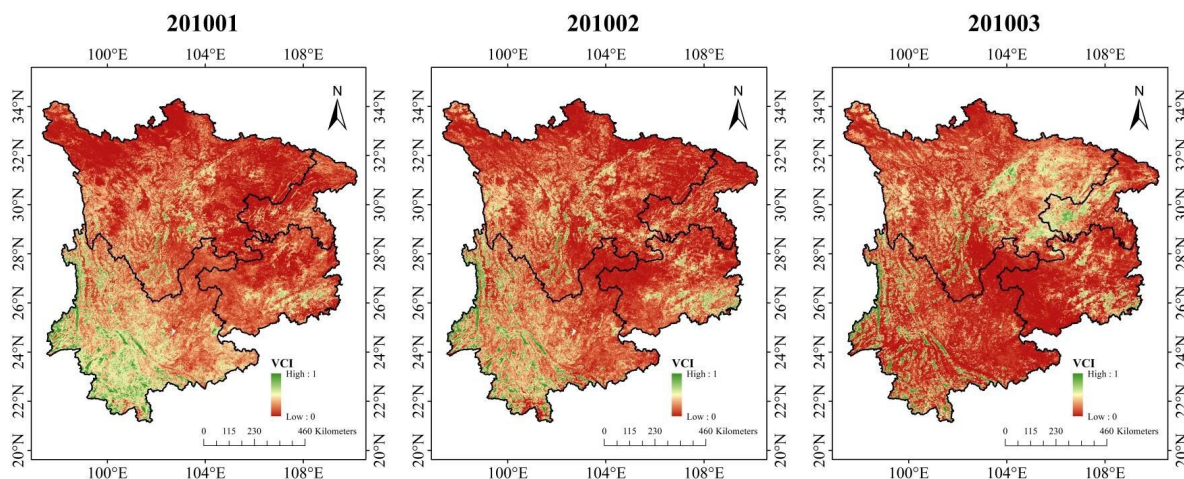
SPEI 是评估气象干旱强度的核心综合指标, 能同时考虑区域降水补给与大气蒸散消耗两个水分影响因素。相比仅依赖降水数据的干旱指数, SPEI 通过引入潜在蒸散量参数, 能直观体现升温导致的大气耗水增量, 更贴合气候变暖背景下的实际水分亏缺状况, 其计算公式见参考文献[18]。

4. 结果与分析

干旱具有频率高、持续时间长、影响范围广等特点, 对农业生产影响尤为严重。据统计, 气象灾害造成的经济损失约占自然灾害总损失的 80% 以上, 其中干旱损失占比过半。西南地区几乎每隔数年即发生不同程度的干旱, 近年来更出现了 2010 年与 2022 年两次不同类型的特大干旱事件[19]。

4.1. 基于 VCI 的西南地区典型干旱事件监测空间分布

图 2 为基于 VCI 计算的 2010 年西南地区干旱监测空间分布图(1~12 月)。VCI 值越低(红色区域)表示植被生长状况越差、干旱程度越高; VCI 值越高(绿色区域)表示植被生长状况越好、受干旱胁迫程度越低。



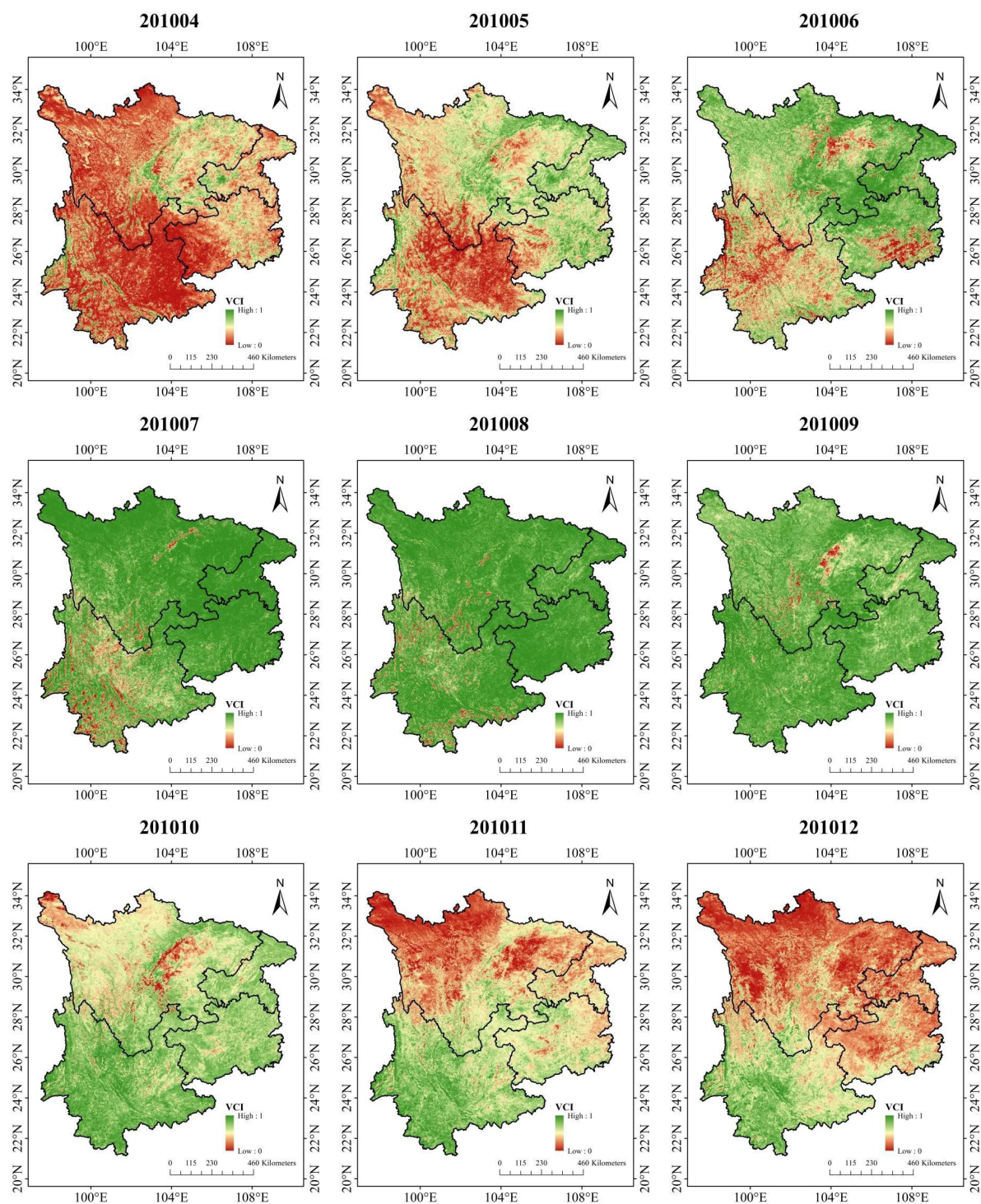
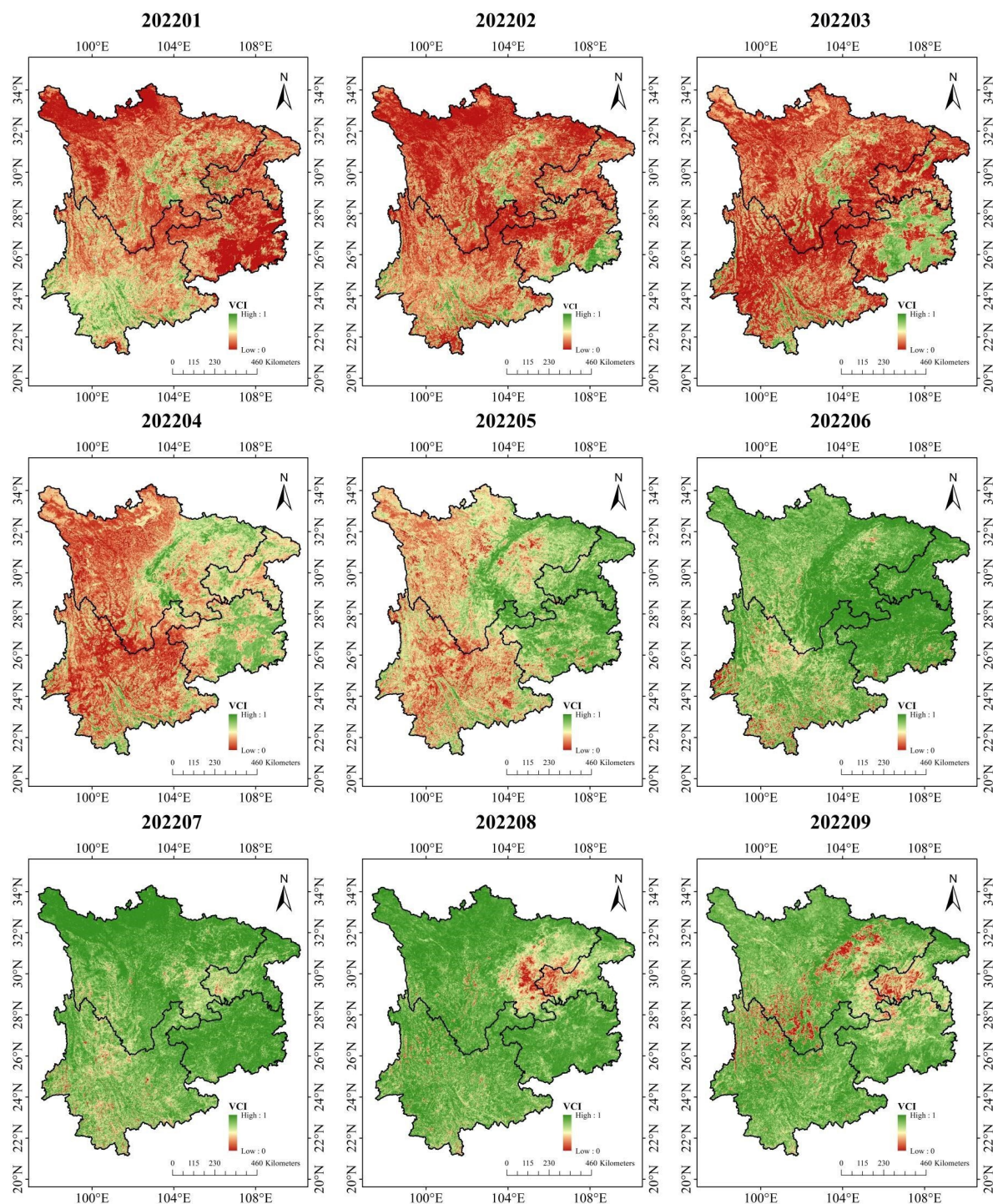


Figure 2. Spatial distribution of VCI monitoring from January to December in 2010
图 2. 2010 年 1~12 月 VCI 监测空间分布图

由图 2 可知, 2010 年 1~3 月为干旱集中爆发与持续阶段, 4 月开始缓解。1 月仅云南南部边缘存在少量湿润区, 其余大部受旱; 2 月云南南部湿润区进一步收缩, 干旱范围扩大; 3 月全域几乎被红色低值区覆盖, 干旱强度达年内峰值; 4 月, 四川东北部与重庆东部率先缓解, 但四川西部、云南及贵州南部仍维持大

范围干旱; 5月, 云南南部与贵州南部仍有连片干旱区, 植被水分胁迫尚未解除, 而四川大部、重庆全域及贵州东部湿润状况显著改善; 6月, 云南南部与贵州南部的干旱区进一步缩减, 云贵川渝全域湿润区占比大幅提升, 仅云南西南部及贵州边缘零星分布少量红色斑块, 干旱缓解进程加快。7~8月全域以湿润为主, 仅云南南部边缘有极少量干旱区, 植被状态整体良好, 前期持续干旱基本解除; 9月全域仍维持湿润, 植被生长状况良好; 10月起, 湿润区开始由绿转黄再转红, 干旱区首先在四川西北部出现并向东南方向蔓延;



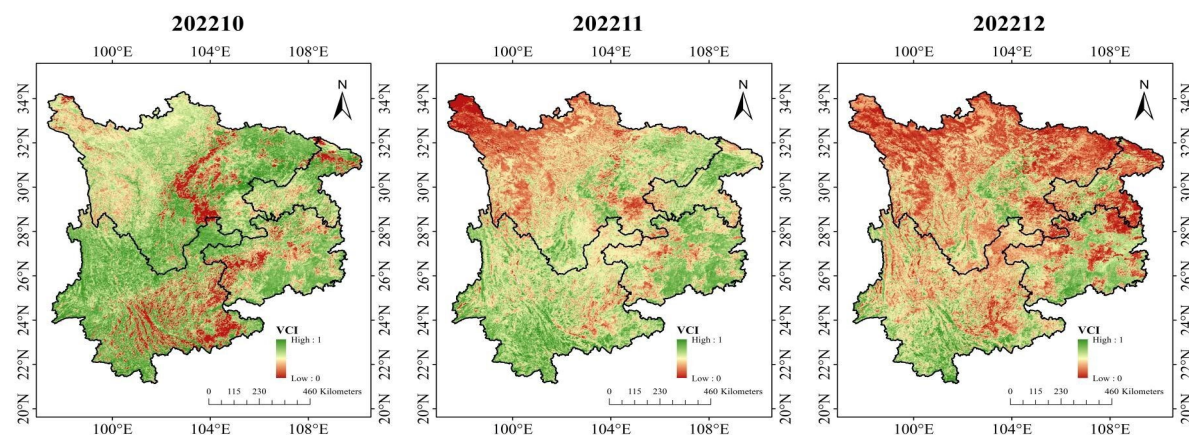


Figure 3. Spatial distribution of VCI monitoring from January to December in 2022

图 3. 2022 年 1~12 月 VCI 监测空间分布图

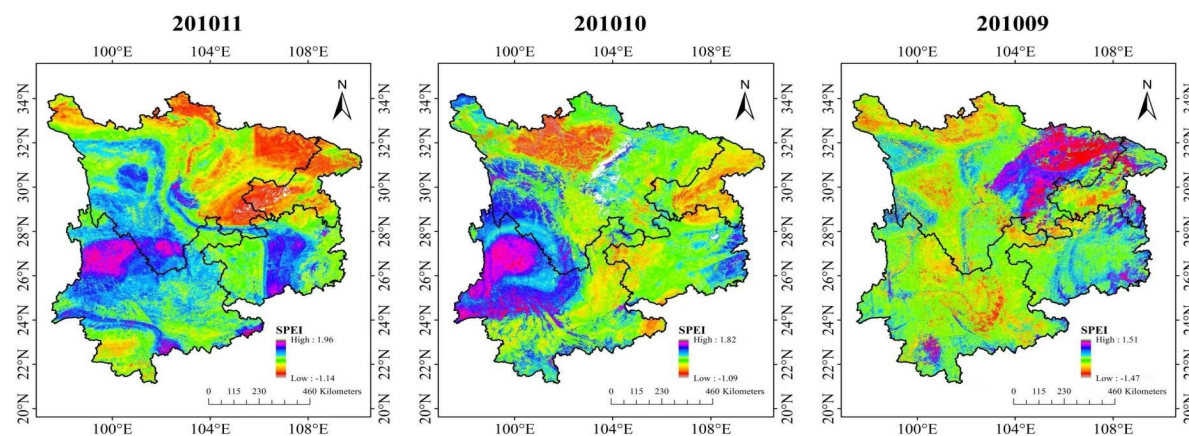
11 月, 四川大部、重庆西部及贵州北部被连片干旱覆盖, 仅云南南部与贵州东南部维持湿润; 12 月, 干旱区持续扩张, 四川大部、重庆全域及贵州北部均被大范围干旱区占据, 最终形成全域大范围干旱。

图 3 为基于 VCI 计算的 2022 年西南地区干旱监测空间分布图(1~12 月)。

由图 3 可知, 2022 年 1~3 月为干旱集中爆发期, 四川全域长期干旱, 无明显缓解, 重庆、贵州大部持续被干旱区覆盖, 仅局部边缘保留少量湿润区, 云南南部为区域内相对湿润的区域; 4 月, 重庆东部、贵州东部及南部湿润状况显著改善, 云南南部湿润区进一步扩大, 但四川全域仍以干旱为主, 整体呈现“川旱持续、渝黔滇局部缓解”的空间特征; 5 月, 随雨季进程推进, 干旱格局出现明显转折, 四川大部、云南北部仍以干旱为主, 而重庆、贵州全域及云南南部已基本转为湿润。6~8 月, 雨季降水驱动全域 VCI 显著回升, 干旱区基本消退, 云贵川渝四省市均以湿润为主, 旱情全面解除, 区域植被水分条件达到全年最佳状态; 9 月, 川渝交界地带率先出现连片干旱, 其余区域仍维持湿润, 干旱呈局地爆发态势; 10 月, 随雨季结束、降水补给减少, 干旱区由川渝交界向周边快速蔓延, 四川东部、重庆大部及贵州南部均出现连片干旱; 11 月, 干旱进一步向四川西北部及中部扩张, 覆盖四川大部、重庆西部, 仅云南南部与贵州东南部仍维持稳定湿润, 区域干旱空间分异特征愈发显著; 12 月, 全域干旱范围达年内次高峰, 四川大部、重庆大部及贵州北部均处于干旱状态, 仅云南南部与贵州东南部保留部分湿润, 整体呈现“东北旱情重、西南受旱轻”的格局。

4.2. 基于 SPEI 的西南地区典型干旱事件监测空间分布

由图 4 可知, 2010 年西南地区 SPEI 干旱呈典型季节性干湿交替特征, 整体以冬春连旱为核心。1~4 月



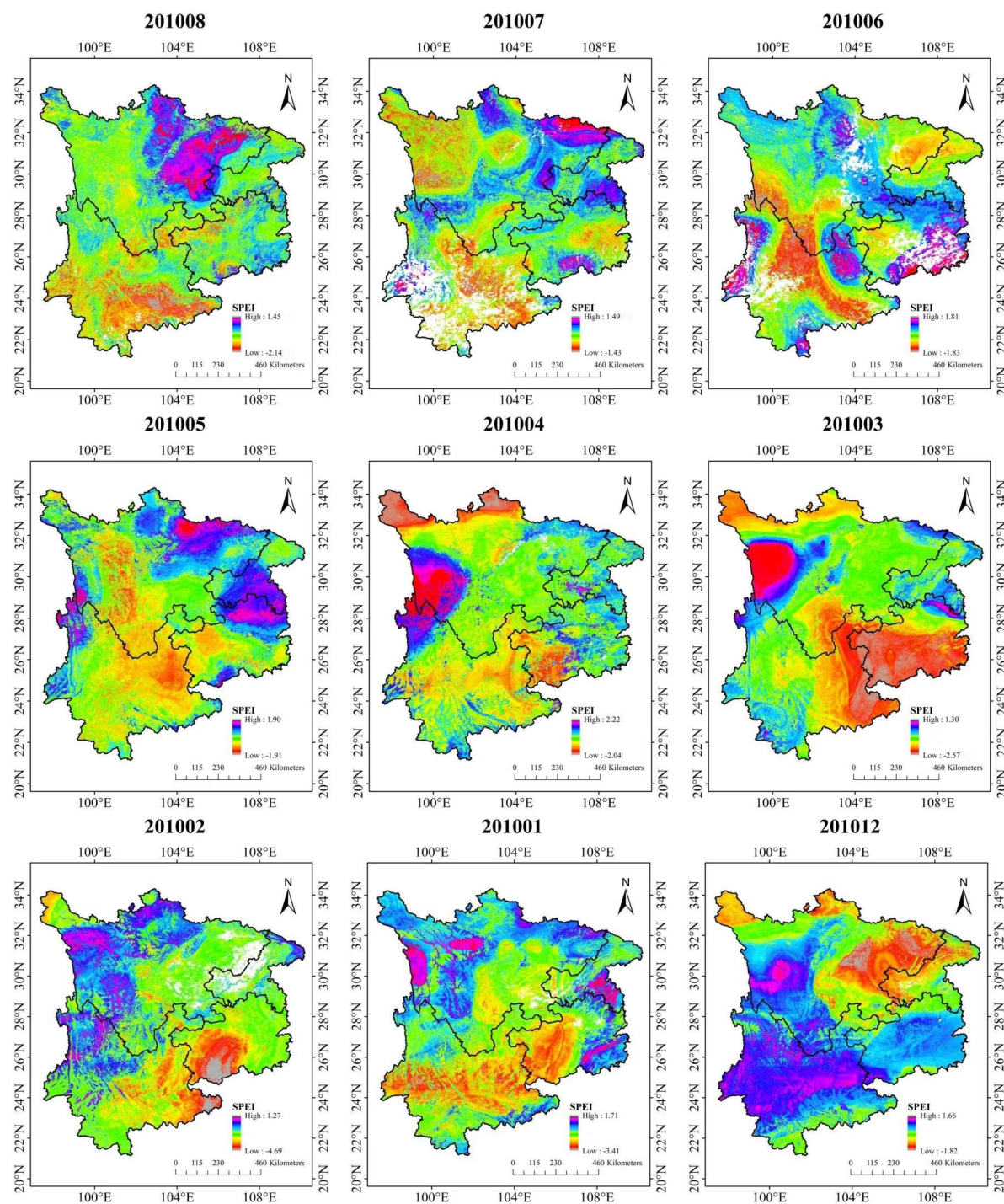


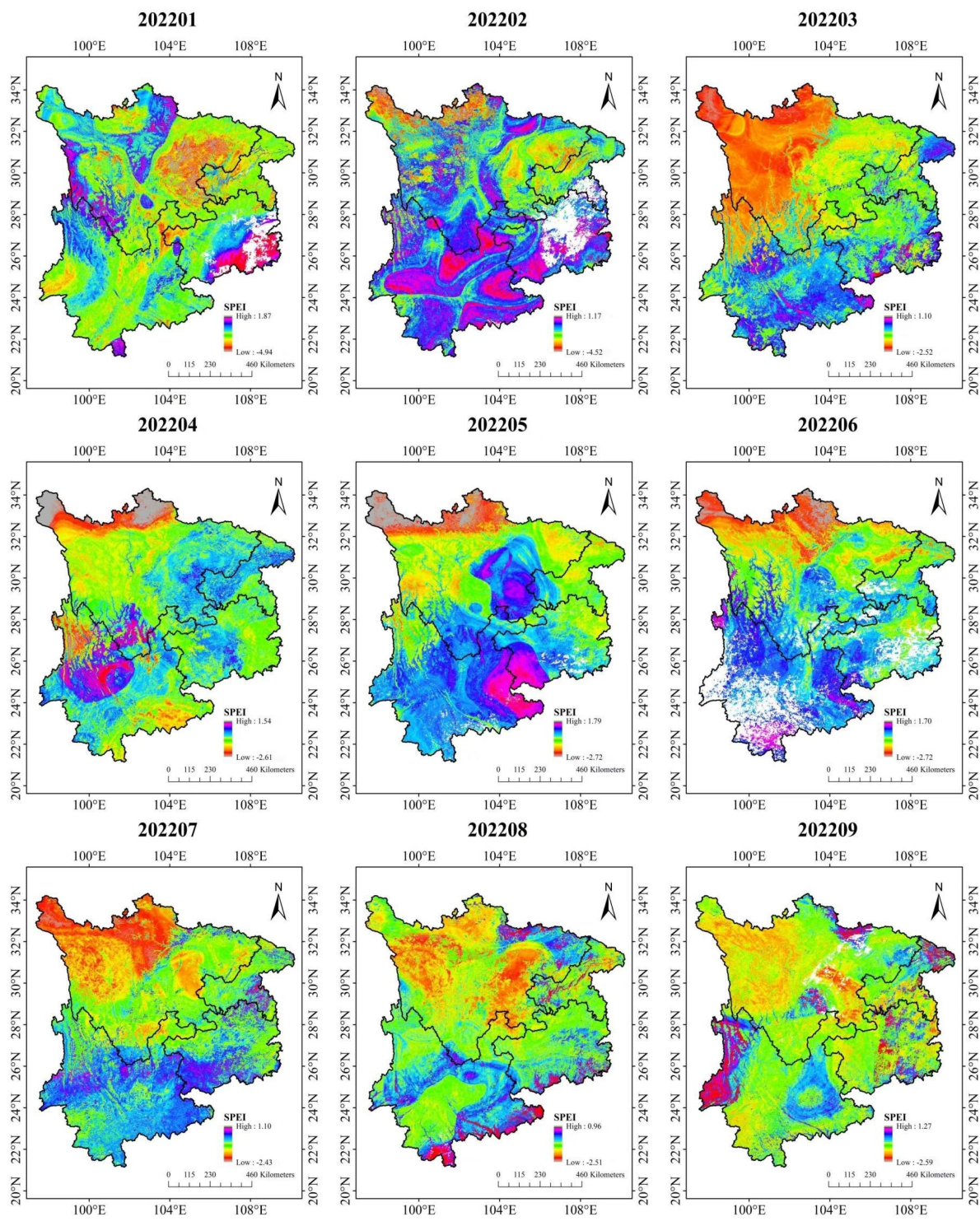
Figure 4. Spatial distribution of SPEI monitoring from January to December in 2010

图 4. 2010 年 1-12 月 SPEI 监测空间分布图

旱情由南向北、由局部向全域快速扩展, 3~4 月达重特旱高峰, 5~8 月随夏季降水整体缓解, 仅南部局地残留干旱, 9~12 月旱情呈局地阶段性反复, 未重现春季极端规模。

由图 5 可知, 2022 年西南地区 SPEI 季节分异特征突出, 干旱年内演化阶段分明。年初冬春干旱自北部局地始发, 低值干旱区逐月向南扩张, 胁迫程度持续累积; 盛夏 7~8 月全域旱情达年内顶峰, 川

渝及黔北区域大范围连片干旱, 仅区域南部边缘维持湿润状态; 进入秋季后全域旱情逐步舒缓, 干旱范围自北向南持续收缩, 湿润区间不断扩张; 年末全区干湿格局趋于均衡, 整体干旱态势全面回落。空间上, 干旱格局南北差异显著, 川渝、黔东北为全年干旱核心区, 滇西南区域湿润条件最优, 干旱风险最低。



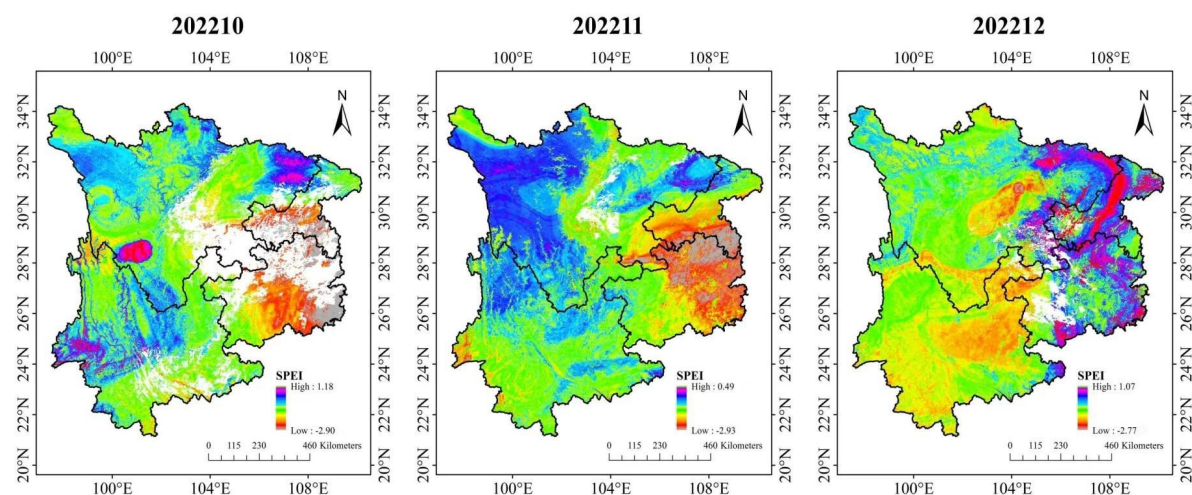


Figure 5. Spatial distribution of SPEI monitoring from January to December in 2022

图 5. 2022 年 1~12 月 SPEI 监测空间分布图

4.3. VCI 与历史典型干旱事件的适用性分析

图 6 给出了 2010 年与 2022 年西南四省市年均气温和降水总量的统计结果。2010 年干旱主要受冬春持续少雨驱动, 研究区年均气温总体偏高, 云南、贵州两省季节降水量明显不足, 形成以水分亏缺为主要特征的冬春连旱[20]。2022 年干旱表现为夏秋极端高温与降水显著偏少的复合型特征, 其中四川气温升幅居四省市之首, 各省(市)降水量普遍少于 2010 年, 川渝地区高温与降水亏缺的叠加效应最为显著, 旱情强度及影响范围均超过 2010 年[21][22]。

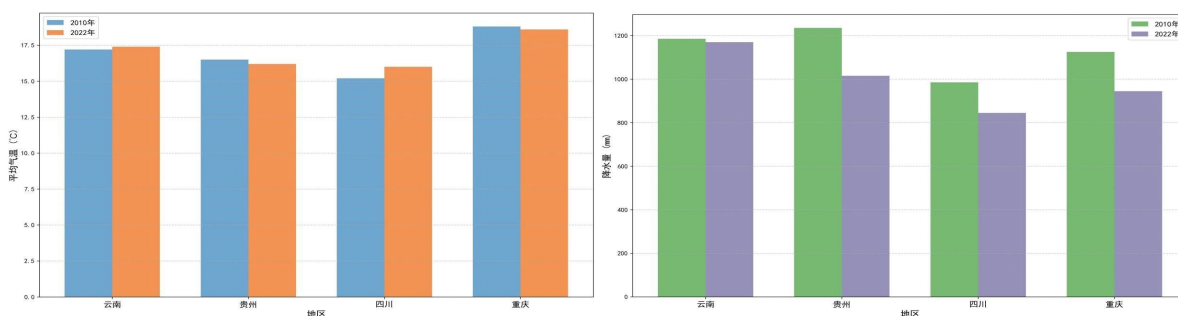


Figure 6. Annual average temperature and precipitation in different regions of Southwest China in 2010 and 2022

图 6. 西南地区 2010 和 2022 年不同区域年平均气温和降水量

4.3.1. 2010 年典型案例

2010 年, 西南地区发生特大干旱, 云南、贵州两地受灾程度达百年一遇级别, 西南四省市形成罕见的冬春连旱格局(表 1)[20]。此次干旱于 3 月中旬至 4 月初达到鼎盛, 其中 3 月下旬灾情最为严重。峰值期间, 西南五省耕地受旱面积近亿亩, 大量农作物重旱甚至干枯, 两千多万群众及千万头大牲畜出现饮水困难。贵州部分区域连续 235 天无有效降水, 四川攀西地区无雨时长超过 160 天, 云南多地数月累计降水量不足百毫米, 达到百年一遇特大干旱等级。4 月底至 5 月中旬, 多轮降雨过程陆续出现, 重庆、四川等地旱情率先缓解并基本解除, 贵州大部、云南旱情随之缓和。5 月中旬后, 西南地区正式进入雨季, 大范围有效降水彻底扭转缺水局面, 全区干旱基本结束, 仅云南局部零星旱情延续至 5 月下旬才完全收尾。

Table 1. Statistics of drought disaster in provinces (municipalities) of Southwest China in 2010
表 1. 2010 年西南地区各省(市)干旱灾情统计

区域	云南	贵州	四川	重庆
旱情	大部达特大干旱级别, 7 个月累计降水不足 100 mm, 744 条小河断流。受灾面积 3148 万亩, 占已播种面积的 85%, 绝收面积超过 1000 万亩。全省小春粮食约减产 50%以上, 甘蔗减产 20%以上。因干旱新增缺粮人口 331 万, 需救助缺粮人口 714.78 万人。	西部达特大干旱级别, 3 月灾情最重。西南部连续 235 天无有效降水, 3600 条溪沟断流。因旱饮水困难人口 756.59 万人。农作物受灾面积 1271.3 千公顷, 全省耕地受旱约 2100 万亩, 山塘水库干涸严重, 土壤墒情极差, 春播农作物大面积绝收, 为有气象记录以来最严重的秋冬春连旱。	2009 年 12 月川南、攀西率先出现旱情, 2010 年 3 月中下旬灾情最重。全省受旱约 1600 万亩, 310 万人、220 万头大牲畜饮水困难。攀西地区连续无雨超过 160 天, 川南及川中丘陵区降水较常年偏少 5~6 成, 江河来水与库塘蓄水量大幅减少, 农业生产和农村供水受到严重影响。	2009 年入冬后渝东南、渝西南旱情显现, 2010 年 3 月旱维持。耕地受旱约 730 万亩, 192 万人、128 万头大牲畜饮水困难。全市降水较常年同期偏少 4 成以上, 丘陵、山区农田缺水突出, 小春作物受灾严重, 城镇边缘乡镇供水紧张, 是当年西南干旱中灾情较重的区域之一。

结合 2010 年西南特大干旱的历史灾情验证, VCI 指数整体适用性较优, 与实际旱情的时间同步性较强。该指数能够反映出植被绿度生长状态, 对气象干旱响应灵敏且无明显滞后, 可准确还原 2010 年干旱冬春始发、3~4 月达到峰值、4 月底至 5 月逐步缓解的时间演变过程。空间分布上, VCI 能清晰区分云贵川渝各地的受旱程度差异, 与灾情记录吻合度较高, 可适用于对西南地区气象干旱与植被干旱的监测、峰值识别及时空格局分析。

4.3.2. 2022 年典型案例

2022 年, 云贵川渝地区发生夏秋两季连旱事件(表 2)。夏秋极端干旱于 6 月中旬率先在川渝显现; 7 月后, 云南、贵州相继受副热带高压控制, 降水异常偏少、高温天气频发, 干旱迅速蔓延至全域, 形成大范围持续性气象干旱。此次干旱于 8 月下旬达到峰值, 其中 8 月 22~24 日灾情最为严重。云贵川渝区域遭遇极端高温热浪与重度气象干旱叠加, 重庆、四川多地气温突破历史极值, 大量农田受旱, 部分中小河流断流, 小型水库塘坝干涸, 城乡农业灌溉及人畜饮水保障压力达整个旱期最大, 该时段为当年全国干旱强度最大、影响范围最广的时期。8 月底至 9 月上旬, 多轮降雨过程陆续出现, 川渝旱情率先缓解; 9 月中下旬, 贵州终止抗旱应急响应, 旱情基本解除, 云南大部旱情逐步缓和; 9 月底, 云贵川渝大范围持续性干旱整体结束, 局部零星轻旱于 10 月完全消散, 本次西南夏秋极端干旱过程正式收尾。

Table 2. Statistics of drought disaster in provinces (municipalities) of Southwest China in 2022
表 2. 2022 年西南地区各省(市)干旱灾情统计

区域	云南	贵州	四川	重庆
旱情	7~8 月, 昭通市极端最高温度 34℃~44℃, 降水量较常年同期减少 43.5%, 部分县水源、溪流干枯断流。昭通市 11 个县(市、区)129 个乡镇 188 万人次遭受旱灾, 因旱饮水困难需救助 5.5 万人, 农作物受灾 133.51 千公顷, 直接经济损失 8.43 亿元。	东北部特旱, 全省平均降雨量较常年同期偏少近 6 成, 平均气温偏高 1.7℃。秋粮减产, 水库蓄水严重不足。干旱造成全省 8 个市(州) 76 个县(市、区) 331.9 万人次受灾, 农作物受灾面积 26.6 万公顷, 直接经济损失 25 亿元, 占各类自然灾害损失的 31%。	盆地大部特旱, 高温日数超过 40 天, 水电锐减导致严重限电, 多地人畜饮水困难。干旱累计造成除攀枝花外的 20 个市(州) 122 个县(市、区) 609.4 万人受灾; 受旱面积 43.1 万公顷, 农作物受灾面积 43.3 万公顷, 绝收面积 4.7 万公顷; 直接经济损失 35 亿元。	累计因旱受灾 195.73 万人, 农作物受灾面积 23.58 万公顷, 直接经济损失约 21.18 亿元, 涉及 36 个区县。全市 197 条河流断流, 90 座水库干涸, 水利工程实际蓄水量 22.35 亿立方米, 占应蓄水量的 59.81%, 可供水量 16.5 亿立方米。

从 2022 年西南地区夏秋极端干旱的灾情演变过程来看, VCI 仅能反映研究区 1~4 月冬春时段的局部植被缺水状态, 在 7~8 月却呈现出大范围偏湿润的空间分布, 与该时段实际旱情严重不符, 表明该指数难以表征 2022 年 6~10 月云贵川渝的大范围极端干旱事件, 对夏秋季节高温复合型干旱的识别能力整体偏弱。

4.4. VCI 与 SPEI 的相关性分析

以 SPEI-3 (3 个月) 作为干旱真值基准, 采用皮尔逊线性相关与斯皮尔曼秩相关方法, 计算 2010 年 1~4 月和 2022 年 7~10 月 SPEI 与 VCI 的相关系数及显著性水平, 结合 SPEI 西南干旱时空分布图, 验证 VCI 对西南干旱监测的适用性。

4.4.1. 2010 年典型案例

2010 年云贵川渝干旱发生于 1~4 月。1 月旱情从滇、黔南部初现并缓慢发展; 2~3 月降水显著偏少, 旱情迅速扩张至全域并达到峰值, 川南、滇东北、黔西北为重旱核心区; 4 月降水增多, 区域旱情逐步消退。图 7 为 2010 年 1~4 月 VCI 与 SPEI 的相关系数和显著性空间分布。

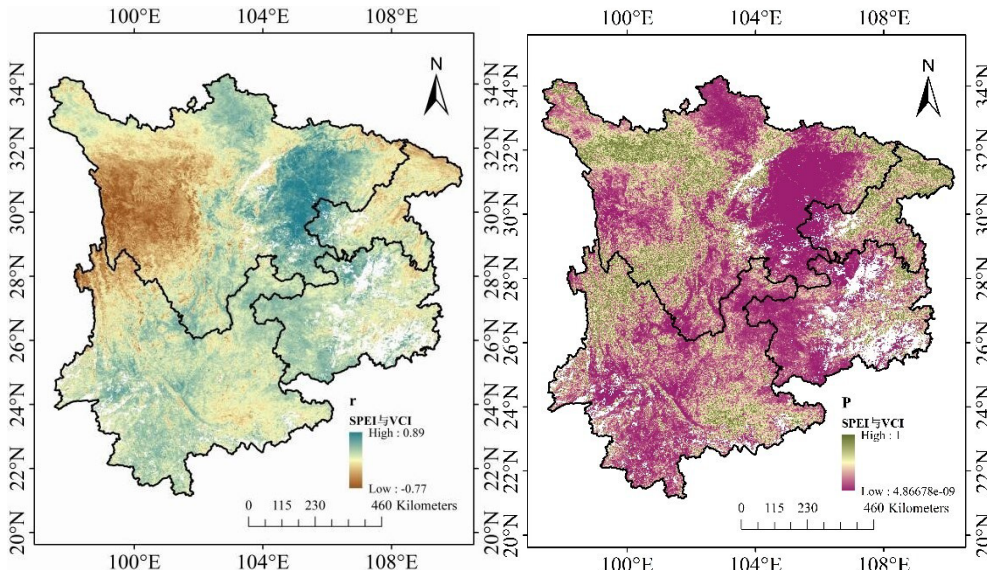


Figure 7. Spatial distribution of correlation coefficients and significance between VCI and SPEI from January to April 2010

图 7. 2010 年 1-4 月 VCI 与 SPEI 的相关系数和显著性空间分布

可以看出, 2010 年 1~4 月, 西南地区 SPEI 与 VCI 的相关系数空间区间为-0.77~0.89。空间格局上, 黔渝东部及研究区中东部为大范围连片青蓝色高正相关区, 相关系数峰值达 0.89, 表明该区域内植被干旱与气象干旱的干湿波动高度协同, 指数响应同步性强; 仅川中西局部区域分布棕黄色负相关斑块, 指数变化趋势存在小幅背离。显著性空间分布上, 全域总体区域均处于低 P 值极显著区间, 紫红色显著斑块覆盖范围广, 相关结果统计显著性可靠。综上, 2010 年 VCI 在研究区中东部及东部主体区域的干旱监测适配性优异, 能够精准捕捉气象干旱全过程的时空演变特征, 仅川西局部边缘区域受下垫面环境影响, 监测适配性偏弱。

4.4.2. 2022 年典型案例

2022 年云贵川渝干旱集中在 7~10 月。7 月受持续高温少雨影响, 干旱始于川渝地区; 8 月至 9 月上

旬, 极端高温持续维持, 全区旱情发展至最强, 川渝、黔北、滇北干旱最为严重; 9月下旬至10月, 降温降水过程增多, 旱情逐步缓解并结束。图8为2022年7~10月VCI与SPEI的相关系数和显著性水平空间分布。

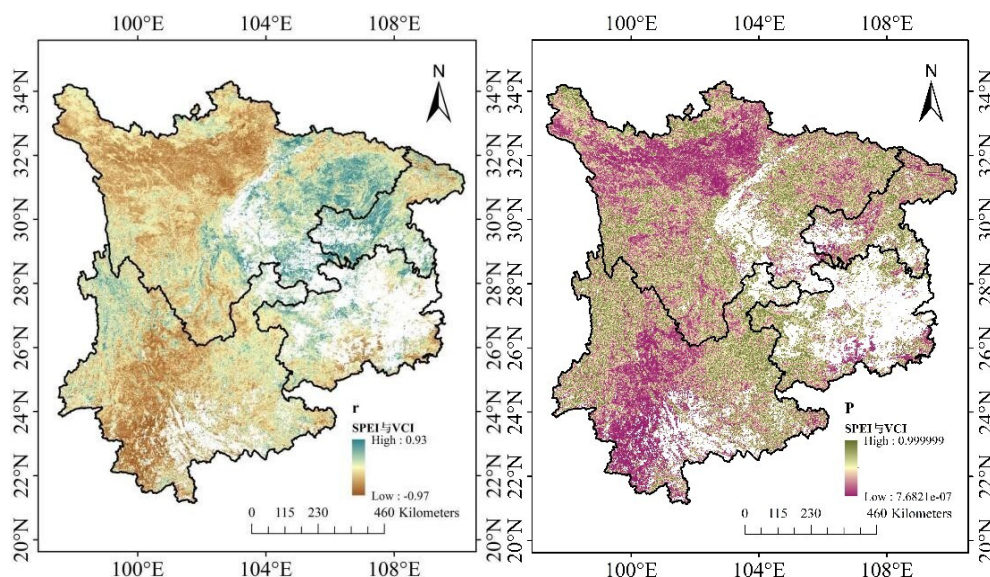


Figure 8. Spatial distribution of correlation coefficients and significance between VCI and SPEI from July to October 2022

图8. 2022年7~10月VCI与SPEI的相关系数和显著性空间分布

可以看出, 2022年7~10月, 西南地区SPEI与VCI的相关系数空间区间为-0.97~0.93。空间格局上, 研究区东部黔渝大部为大范围连片青蓝色高正相关区, 相关系数峰值达0.93, 表明该区域内两指数的干湿波动高度同步, 干旱响应协同性极强; 川渝北部、滇中南等区域以棕黄色负相关区间为主, 指数变化趋势存在明显背离。显著性空间分布上, 全域绝大部分区域P值均处于低水平, 大面积紫红色显著区连片覆盖, 仅零星区域无显著相关性。综上, 二者相关性具有较高的统计学可信度, 相对VCI在研究区东部及东南部区域的干旱监测适配性最优, 而在川滇西部、南部部分区域由于受植被物候及下垫面差异影响, 指数响应偏差较大, 适配性偏弱。

5. 结论

基于2010~2022年MODIS遥感数据与气象站点资料, 以SPEI为参照, 通过历史典型干旱事件对比与空间相关分析, 系统评估了VCI在西南地区不同类型干旱下的监测适用性, 得到以下主要结论: 1) VCI适用性受干旱类型显著影响。降水连续亏缺主导的2010年冬春连旱中, VCI与SPEI及灾情记录高度吻合, 能准确刻画干旱的时空演变, 响应灵敏且无明显滞后; 而在高温胁迫主导的2022年夏秋连旱中, VCI整体响应偏弱, 难以有效识别高温复合型干旱。这表明VCI更适用于以水分胁迫为主的气象与农业干旱监测, 对热胁迫突出的干旱事件监测能力有限。2) VCI适用性具有明显的空间分异。高海拔裸土区及稀疏植被区表现较好, 高植被覆盖区及高温干旱场景下敏感性不足。相关分析显示, VCI与SPEI在川渝东部、黔渝大部呈显著高正相关, 而在川西、滇中南存在负相关或不显著关系, 受下垫面与植被物候影响较大。

上述适用性差异与局限性的形成机理值得进一步探讨。就2022年高温干旱而言, VCI监测失效可从两个层面加以理解: 其一, NDVI在高植被覆盖区存在固有饱和效应——西南地区夏季正值植被生长旺

季, 叶面积指数普遍较高, 此时即使高温热浪已造成实质性水分胁迫, NDVI 也难以产生数值上的显著响应, 经由归一化后 VCI 的真实干旱信号被进一步压制; 其二, 本研究采用的月尺度 VCI 对“闪旱”等快速发展型干旱存在时间平滑效应, 难以捕捉数周内旱情的急剧攀升过程, 导致指数响应滞后且强度被低估。针对 VCI 与 SPEI 在川西、滇中南等区域呈现负相关或不显著相关的现象, 可能机制包括高海拔区域的“增温利好”效应(气温升高促进热量受限区植被生长, 使 VCI 变化趋势与 SPEI 相悖)、不同植被类型(常绿林与落叶林)对水分胁迫响应时差的差异、灌溉农业等人为干扰对 VCI 背景值的调节, 以及喀斯特地貌特殊水文过程导致的植被可利用水分与气象指标之间的系统性偏差。上述可能机制还有待后续结合高分辨率土地利用数据、植被功能类型图以及地下水位资料开展定量验证。

综上, 单一遥感指数难以在所有干旱类型和区域中保持稳定监测效果, 需根据干旱类型与地理区域差异化选用, 或联合土壤水分、地表温度等多源数据构建组合监测模型。西南地区极端干旱事件呈频发与复合化趋势, VCI 在高温干旱场景下的低敏感性进一步凸显了单一指数的固有局限。后续研究可融合 SMAP、GRACE 等多源遥感数据与机器学习算法, 通过多变量指数, 以提升干旱监测精度, 为区域防旱减灾与水资源管理提供更可靠的科学支撑。

基金项目

四川省科技计划资助项目(2025NSFSC2045)。

参考文献

- [1] Huang, J., Li, X., Wang, L., Wang, X., Li, S. and Zhang, F. (2026) Construction and Performance Evaluation of a Compound High-Temperature and Drought Index for Summer in Southwest China. *Natural Hazards*, **122**, Article No. 475. <https://doi.org/10.1007/s11069-026-08252-0>
- [2] Li, X.H., Li, S.R., Wang, L., Wang, X.J. and Huang, J. (2026) Spatiotemporal Variability of Drought-Flood Abrupt Alternation Events in Southwest China during 1961 to 2024. *Theoretical and Applied Climatology*, **157**, Article No. 96. <https://doi.org/10.1007/s00704-026-06024-1>
- [3] 何志远, 钟九生, 代仁丽, 等. 基于机器学习的综合干旱监测建模及在西南地区应用[J]. 水利水电技术, 2022, 53(2): 43-51.
- [4] Kogan, F.N. (2002) World Droughts in the New Millennium from AVHRR-Based Vegetation Health Indices. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **83**, 557-563. <https://doi.org/10.1029/2002eo000382>
- [5] Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., et al. (2010) Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. *Journal of Climate*, **23**, 618-633. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2900.1>
- [6] Kogan, F.N. (1995) Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection. *Advances in Space Research*, **15**, 91-100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-t](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-t)
- [7] 刘闯, 葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. 遥感信息, 2000(3): 45-48.
- [8] 王宗敏, 杨海波, 计淇才, 等. 基于 MODIS 的河南省遥感干旱监测研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 139-143, 211.
- [9] 孙灏, 高金华, 闫亭廷, 等. 植被干旱遥感监测方法研究进展[J]. 遥感学报, 2024, 28(6): 1395-1411.
- [10] 马梓策, 孙鹏, 张强, 等. 基于 MODIS 数据的华北地区遥感干旱监测研究[J]. 地理科学, 2022, 42(1): 152-162.
- [11] 罗彪, 刘潇, 郭萍. 基于 MODIS 数据的河套灌区遥感干旱监测[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 44-54.
- [12] 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.
- [13] 陈维英, 肖乾广, 盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J]. 环境遥感, 1994, 9(2): 106-112.
- [14] 沈润平, 郭佳, 张婧娴, 等. 基于随机森林的遥感干旱监测模型的构建[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 125-133.
- [15] Li, S.R., Li, X.H., Wang, L. and Wang, X.J. (2026) Spatiotemporal Evolution of Drought-Flood Abrupt Alternation

- Events and Their Relationship with Evapotranspiration in Southwest China: Based on CMIP6 Models and Future Projections. *Atmosphere*, **17**, Article 285. <https://doi.org/10.3390/atmos17030285>
- [16] 贾何佳, 李谢辉, 王磊, 等. 基于机器学习的西南地区遥感干旱监测与评估[J]. 高原气象, 2022, 41(6): 1572-1582.
- [17] 李新尧, 杨联安, 聂红梅, 等. 基于植被状态指数的陕西省农业干旱时空动态[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1172-1180.
- [18] Li, X.H., Jia, H.J. and Wang, L. (2023) Remote Sensing Monitoring of Drought in Southwest China Using Random Forest and Extreme Gradient Boosting Methods. *Remote Sensing*, **15**, Article 4840. <https://doi.org/10.3390/rs15194840>
- [19] Li, X.H., Wang, X.J. and Wang, L. (2026) Characteristics and Causal Drivers of the Summer 2024 Heatwaves in the Sichuan-Chongqing Region, Southwest China. *Theoretical and Applied Climatology*, **157**, Article No. 207. <https://doi.org/10.1007/s00704-026-06135-9>
- [20] 段海霞, 王劲松, 刘芸芸, 等. 2009/2010 年我国西南秋冬春连旱特征及其大气环流异常分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 1022-1035.
- [21] 孙昭萱, 张强, 孙蕊, 等. 2022 年西南地区极端高温干旱特征及其主要影响[J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 764-770.
- [22] 王林, 陈文, 黄刚, 等. 中国西南超级干旱的变化特征和多尺度异常叠加效应分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(7): 2114-2132.