

钟湧, 高磊, 彭新华. 南方红壤区季节性干旱研究进展. 土壤, 2025, 57(6): 1313–1322.

## 南方红壤区季节性干旱研究进展<sup>①</sup>

钟 湧<sup>1,2</sup>, 高 磊<sup>1\*</sup>, 彭新华<sup>3\*</sup>

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100;

3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 我国南方红壤区水热资源丰富, 但由于降水的时空分布不均以及红壤黏重板结的物理特征, 红壤区季节性干旱频繁发生, 严重威胁该区域农业的可持续发展。在全球气候变化和人类活动的双重影响下, 近年来红壤区季节性干旱的威胁呈加剧趋势, 其形成机理与防控对策引起了广泛关注。本文通过文献梳理, 系统阐述了红壤区季节性干旱的类型及特征, 回顾了干旱研究范式从传统定点观测向遥感、地理信息系统与数值模型综合应用的转变, 总结了干旱的时空演变规律及其在气候变化、土壤响应和人为扰动下的多要素驱动, 并在此基础上, 对未来研究方向进行了展望。

**关键词:** 季节性干旱; 亚热带季风气候区; 气候变化; 时空特征; 驱动因素

**中图分类号:** S-16      **文献标志码:** A

### Review of Seasonal Drought in the Red Soil Region of Southern China

ZHONG Yong<sup>1,2</sup>, GAO Lei<sup>1\*</sup>, PENG Xinhua<sup>3\*</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The red soil region of southern China is endowed with abundant hydrothermal resources; however, the uneven spatiotemporal distribution of precipitation and clayed physical properties of red soils have led to frequent seasonal drought, posing a serious threat to the sustainable development of agricultural in this region. Under the combined effects of global climate change and human activities, the threat of seasonal drought in the red soil region has intensified in recent years, drawing widespread attention to its formation mechanisms and mitigation strategies. Through a comprehensive review of the literature, this paper systematically elaborated on the types and characteristics of seasonal droughts in the red soil region; examined the shift in drought research paradigms from traditional point observations to integrated application of remote sensing, geographic information system, and numerical modeling; and summarized the spatiotemporal patterns of drought and the multi-factor drivers behind its evolution under climate change, soil responses, and anthropogenic disturbances. Building on a systematic synthesis of past research, the paper offered prospects for future research directions.

**Key words:** Seasonal drought; Subtropical monsoon region; Climate change; Spatiotemporal characteristics; Driving factors

在气候和土壤的双重作用下, 红壤区夏秋季通常发生季节性干旱。我国南方红壤区, 主要包括长江以南的江西、福建、浙江、安徽、湖南、湖北、广东、广西、海南、台湾以及云贵高原部分地区。该区域受热带亚热带季风气候影响, 降水丰沛, 年均降水量高达 1 200~2 000 mm<sup>[1]</sup>, 但是季节分布不均, 50% 集中于 4—6 月, 而在 7—9 月, 红壤区多呈现气温高、

降雨少的气候特征, 以江西鹰潭为例, 7—9 月降水量仅占全年总量的 14%, 蒸发量却占全年总量的 50%<sup>[2-3]</sup>。加之, 南方红壤普遍存在黏重板结等结构障碍, 保水保肥能力弱, 且区域灌溉设施缺乏, 导致其抵御干旱能力差<sup>[4]</sup>。

全球变化背景下, 极端天气事件频发, 区域人类活动干预增强, 导致南方红壤区季节性干旱的频率、

①基金项目: 井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051261)和国家自然科学基金项目(42477323)资助。

\* 通信作者(lgao@issas.ac.cn; pengxinhua@caas.cn)

作者简介: 钟湧(2000—), 男, 江西赣县人, 博士研究生, 主要从事农田水利研究。E-mail: zhongyong@hhu.edu.cn

强度和影响范围均呈现出显著的加剧趋势<sup>[5]</sup>。季节性干旱对农林生产、水资源管理乃至社会经济稳定构成严重威胁<sup>[6]</sup>。例如, 2019 年长江中下游地区发生了严重的夏秋伏旱, 农作物受灾面积超过 96 万 hm<sup>2</sup><sup>[7]</sup>。2022 年夏秋季节, 南方地区经历了自 1980 年以来最为严重的干旱事件, 特别是在长江中下游以南地区, 据统计, 这次干旱使得超过 609 万 hm<sup>2</sup> 的农作物受灾, 造成经济损失约 512 亿元<sup>[8]</sup>。

随着南方红壤季节性干旱问题的不断凸显, 相关研究也逐渐深入, 并经历了从单一学科分析向综合研究范式的演进。早期研究多局限于气象学或土壤学的单一学科视角, 主要聚焦于干旱现象的描述和单一成因分析<sup>[9-10]</sup>。近年来, 随着遥感(remote sensing)、地理信息系统(geographic information system)及数值模型(numerical model)等新技术的发展与应用, 该领域的研究范式正朝着多学科交叉、多尺度融合与多源数据驱动的系统性方向转变, 显著提升了对红壤干旱机制的认知。

在此背景下, 本文在系统梳理和评述南方红壤区季节性干旱研究脉络与前沿进展的基础上, 综述近年来在季节性干旱类型、研究方法、时空特征以及影响因素等方面的主要研究进展, 以期为深化季节性干旱机理认识、提升预测预警能力和制定科学应对策略提供依据。

## 1 季节性干旱类型界定

干旱是一种复杂的自然现象, 其本质是水分收支失衡导致的水分亏缺。在南方红壤区, 季节性干旱的发生与演变并不是孤立过程, 而是由大气环流驱动, 并经由水文、土壤等地表介质逐级传递和响应的链式发生过程。气象干旱作为整个干旱链的始发环节, 持续的降水亏缺会造成土壤水分的持续消耗, 形成对农业和生态系统构成最直接威胁的土壤干旱, 再进一步扩展至地表水文系统, 导致河流径流减少、水位下降, 引发更为持久的水文干旱。因此, 本节从气象干旱、土壤干旱和水文干旱 3 个环节展开剖析。

### 1.1 气象干旱

气象干旱是指因降水持续亏缺和气温偏高导致蒸散发加剧, 从而引发水分收支失衡的现象。在南方红壤区, 气象干旱主要表现为伏秋连旱, 其典型特征是“高温、少雨、强日照、高蒸发”。其形成机制与西太平洋副热带高压的强度与时空演变密切相关<sup>[11]</sup>。夏季, 当西太平洋副热带高压异常强盛并西伸北抬, 持续控制华南、江南地区时, 其内部强烈的下沉气流

会抑制对流活动, 进而导致持续性的以高温少雨为主要特征的天气。这种由大气动力下沉造成的高温少雨状态, 叠加热力作用下的高强度蒸散, 共同造成了近地表空气相对湿度持续走低的现象。若此类环流异常, 持续至秋季, 则易演变为影响更为严重的夏秋连旱。因此, 该区域的气象干旱本质上源于降水在年内分配的不均, 构成了南方季节性干旱发生链的初始触发环节。

### 1.2 土壤干旱

土壤干旱是干旱链中对生态与农业系统产生实质影响的关键环节, 指土壤有效含水量持续下降, 导致无法满足植被正常生长需求的水分胁迫现象。在南方红壤区, 土壤干旱的形成与加剧不仅受控于气象干旱, 更根植于其独特的土壤物理性质。南方红壤普遍存在质地黏重、有机质含量低、团粒结构不良等固有缺陷, 导致土壤持水能力弱、有效水库容小, 可供作物直接利用的有效水比例不足<sup>[12]</sup>。在干湿交替作用下, 红壤表层极易形成物理结皮, 严重阻碍雨水入渗, 加剧地表径流损失, 进一步降低红壤的抗旱能力。此外, 南方广泛分布的丘陵地貌往往伴随土层浅薄、土壤水库容小等问题。上述多种不利特性叠加, 导致南方红壤区在面临同等强度的气象干旱时, 土壤水分的保持与补给能力明显逊于其他区域, 更易、更快地发展为严重的土壤干旱, 对农业生产和生态安全的威胁更大, 因此, 红壤区的土壤干旱问题应受到更多重视。

### 1.3 水文干旱

水文干旱是气象和土壤干旱的延伸和发展, 是指因降水的长期短缺导致江河径流、水库湖泊蓄水及地下水位等显著下降的现象<sup>[13]</sup>。在南方红壤区, 水文干旱作为大气降水异常与陆地水储量变化之间的关键纽带, 呈现出明显的区域性特征。其成因在于, 该地区年降水量虽大, 但降水时空分布严重不均; 汛期过后降水锐减, 高温天气持续存在, 导致地表水得不到有效补给, 同时强烈的蒸散发进一步消耗生态系统水的储量。因此, 水文干旱主要表现为河流径流量下降或断流、水库蓄水量与地下水位持续降低。这类干旱往往持续时间长、危害大, 不仅直接制约区域供水安全, 还可能演变为更深远的社会经济干旱。

## 2 季节性干旱研究范式演进

季节性干旱的科学研究范式, 是指为解析干旱形成机理与时空演变规律所形成的理论基础、研究方法和技术规范的集合。其发展历程体现为从以“点”观测为核心的传统研究范式, 向以“面”集成为特征的

现代综合研究范式的转变(图 1)。传统研究范式的核心特征是在“点”尺度上对单一圈层的物理过程进行分析,这种范式虽为理解干旱过程奠定了基础,但在一定程度上限制了对干旱的多尺度特征与多圈层耦合过程的系统认知。随着卫星遥感、地理信息系统等空间信息技术的快速发展,一种全新的综合研究范式应运而生,通过大范围、连续性的时空数据,可以刻画干旱事件的区域分异,从而揭示其在不同圈层间的耦合机制。作为校准和验证遥感反演模型与数值模拟结果的基准,传统范式获取的站点尺度观测数据在现代综合研究范式中发挥着重要作用,显著提升了区域尺度干旱评估的可靠性。下文将分别阐述这两种研究范式及其演进脉络。

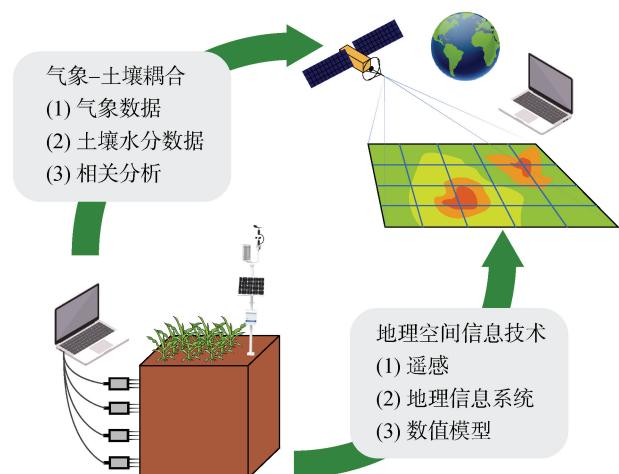


图 1 季节性干旱的研究范式  
Fig. 1 Research paradigms of seasonal drought

## 2.1 气象-土壤水分耦合研究范式

自 20 世纪 90 年代末以来,季节性干旱研究主要建立在两类定位观测数据之上:一是气象站点的长时序气象数据(如降水、气温),二是基于田间试验的土壤水分原位监测数据,通过相关分析的方法将两者进行关联。在气象学领域,学者通过计算降水距平百分率(PA)、标准化降水指数(SPI)、帕默尔干旱指数(PDSI)等指标,对气象干旱进行定量评估与动态监测<sup>[14-15]</sup>。例如,黄道友等<sup>[9]</sup>利用湖南省桃源县的长序列气象资料,探讨了典型红壤丘陵区季节性干旱的成因及发生规律。黄晚华等<sup>[16]</sup>基于 SPI 分析指出,中国南方近几十年的季节性干旱加剧主要体现在春、秋两季。张菡等<sup>[17]</sup>对四川省盆地区季节性干旱的研究进一步证实了气候变化对该地区干旱化的影响,尤其是在春季。此外,吴少强等<sup>[18]</sup>基于江西省 15 个气象台站 1957—2015 年逐日降水资料,以连续无有效降水日数(DNP)为指标,揭示了江西省季节性干旱的时空

分布特征。

在土壤学领域,研究主要聚焦于土壤水分的测定与动态分析。土壤水分主要利用点尺度的传感器方法,包括中子仪、频域反射仪和时域反射仪等进行原位观测,结合土壤理化性质,分析土壤干旱的发生特征和对气象干旱的响应规律。例如,王晓燕等<sup>[19]</sup>利用时间序列法分析了降雨和土壤水分的响应关系。贾秋洪等<sup>[2]</sup>通过对比气象数据和土壤水分实测数据,揭示了两种方法在季节性干旱判别上可能存在的不一致性。部分研究致力于构建基于土壤含水量的干旱指标,例如,陈家宙等<sup>[20]</sup>发现,在土壤持续干旱的情况下,土壤有效贮水量与累积相对失水量之间的关系可以用对数方程( $Y=\ln(X)+b$ )拟合,并据此构建了干旱强度( $I$ )和干旱程度( $D$ )指标,用以定量评估作物的受旱程度。

基于点尺度气象资料和土壤水分监测的传统研究范式存在两个局限。首先,研究路径存在学科壁垒,气象学与土壤学的研究相对独立,分别聚焦于大气水分供给和土壤水分存储两个单一维度,未重视干旱在“土壤-植被-大气”连续体(SPAC)内系统性的发生发展过程,从而忽视了各圈层间的耦合与反馈机制;其次,研究手段受限于空间尺度,基于站点的观测本质上是“以点代面”,其空间代表性不足,难以捕捉干旱事件在区域尺度上的时空异质性与动态演变过程,而大量联网监测又会大幅推高成本,最终限制了对区域干旱机理的认识。

## 2.2 多技术融合的综合研究范式

近年来,随着土壤水分大尺度快速监测和大数据处理等新技术的快速发展,使季节性干旱研究突破传统定位观测的局限成为可能。在这一背景下,以系统性思维为指导,通过多源数据融合与多模型集成,实现了从“点”到“面”、从“现象描述”到“机理揭示”的跨越,将干旱研究推向了综合、定量、多尺度的新阶段<sup>[21]</sup>。该范式主要依托遥感监测、地理信息系统和数值模型 3 项技术。

遥感技术以其宏观、快速、周期性观测的优势,成为区域尺度干旱动态监测的重要手段。从早期的 NOAA/AVHRR 到现今主流的 MODIS、VIIRS,再到高时空分辨率的 Landsat 和 Sentinel 系列卫星,遥感技术为捕捉大尺度干旱的时空规律提供了前所未有的数据支撑<sup>[22-24]</sup>。在这一背景下,遥感干旱指数被广泛开发与应用<sup>[25]</sup>,主要归为 4 类:①植被状态类,如植被状态指数(VCI),通过与历史最优状态进行对比来评估植被受旱胁迫状况<sup>[26]</sup>;②地表温度类,如

温度状态指数(TCI), 利用地表温度异常状态反映水分胁迫状况<sup>[27]</sup>; ③植被-温度结合类, 如温度植被干旱指数(TVDI), 通过构建特征空间来诊断区域水分状况<sup>[28]</sup>; ④微波遥感类, 直接反演表层土壤水分(如 SMAP、SMOS 产品)<sup>[29]</sup>。此外, TRMM 等历史卫星降水产品与 GPM 等现役卫星降水产品有效弥补了地面雨量站空间代表性不足的缺陷<sup>[30]</sup>。例如, 聂坤照<sup>[31]</sup>利用长时序 NDVI 数据分析了南方红壤丘陵区植被对气候变化的响应, 为理解干旱对生态系统的影响提供了支撑。

地理信息系统在干旱研究中扮演着枢纽的角色, 其在数据处理、空间分析、可视化方面功能强大。同时, 地理信息系统也为有效融合遥感影像、气象格点数据、地形地貌、土壤类型及社会经济数据等多维空间信息提供了统一平台。借助空间插值、叠加分析、地理加权回归等空间统计方法, 地理信息系统能够精细刻画干旱的时空分布格局、演变路径及其与环境驱动因子的空间耦合关系。例如, 陈自瑞<sup>[32]</sup>利用地理信息系统空间分析技术, 对干旱特征与作物产量数据进行叠加, 直观揭示了江西省季节性干旱对农业生产的影响。吴少强<sup>[33]</sup>分析了江西省季节性干旱频率的空间分布特征, 精准识别出赣南地区为干旱高风险区。

数值模型是对干旱进行定量归因和开展预测预警的核心工具。当前主流模型包括: ①陆面过程模型(如 CLM、VIC、Noah-MP), 可精细模拟土壤水热动态及陆-气相互作用<sup>[34]</sup>; ②分布式水文模型(如 SWAT), 在评估气候变化和人类活动对流域水文干旱的综合影响方面优势突出<sup>[35]</sup>; ③作物生长模型(如 DSSAT、WFOST), 在量化干旱对农业产量的胁迫效应上功能强大<sup>[36]</sup>; ④区域气候模型(如 WRF), 通过动力降尺度实现高分辨率的气候模拟与干旱成因诊断<sup>[37]</sup>。尽管模型为精细化管理提供了有力工具, 但是这些模型通常也依赖于高质量的驱动数据。利用中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(CMFD)驱动陆面模型<sup>[38]</sup>, 可实现对西南地区干旱时空动态的精准再现。在小尺度上, HYDRUS 模型在模拟红壤坡耕地干旱期土壤水分运移方面也展现出良好的适用性与应用前景<sup>[39]</sup>。

综上, 现代研究范式通过遥感、地理信息系统与数值模型的有机结合, 极大提升了干旱研究的广度与深度。然而, 干旱过程的非线性及其驱动因子的多尺度特性, 使得模型和数据的有效融合成为当前研究的前沿与难点。目前, 融合路径主要是以遥感产品(如

土地利用、植被参数)作为模型输入, 利用地理信息系统对模型输出进行后处理与空间分析<sup>[32]</sup>。此方法简单直观, 但未能实现观测与模型间的实时动态交互。另外一种融合路径是数据同化, 它将数值模型作为物理约束, 将大尺度遥感观测(如地表温度、土壤水分)视为动态观测量, 通过集合卡尔曼滤波等算法, 将观测信息实时融入模型模拟过程, 持续校正模型状态, 从而显著提升模拟与预测精度<sup>[40]</sup>。

当前, 针对南方红壤区季节性干旱的多尺度融合研究仍显薄弱, 其核心挑战在于, 该区域的干旱过程不仅受复杂水文循环控制, 更有红壤的独特物理特性和强烈的人类活动的深刻烙印, 其驱动机制比其他地区更为复杂。未来研究应聚焦于以下方向: ①发展适用于红壤区的模型参数化方案, 以更真实地表征其特殊的水力属性; ②构建能够融合多源、多尺度观测和高分辨率的数据同化系统, 实现对该区域季节性干旱过程的精准模拟与预测。

### 3 季节性干旱发生机制与时空演变规律

依托长序列气象观测与多源遥感数据, 学者对南方红壤区季节性干旱的发生机制与时空演变规律开展了系统性研究。南方红壤区的季节性干旱, 是在年均降水丰沛的宏观背景下, 由特定气候、地形与土壤等多要素深度耦合的复杂过程, 其直接成因是大气环流异常导致生态系统需水和供水失衡。其次, 以丘陵为主的地形地貌加剧了水分的快速流失, 降低了雨水转化为有效土壤水的效率。更为关键的是, 红壤普遍存在土层浅薄、土壤物理结构差等不利于水分存储的缺陷, 一旦降雨减少, 干旱便会迅速暴发<sup>[41]</sup>。红壤的这种物理障碍导致红壤区的干旱表现为突发性强、发展速度快、发生强度大的特征, 且常伴随高温胁迫, 易导致处于孕穗、灌浆等关键生育期的作物大幅减产甚至绝收, 对区域农业生产与生态环境造成严重影响<sup>[42]</sup>。

#### 3.1 时间演变趋势

近几十年来, 南方红壤区的季节性干旱问题日益严峻。在时间尺度上, 南方红壤区季节性干旱的频率、强度和持续时间总体呈现显著的加剧趋势, 但这种趋势并非线性, 而是伴随着明显的年代际波动。多项研究将 20 世纪 90 年代末期识别为干旱加剧的关键转折点<sup>[16,43-44]</sup>。同时, 干旱的季节性特征愈发突出, 主要表现为春旱和秋旱显著加剧, 形成了“春夏连旱”或“夏秋连旱”等更具破坏性的干旱模式。这种年代际与季节性演变是全球气候变化背景下大尺度环流异常与区域人类活动增强共同作用的结果, 其驱动机制

复杂<sup>[45]</sup>。在自然因素方面,厄尔尼诺南方涛动(ENSO)、太平洋年代际振荡(PDO)等海温异常通过海气作用的遥相关,调节西太平洋副热带高压的强度与位置,从而主导区域降水的时空分配<sup>[46]</sup>。在人为因素方面,快速城市化进程中的土地利用/土地覆被变化(LUCC)改变了地表反照率和蒸散发,而对水资源的过度开发利用则直接影响了局地水文循环,共同加剧了区域对干旱的敏感性与暴露度<sup>[47]</sup>。需要注意的是,季节性干旱时间演变趋势在不同空间区域存在显著差异,需要更加深入的空间分析来揭示其内部规律。

### 3.2 空间分布格局

在空间维度上,南方红壤区季节性干旱呈现出高度的空间异质性,总体趋势是由东南沿海向内陆腹地,特别是向西南丘陵山区逐渐加重。为了精准刻画这一空间格局并评估其风险,学者们发展了多种综合性方法。一类侧重于基于自然特征的区划,如黄晚华等<sup>[48]</sup>采用综合因子与主导因子相结合的方法、逐级指标筛选法及综合灾害分析和聚类分析方法,提出了南方季节性干旱特征分区方案。另一类则侧重于基于风险理论的评估,如张强等<sup>[49]</sup>构建了综合评估框架,通过耦合干旱致灾因子强度和概率、承灾体的社会物理暴露度、承灾体脆弱性等指标,对西南、华南等典型区域进行了干旱灾害风险评估。Zhong等<sup>[43]</sup>通过近60年南方红壤丘陵区444个站点的气象数据,分析了季节性干旱发生的“热时”和“热区”。目前已形成较为一致的认识:西南地区的云贵高原、华南的岩溶石漠化地区以及赣、湘、粤交界的丘陵山区,因其特殊的地形地貌、水汽输送的末端位置以及土壤退化严重等多重不利因素交织,被普遍识别为季节性干旱发生频率最高、强度最大、风险最高的“热点区域”。值得注意的是,这些热点区域的范围和强度随着时间推移呈现出动态的演变特征。

### 3.3 时空耦合特征

在对季节性干旱的时间演变与空间格局有了基本认知后,二者的耦合动态,即干旱事件在时间和空间维度上的相互作用与演进规律,开始受到关注。研究表明,南方红壤区季节性干旱的时空演变表现出复杂的非均质性。首先,干旱重心的迁移趋势显著。通过对长时间序列数据的重心模型或空间核密度分析发现,近几十年来,区域性干旱事件的发生重心呈现出由东部向西南地区迁移的总体趋势,这与西南地区对气候变化响应更敏感以及人类活动扰动加剧等因素密切相关<sup>[50]</sup>。其次,干旱“热点区域”呈现出动态扩张的特征。以往被认为是干旱高风险的赣、湘、

粤交界丘陵地带,其干旱影响范围在波动中扩大<sup>[51]</sup>。为了定量刻画这些特征,学者们常采用经验正交函数(EOF)、时空克里格(ST-Kriging)以及地理加权回归(GWR)等方法,来识别干旱演变的主要空间模态及其时间演变系数<sup>[52]</sup>。这些分析进一步证实,干旱化的时间趋势在空间上并非均质的,西南丘陵山区干旱频率和强度的增长速率高于东南沿海地区。

## 4 季节性干旱影响因素

南方红壤区季节性干旱的形成与加剧,是大气环流、下垫面条件与人类活动等多重因素耦合的结果。其中,气候异常是干旱发生的直接驱动力,红壤特有的水文高敏感性构成了该区域干旱胁迫频繁发生的物质基础,人类活动则通过改变土地利用与水文过程,显著加剧了生态系统的次生脆弱性。下文将从气候驱动、土壤响应及人为扰动3个维度,系统阐述各因素的作用机制,并揭示其相互作用如何形成加剧干旱风险的正反馈循环。

### 4.1 气候因素

气候因子是季节性干旱发生的直接驱动力,其核心表现为区域水热资源在时间与空间上的供需失衡。在时间维度上,南方红壤区属亚热带季风气候,降水量年内分配极不均匀。夏季常因受西太平洋副热带高压控制而进入高温少雨的“伏旱”期,若异常环流持续至秋季则演变为“伏秋连旱”。此时,强烈的蒸散发与稀少的降水补给导致供需失衡,构成了季节性干旱发生的宏观气候背景<sup>[53]</sup>。在空间维度上,区域降水受大尺度水汽输送路径制约。东部和南部沿海地区紧邻太平洋和南海,水汽来源充沛,是干旱相对低风险区。然而,随着水汽向西北内陆输送,受距离衰减和地形抬升阻隔,水汽供应量锐减。特别是西南地区,地处多个季风系统的影响末端,水汽供应稳定性差,使其成为气候意义上的干旱高发区<sup>[54]</sup>。

### 4.2 土壤因素

红壤自身的物理特性是放大气候胁迫、加剧干旱的关键下垫面因素。其内在脆弱性主要体现在以下两个方面:首先,红壤持水能力较低,导致“土壤水库”容量不足。红壤有机质匮乏,团粒结构稳定性差,致使红壤供给植物利用的水分存储能力低。朱丽琴<sup>[55]</sup>研究证实,提高土壤有机质含量能显著增强红壤的持水能力。从土壤水分特征曲线来看,红壤的有效水范围较窄,这意味着在缺乏降水补给时,土壤含水量会更容易下降至凋萎点,使植被极易陷入生理干旱。

其次,红壤结构稳定性差导致其入渗补给过程受

阻。红壤微团聚体稳定性差，在高强度降雨的击溅作用下极易分散，导致表层形成物理性结皮层<sup>[56]</sup>。这一结皮层会显著抑制水分入渗，使得大量降雨难以有效补充土壤水库，转而形成地表径流并引发水土流失。此外，土壤干旱本身会加剧板结。罗敏等<sup>[57]</sup>发现红壤的穿透阻力随含水量降低而剧增。D'Angelo 等<sup>[58]</sup>的研究证实，与全球其他地区对干旱不敏感的黏土相比，湖南的红黏土中弱有效水的比例更高，这与其母质在形成过程中经历的强烈水文波动有关，导致红壤具有高度固结的特性。因此，红壤特殊的物理性状导致其对干旱胁迫表现出更强的敏感性。

#### 4.3 人为因素

人类活动通过改变区域水文循环与土地利用格局，成为加剧干旱风险的关键因素。一方面，水利工程的结构性短板限制了水资源调控能力。在干旱频发的丘陵山区，小型、分散式蓄水设施普遍不足，导致过境径流丰富而本地可利用水资源匮乏的矛盾现象<sup>[59]</sup>。同时，许多既有灌溉系统因年久失修和管护不力而出现功能退化、输水效率低下等问题，严

重制约了干旱时期的应急供水能力<sup>[60]</sup>。另一方面，不合理的土地利用方式削弱了生态系统的水文调节功能。长期以来的毁林开荒、陡坡垦殖等行为，破坏了地表植被的水源涵养功能和水文连通性<sup>[61]</sup>。此外，高耗水作物的推广以及大水漫灌等粗放型农业模式，显著增加了区域用水压力，加剧了干旱时期的水资源供需矛盾。

气候驱动、土壤响应与人为扰动三者并非孤立存在，而是相互交织，形成了一个干旱风险不断加剧的正反馈循环(图 2)。在季节性干旱期间，高蒸散使得土壤水库容快速消耗；当出现强降水事件时，土壤入渗能力不足导致水分补给效率低下，大量降水以地表径流形式流失，径流冲刷进一步加剧了土壤结构的破坏，持续削弱土壤的持水能力与抗旱韧性。这一循环导致生态系统在下一个干旱周期中更加脆弱。不合理的土地利用方式则作为关键外部扰动因素，通过破坏植被和加剧土壤退化，给干旱这一自然过程增加了人为负面效应，从而导致南方红壤区季节性干旱频发与加剧，放大了季节性干旱的危害。

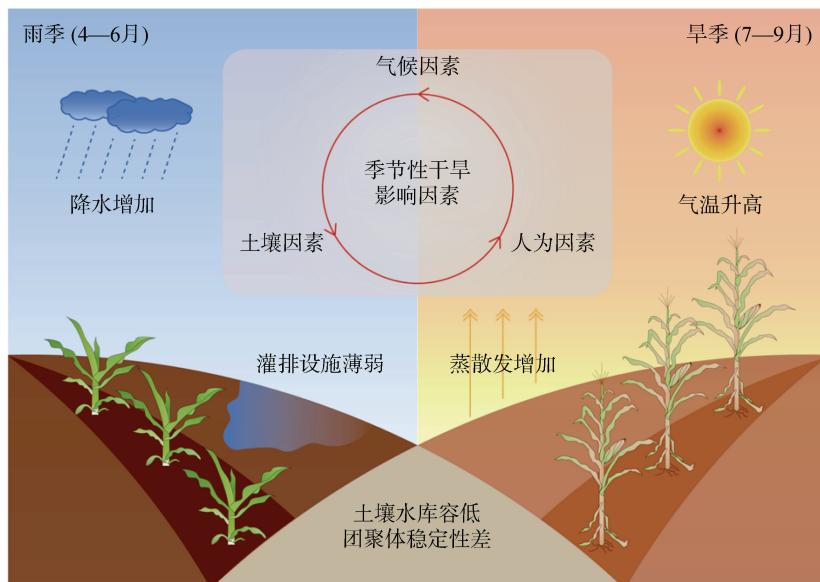


图 2 季节性干旱驱动因素概念图  
Fig. 2 Conceptual map of drivers of seasonal drought

### 5 季节性干旱抵御措施

南方红壤区作为我国重要的农业生产基地，虽然水资源总量丰富，但该区丘陵分布面积广，地势相对高差大，传统抗旱体系缺乏，一旦发生干旱，极易给农业生产造成重大损失。因此，构建因地制宜、多措并举的综合性干旱抵御体系尤为迫切。红壤区季节性干旱抵御措施可主要归纳为工程灌溉、土壤耕作培肥

与生物技术 3 大方面。

#### 5.1 工程灌溉

灌溉是应对干旱最直接、最高效的手段。然而，在南方红壤区的丘陵地貌条件下，大型、传统的灌溉工程因建设难度大、成本高而难以推广。鉴于此，发展以雨水资源高效利用为核心的集蓄灌溉工程成为关键突破口。在具体实践中，针对不同种植区的特点，已形成了差异化的技术模式：在水稻种植

区，推广水稻浅灌深蓄技术，通过优化田间水分管理，减少无效蒸发，实现节水与稳产<sup>[62]</sup>；在山丘旱作区，则大力开展田间集雨保水技术，通过建设微型集雨窖、集流面等设施，就地收集、储存和利用降水资源，为作物关键生育期提供水分<sup>[63]</sup>。考虑到红壤区经济较为发达，用于农业的人力资源有限，充分利用区域丰富的太阳能资源，通过光伏发电实现雨季降水聚集、旱季智慧补灌是缓解红壤区季节性干旱的有力措施。

## 5.2 土壤耕作与改良

土壤耕作与改良是抵御季节性干旱的另一重要途径。这一措施通过改善土壤物理结构与性状，最大限度地接纳和涵养自然降水。一方面，深耕、深松等耕作措施能够打破犁底层，使耕层增厚，不仅有效增加土壤孔隙度，而且能增加土壤蓄水空间<sup>[64-65]</sup>。另一方面，采用秸秆还田、地膜覆盖、冬闲绿肥种植等田间覆盖保墒技术，可以有效抑制地表水分蒸发，提高雨水利用效率和灌溉水的有效性<sup>[66-68]</sup>。此外，施加土壤改良剂也是一种高效手段，特别是生物质炭的应用，因其具有丰富的有机碳和较大的比表面积，在调节土壤物理性质、提升持水能力方面效果显著，已成为红壤改良的重要手段<sup>[69-71]</sup>。

## 5.3 抗旱品种选育与应用

从作物自身着手，增强其内在抗旱能力的现代生物技术的发展为抵御季节性干旱提供了根本性策略。Nepolean 等<sup>[72]</sup>探讨了利用基因组学和新一代育种方法开发特定系统抗旱杂交玉米的策略，以应对气候变化对农业生产的挑战。利用分子生物学技术，深入解析作物抗旱的基因机制，从而选育出一批抗旱性强、耐逆境胁迫且水分利用效率高的新型作物品种，才能从源头上降低农业需水量，进而大幅提升红壤区农业应对季节性干旱的能力<sup>[73-74]</sup>。在此基础上，再配合一些多功能保水拌种剂等产品，可在种子周围形成一个微型“湿润圈”，为作物安全度过干早期提供重要保障，起到更好的抗旱效果<sup>[75]</sup>。

综上所述，抵御南方红壤区季节性干旱是一项复杂的系统工程。单一措施在抵御季节性干旱方面难以奏效，未来应致力于构建一个集“工程开源、耕作节流、生物增效”于一体的综合性抗旱技术体系，通过科学规划雨水集蓄工程，结合深耕、覆盖、施用生物质炭等土壤管理措施，并同步推广抗旱作物品种，形成多维度、多层次的抗旱网络，才能有效缓解季节性干旱对农业生产的冲击，保障国家的粮食安全与农业可持续发展。

## 6 总结与展望

本文系统梳理了南方红壤区季节性干旱的研究现状与进展。该区域季节性干旱危害的不断增加是大气环流异常、红壤的独特物理特性与高强度人类活动三者复杂耦合作用的结果。尽管现有研究在揭示干旱成因与识别风险因子方面取得了显著进展，但在宏观和微观尺度上，对各驱动因子间的量化耦合关系与反馈机制的动态演变，其认知仍存在明显的局限。立足现有研究基础，并面向未来气候变化加剧的严峻挑战，该领域的前沿研究需采取多学科交叉的视角，融合天地空一体化监测技术、高精度地球系统模型与人工智能算法，以实现从机理认知到精准预测的跨越，为制定区域抗旱策略提供科学支撑。未来研究应重点围绕以下方向展开：

1) 骤发性干旱的监测预警。骤发性干旱(flash drought)以其突发性强、发展迅猛、预见期短的特点，对农业生产构成严重威胁<sup>[76]</sup>。南方红壤区独特的土壤和气候特征，使其成为骤发性干旱的易发区<sup>[77]</sup>。然而，当前针对该区域骤发性干旱的识别标准、驱动机制及其与红壤水文过程的耦合关系尚不清晰。未来亟须利用高时空分辨率的遥感与地面观测数据，发展能够捕捉土壤水分快速耗竭过程的监测预警指标体系，并致力于提升气候预测模型对骤发性干旱事件的预警预报能力。

2) 旱涝急转机制与风险应对。在全球气候变化背景下，南方红壤区“旱涝急转”现象时有发生。该现象表现为长期干旱后突发极端强降水，或者长期干旱后出现洪涝灾害，其灾害链转换迅猛，破坏性巨大<sup>[78]</sup>。除气候因素外，红壤在降水-产流过程中的调控能力低下，加剧了地表径流的瞬时洪峰，从而放大了旱涝急转的灾害效应。未来亟须深化对旱涝急转物理过程与陆面水文响应机理的研究，特别是对区域季风系统异常活动作用的研究；发展能够精准预测干旱与洪涝事件链的耦合模型，并构建更具气候韧性的综合应对体系。

3) 复合型干旱的综合风险。未来的干旱事件将更趋向于以复合形态出现，其“复合性”体现在：驱动因子复合(如高温、少雨、低湿等气象要素并发)与影响领域复合(如气象、农业、水文干旱叠加)<sup>[79]</sup>。这种复合型干旱的致灾效应具有非线性叠加特征，远超单一干旱的致灾效应。因此，未来研究亟待突破单一灾种的评估框架，构建能够耦合多致灾因子、量化承灾体脆弱性与暴露度的综合风险评估模型，为制定一体

化的区域适应性管理策略提供坚实的科学支撑。

4) 人类活动的风险评估。高强度的人类活动改变了南方红壤区下垫面性质与水文循环过程。未来研究需厘清人类活动在干旱发展过程中的作用。一方面, 城镇化进程加速与农业规模化扩张, 导致土地利用/覆被变化加剧、不透水面积增加、植被涵养水源能力下降等问题, 可能加剧地表径流, 减少土壤水储量, 放大季节性干旱风险<sup>[80]</sup>。另一方面, 节水灌溉技术的推广、水利工程的调度、生态农业模式的建立, 是人类主动适应与缓解季节性干旱的关键调控手段。因此, 亟须定量评估不同土地利用方式等变化对干旱演变链的动态影响, 这有助于揭示人–水系统间的复杂反馈机制。

综上所述, 在南方红壤区季节性干旱发生频率和危害程度不断增加的背景下, 深入揭示该区域季节性干旱的“气候胁迫–土壤特性–人类活动”协同驱动机制, 发展多尺度、多源信息融合的监测预警技术体系, 并构建面向未来气候变化情景的“风险评估–适应调控–应急响应”一体化的综合风险管理策略, 是实现对季节性干旱风险动态预警与主动应对的关键所在, 是保障区域水安全、粮食安全与生态安全的核心科学命题, 亦是实现区域可持续发展的紧迫实践路径。

**致谢:** 特别感谢中国科学院红壤生态实验站提供的部分气象资料。

## 参考文献:

- [1] 王明珠, 姚贤良, 张佳宝, 等. 低丘红壤区伏秋旱的成因、特征及抗旱体系的研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(3): 250–256.
- [2] 贾秋洪, 景元书, Buaphean Ruthaikarn. 亚热带红壤丘陵区季节性干旱判别研究[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(4): 749–758.
- [3] Wang Y J, Gao L, Peng X H. Hydrologic separation and their contributions to N loss in an agricultural catchment in hilly red soil region[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(11): 1730–1743.
- [4] 金慧芳, 史东梅, 钟义军, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 84–93.
- [5] 陈国宁. 中国是全球气候变化敏感区[J]. 生态经济, 2022, 38(10): 9–12.
- [6] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615–7622.
- [7] Guan Y S, Gu X H, Slater L J, et al. Tracing anomalies in moisture recycling and transport to two record-breaking droughts over the Mid-to-Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127787.
- [8] 胡跃鹏, 周波涛, 王会军, 等. 2022年中国南方破纪录的夏秋连旱: 热带海温和欧亚加热的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(2): 439–450.
- [9] 黄道友, 王克林, 黄敏, 等. 我国中亚热带典型红壤丘陵区季节性干旱[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2516–2523.
- [10] 王峰, 李萍, 陈家宙. 亚热带红壤坡地季节性干旱空间特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(4): 820–826.
- [11] 孙博, 王会军, 黄艳艳, 等. 2022年夏季中国高温干旱气候特征及成因探讨[J]. 大气科学学报, 2023, 46(1): 1–8.
- [12] 熊德祥, 武心齐. 减缓丘陵红壤旱地季节性干旱影响的综合配套技术[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 31–32.
- [13] 王云, 李文鑫, 张建云, 等. 长江上游流域水文干旱历史演变及未来预估[J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 157–168.
- [14] Wang H S, Rogers J C, Munroe D K. Commonly used drought indices as indicators of soil moisture in China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(3): 1397–1408.
- [15] Zhang G X, Su X L, Singh V P, et al. Appraising standardized moisture anomaly index (S2I) in drought projection across China under CMIP6 forcing scenarios[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 37: 100898.
- [16] 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.
- [17] 张菡, 张喜亮, 李金建, 等. 基于 SPEI 的四川省盆地区季节性干旱时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 242–250, 256.
- [18] 吴少强, 汤崇军, 郑太辉, 等. 基于连续无有效降雨日数指标的江西省干旱时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 903–914.
- [19] 王晓燕, 陈洪松, 王克林, 等. 红壤坡地土壤水分时间序列分析[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 297–302.
- [20] 陈家宙, 吕国安, 王石, 等. 红壤干旱过程中剖面水分特征与土层干旱指标[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 11–16.
- [21] Jiao W Z, Wang L X, McCabe M F. Multi-sensor remote sensing for drought characterization: Current status, opportunities and a roadmap for the future[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 256: 112313.
- [22] Abowarda A S, Bai L L, Zhang C J, et al. Generating surface soil moisture at 30 m spatial resolution using both data fusion and machine learning toward better water resources management at the field scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 255: 112301.
- [23] Mishra A K, Ines A V M, Das N N, et al. Anatomy of a local-scale drought: Application of assimilated remote sensing products, crop model, and statistical methods to an agricultural drought study[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 15–29.
- [24] Xu L, Abbaszadeh P, Moradkhani H, et al. Continental drought monitoring using satellite soil moisture, data assimilation and an integrated drought index[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 250: 112028.
- [25] 李毅, 陈新国, 赵会超, 等. 土壤干旱遥感监测的最新研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(1): 1–7.
- [26] Guo H, Bao A M, Ndayisaba F, et al. Space-time characterization of drought events and their impacts on

- vegetation in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1165–1178.
- [27] Heydari H, Momeni M, Nadi S. Innovative data clustering method improves drought prediction in heterogeneous landscapes using GEE-derived remote sensing indices[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2024, 33: 101112.
- [28] 赵会超. 不同类型干旱的时空变化规律及其关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [29] Mishra A, Vu T, Veettil A V, et al. Drought monitoring with soil moisture active passive (SMAP) measurements[J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 620–632.
- [30] Wang Y J, Li Z, Gao L, et al. Comparison of GPM IMERG version 06 final Run products and its latest version 07 precipitation products across scales: Similarities, differences and improvements[J]. Remote Sensing, 2023, 15(23): 5622.
- [31] 聂坤照. 南方红壤丘陵区 NDVI 时空变化及其影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [32] 陈自瑞. 南方红壤区季节性干旱时空特征及其对作物生产的影响——以江西省为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [33] 吴少强. 江西省季节性干旱特征及其条件下的土壤水分分配特征[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
- [34] Um M J, Kim Y, Jung K, et al. Evaluation of drought propagations with multiple indices in the Yangtze River basin[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 317: 115494.
- [35] Wang T, Tu X J, Singh V P, et al. Socioeconomic drought analysis by standardized water supply and demand index under changing environment[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 347: 131248.
- [36] Chen W, Ju H, Zhang D, et al. Identification of thresholds and key drivers on water use efficiency in different maize ecoregions in Yellow River Basin of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 482: 144209.
- [37] Ghanbari M, Arabi M, Georgescu M, et al. The role of climate change and urban development on compound dry-hot extremes across US cities[J]. Nature Communications, 2023, 14: 3509.
- [38] 王敏. 西南地区干旱时空动态演化及其对生态系统水分利用效率的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [39] 高跃. 基于 HYDRUS 模型的红壤坡耕地水分动态研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [40] 丁建丽, 陈文倩, 王璐. HYDRUS 模型与遥感集合卡尔曼滤波同化提高土壤水分监测精度[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 166–172.
- [41] 彭世彰, 吴佳, 姚俊琪. 南方季节性干旱成因及抗旱对策[J]. 中国农村水利水电, 2012(3): 149–151.
- [42] 纪瑞鹏, 于文颖, 冯锐, 等. 骤发干旱对农作物生长过程的影响机制与评估研究进展[J]. 生态学杂志, 2023, 42(11): 2737–2746.
- [43] Zhong Y, Gao L, Peng X H, et al. Seasonal drought classification and its characteristics in the red soil region of Southern China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 60: 102587.
- [44] 韩兰英, 张强, 贾建英, 等. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 1–10.
- [45] 李维京, 张若楠, 孙丞虎, 等. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 577–591.
- [46] 高琳慧. 基于 SPEI 的中国南方秋季干旱变化特征及其可能原因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [47] 何娟. 土地利用变化导致的地表反照率变化及其辐射效应研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2021.
- [48] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应V.南方地区季节性干旱特征分区和评述[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2917–2925.
- [49] 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.
- [50] Xu K, Yang D W, Xu X Y, et al. Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 630–640.
- [51] Lu H Q, Wu Y H, Li Y J, et al. Effects of meteorological droughts on agricultural water resources in Southern China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 419–435.
- [52] Cui Y Q, Zhang B, Huang H, et al. Identification of seasonal sub-regions of the drought in the North China Plain[J]. Water, 2020, 12(12): 3447.
- [53] Feng W J, Leung M Y T, Wang D X, et al. An extreme drought over South China in 2020/21 concurrent with an unprecedented warm northwest Pacific and La Niña[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(10): 1637–1649.
- [54] 顾子也, 顾磊, 尹家波, 等. 中国陆域干旱的大气环流机制及旱情传播规律[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(8): 2674–2689.
- [55] 朱丽琴. 植被恢复对退化红壤有机碳与“土壤水库”库容的影响[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2015.
- [56] 张斌, 张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策研究[J]. 生态学报, 1995, 15(4): 413–419.
- [57] 罗敏, 邓才富, 陈家宙, 等. 鄂南红壤穿透阻力的时空变化研究[J]. 土壤, 2016, 48(5): 1055–1061.
- [58] D'Angelo B, Bruand A, Qin J T, et al. Origin of the high sensitivity of Chinese red clay soils to drought: Significance of the clay characteristics[J]. Geoderma, 2014, 223/224/225: 46–53.
- [59] 江铭诺, 向昆仑, 黄奕融, 等. 1978—2020 年我国有效灌溉面积时空变化特征[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(7): 164–174.
- [60] 李金山, 段福义, 韩启彪, 等. 南方红壤旱地季节性干旱特点及节水农业模式[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S2): 173–177.
- [61] 赵其国, 徐梦洁, 吴志东. 东南红壤丘陵地区农业可持续发展研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 433–442.
- [62] 刘欢欢, 邵东国. 节灌控排条件下稻田氮平衡模拟及利用效率分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 52–56.
- [63] 武艺, 汪邦稳, 杨洁. 南方红壤区水土保持雨水集蓄模式研究[J]. 中国水土保持, 2010(5): 23–25.

- [64] 黄尚书, 钟义军, 叶川, 等. 深松与压实对红壤坡耕地土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1347–1353.
- [65] 黄尚书, 钟义军, 何绍浪, 等. 耕作深度对红壤坡耕地季节性干旱期土壤水分变化特征的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(1): 39–45.
- [66] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 不同施肥模式和覆盖方式对春玉米干物质积累和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(4): 93–100.
- [67] 褚添硕, 陈晓安, 杜勇强, 等. 不同秸秆还田方式下红壤坡地径流垂向分层输出特征[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2025, 23(2): 26–34.
- [68] 王烨, 高磊, 王艳玲, 等. 冬闲绿肥对红壤季节性干旱抵御能力的影响[J/OL]. 土壤, 2025: 1–11. (2025-03-03). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1118.P.20250303.1511.002.html>.
- [69] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1292–1297.
- [70] 解开治, 徐培智, 严超, 等. 不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 160–165.
- [71] 林小兵, 成艳红, 王斌强, 等. 生物炭连续施用对旱地红壤细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 28–35.
- [72] Nepolean T, Kaul J, Mukri G, et al. Genomics-enabled next-generation breeding approaches for developing system-specific drought tolerant hybrids in maize[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 361.
- [73] 张磊, 谢小清, 唐怀君, 等. 玉米抗旱性鉴定指标及综合评价研究进展[J/OL]. 分子植物育种, 2024: 1–19. (2024-09-10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20240910.1125.004.html>.
- [74] 吴子恺. 玉米抗旱育种[J]. 玉米科学, 1994, 2(1): 6–9.
- [75] 肖厚军, 刘友云, 徐大地, 等. 坡地黄壤施用保水剂的效果研究[J]. 耕作与栽培, 2000(1): 51–52.
- [76] 武传号, 黎梓涛, 王赛赛, 等. 1981—2021年中国季节性干旱与骤发干旱的时空响应关系评估[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 149–157.
- [77] Yuan X, Wang Y M, Ji P, et al. A global transition to flash droughts under climate change[J]. Science, 2023, 380(6641): 187–191.
- [78] 张玉琴, 李栋梁. 华南汛期旱涝急转及其大气环流特征[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(4): 430–444.
- [79] Hao Z C. Compound events and associated impacts in China[J]. iScience, 2022, 25(8): 104689.
- [80] Wang Y M, Yuan X. Anthropogenic speeding up of South China flash droughts as exemplified by the 2019 summer-autumn transition season[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(9): e2020GL091901.