

土壤干旱指数不确定性及适用性分析

李雨轩¹, 吕海深¹, 朱永华², 肖瑞欣¹, 梁晨辉¹,

李羿璇¹, 郭辉^{3,4}, 高田润²

(1. 河海大学水文水资源学院, 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学地理与遥感学院, 南京 211000; 3. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;
4. 黑龙江省水利水电勘测设计研究院, 哈尔滨 150080)

摘要: [目的] 以黑龙江省为研究区域, 分析多种土壤干旱指数在不同时间尺度和土壤层次条件下刻画干旱特征的差异及不确定性, 为农业干旱监测中土壤干旱指数的选取与应用提供参考。[方法] 基于 ERA5-Land 再分析数据, 构建周、月时间尺度及浅层(0—28 cm)、中层(28—100 cm)土壤层的标准化土壤水分指数(SSMI)、土壤水分亏缺指数(SMDI)、土壤水分百分位数(SMP)及干旱严重程度指数(DSI), 采用 Mann-Kendall 趋势检验、相关性分析和游程理论等方法对指数进行对比分析。[结果] 1) SMDI 的年变化幅度最大(约 $-0.025/a$), DSI 最小(约 $0.001/a$)。春季指数间差异最明显, SMDI 对局部轻微干旱缓解敏感, DSI 识别的春季显著干旱加剧区域面积为其他指数的 1.5~2.0 倍。2) 干旱识别一致性最高的指数组合为 SSMI-SMP(0.883~1.000)与 SSMI-DSI(0.879~1.000), 且随干旱强度增强各指数识别结果趋于一致。3) 不同土壤层条件下, 各干旱指数差异较为稳定; 周尺度下 DSI 的干旱频率为其他指数的 1.1~1.8 倍; 月尺度下 SMDI 干旱频率为其他指数的 1.2~1.6 倍, 且在不同尺度和土壤层条件下 SMDI 平均干旱持续时间最长。4) 各指数在敏感性与稳定性上各具优势, DSI 综合性能较优, 在类似气候与土壤条件下可作为主要识别指标; SSMI 稳健, 虚警率最低; SMDI 敏感性最高, 适用于早期预警; SMP 敏感性相对较低。[结论] 土壤干旱指数在农业干旱监测中的适用性受指数构建方法、时间尺度和土壤层次差异的共同影响, 单一指数难以兼顾稳定性与敏感性, 多指数联合应用有助于降低干旱识别的不确定性。

关键词: 农业干旱; 土壤水分; 干旱指数; 不确定性

中图分类号: S423

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0324-11

Uncertainty and Applicability Analysis of Soil Drought Indices

Li Yuxuan¹, Lü Haishen¹, Zhu Yonghua², Xiao Ruixin¹, Liang Chenhui¹, Li Yixuan¹, Guo Hui^{3,4}, Gao Tianrun²

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 211000, China; 3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Heilongjiang Provincial Water Conservancy and Hydroelectric Power Investigation, Design and Research Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: [Objective] Taking Heilongjiang Province as the study area, this study analyzes the differences and uncertainties among various soil drought indices in characterizing drought features under different temporal scales and soil layer conditions, aiming to provide a basis for the selection and application of soil drought indices in agricultural drought monitoring. [Methods] Based on ERA5-Land reanalysis data, the Standardized Soil Moisture Index (SSMI), Soil Moisture Deficit Index (SMDI), Soil Moisture Percentile (SMP), and Drought Severity Index (DSI) were constructed at weekly and monthly temporal scales for shallow (0—28 cm) and middle

收稿日期: 2026-01-28

修回日期: 2026-03-25

录用日期: 2026-03-31

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(42471019, 42071033); 黑龙江省应用技术研究及开发计划项目(GA19C005); 黑龙江省重点研发计划项目(JD22B001)

第一作者: 李雨轩(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业干旱研究。E-mail: lyx_8649@163.com

通信作者: 吕海深(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事洪水、干旱过程模拟及预报研究。E-mail: lvhaishen@hhu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

(28–100 cm) soil layers. The indices were comparatively analyzed using the Mann-Kendall trend test, correlation analysis, and run theory. [Results] 1) SMDI exhibited the largest annual change rate (approximately $-0.025/a$), while DSI showed the smallest (approximately $0.001/a$). Seasonal differences among indices were most pronounced in spring: SMDI was sensitive to local mild drought alleviation, whereas the area identified as significantly intensifying drought by DSI was 1.5–2.0 times that of other indices. 2) The highest consistency in drought identification was observed for the SSMI-SMP (0.883–1.000) and SSMI-DSI (0.879–1.000) index combinations, and consistency increased with drought intensity. 3) Across soil layers, differences among indices remained relatively stable; at the weekly scale, the drought frequency identified by DSI was 1.1–1.8 times that of other indices, while at the monthly scale, that identified by SMDI was 1.2–1.6 times that of other indices. Moreover, SMDI exhibited the longest mean drought duration across different time scales and soil layers. 4) Each index demonstrated distinct advantages in sensitivity and stability: DSI showed relatively better overall performance and can be recommended as a primary indicator under similar climatic and soil conditions; SSMI was the most robust with the lowest false alarm rate; SMDI exhibited the highest sensitivity and is suitable for early warning; SMP showed relatively lower sensitivity. [Conclusion] The applicability of soil drought indices in agricultural drought monitoring is influenced by index formulation, temporal scale, and soil layer differences. A single index cannot simultaneously achieve high stability and sensitivity, whereas the combined use of multiple indices can reduce uncertainty in drought identification.

Keywords: agricultural drought; soil moisture; drought index; uncertainty

Received: 2026-01-28

Revised: 2026-03-25

Accepted: 2026-03-31

Online(www.cnki.net): 2026-08-24

在全球气候变化背景下,极端气候事件频发,干旱已成为影响我国农业生产最严重的自然灾害之一^[1],是制约粮食产量稳定和农业可持续发展的关键因素。因此,深入研究农业干旱的时空演变规律、提高干旱监测精度,对于提升农业抗风险能力和保障区域粮食安全具有重要意义。

农业干旱与土壤水分亏缺密切相关,通常由前期降水不足或气温升高导致的蒸散发增强所引发,基于土壤水分或土壤特性参数构建的土壤干旱指数在农业干旱监测中应用广泛。由于土壤水分观测数据较为缺乏,许多研究^[2]利用水文模型或陆面模型获取土壤水分数据进行农业干旱预测。归一化土壤水分指数(NSM)^[3]和标准化土壤水分指数(SSMI)^[4]利用长期土壤水分时间序列进行标准化处理,能够刻画土壤水分的异常程度,在干旱变化监测中表现良好,周洪奎等^[5]基于同化数据构建SSMI,验证其与农业干旱灾害记录及作物减产之间的显著相关性。土壤水分百分位数(SMP)通过统计历史土壤水分分布中的相对位置,直观反映土壤水分异常,Sheffield等^[6]利用VIC模型模拟的土壤水分数据,基于SMP对全球尺度的干旱特征进行分析。另一类指数侧重于量化土壤水分亏缺及其对作物水分胁迫的影响,如土壤水分亏缺指数(SMDI)。Singh等^[7]基于高分辨率水文模型模拟的土壤水分数据构建SMDI分析

塞内加尔的农业干旱过程,揭示干旱事件的空间差异特征。土壤湿度亏缺指数(SWDI)利用土壤水分数据结合土壤水分参数(田间持水量和凋萎系数)计算作物水分条件,Fan等^[8]利用SWDI分析全球农业干旱的时空分布特征;Cammalleri等^[9]提出的干旱严重程度指数(DSI)通过综合水分亏缺幅度与发生频率,在欧洲地区的干旱监测与评估中表现良好;孙思琪等^[10]在我国黄淮海平原应用DSI对不同土壤层的农业干旱特征进行分析。

然而,现有研究仍存在一定局限,许多研究^[11–14]通常采用单一土壤干旱指数分析农业干旱特征,而不同土壤干旱指数在构建方法、参考基准及对于干旱过程的响应特性等方面存在差异,可能引起对于干旱特征及空间分布的识别不一致,从而增加农业干旱监测的不确定性。目前针对不同土壤干旱指数在不同时间尺度与土壤层次条件下刻画农业干旱特征差异的研究仍相对不足。分析多种土壤干旱指数在干旱监测中的不确定性及适用性,对于提升区域农业干旱监测与风险评估水平具有重要意义。

基于此,本文以我国重要粮食产区黑龙江省为研究区域,利用长时间序列土壤水分数据,选取构建原理不同的4种土壤干旱指数:标准化土壤水分指数(SSMI)、土壤水分亏缺指数(SMDI)、土壤水分百分位数(SMP)和干旱严重程度指数(DSI),从干旱时空

SMDI具有对过去土壤水分条件的记忆效应,在进行月尺度跨指标对比时通常以每个月最后1个有效周计算得到的SMDI值作为该月的代表值。

1.3.3 土壤水分百分位数(soil moisture percentile, SMP) Sheffield等^[20]提出基于历史土壤水分分布的干旱分析方法,采用非参数经验累积分布函数(ECDF)计算当前土壤水分值在对应历史同期分布中的百分位,得到土壤水分百分位数(SMP),取值范围为0~1,越低表示土壤越干燥。ECDF方法无需假设分布形式,能够直接反映历史样本的统计特性。本研究使用40 a的日尺度连续数据,样本量充足,ECDF方法能够稳健计算各百分位。

1.3.4 干旱严重程度指数(drought severity index, DSI) 干旱严重程度指数(DSI)是一种基于土壤水分的干旱指标,综合考虑土壤水分亏缺指数(d)与干旱发生频率(p)。其中计算土壤水分亏缺指数(d)的公式^[9]为:

$$d = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_{50}} \right)^n} \quad (4)$$

$$\theta_{50} = \frac{1}{2} (\theta_{cr} + \theta_{wp}) \quad (5)$$

式中: θ_{50} 为临界含水率(θ_{cr})与凋萎含水率(θ_{wp})的平均值; θ_{cr} 为田间持水量的50%; n 为经验形状因子,取值4~8, $n=6$ 。为评估参数 n 的敏感性,选取 $n=4$ 和 $n=8$ 进行对比分析。结果表明,与 $n=6$ 相比,不同取值下DSI趋势变化高度一致($r>0.995$),且整体偏差较小(RMSE约0.03),说明该参数在一定范围内对结果影响有限。

在缺乏实测土壤物理参数的条件下,采用长期土壤水分分布的百分位近似表示关键水分阈值,参考Zhu等^[21]使用多年同期土壤水分的5%和95%百分位分别代表凋萎含水率和田间持水量。通过定义阈值,使用 $F(\theta)$ 函数来识别干旱事件,其计算方法见公式(6);利用土壤水分亏缺指数的标准化百分位数 $F^*(d)$ 表示土壤水分与正常状态的偏离程度,其计算方法见公式(7);最后得出干旱频率 p 的表达式,具体见公式(8)。

$$F(d; a, b) = \frac{B(d; a, b)}{B(a, b)} \quad (6)$$

$$F^*(d) = \begin{cases} \frac{F(d) - F(d=m)}{1 - F(d=m)} & d \geq m \\ 0 & d < m \end{cases} \quad (7)$$

$$p = e^{-\frac{(F^*(d)-1)^2}{0.03}} \quad (8)$$

式中: $F(d; a, b)$ 为 β 分布的累积分布函数; $B(a, b)$ 为 β 函数; $B(d; a, b)$ 为不完全 β 函数; $a, b \geq 0$ 是形状参数; $F^*(d)$ 为 $F(d)$ 标准化后的百分位数; m 为该地区正常状态下的土壤水分亏缺指数,即该地区给定时间尺度的土壤水分亏缺指数的中位数。

基于土壤水分亏缺指数(d)与干旱发生频率(p)构建DSI的公式为:

$$DSI = \sqrt{pd} \quad (9)$$

DSI取值为0~1,0表示无旱,1表示极端干旱。

1.3.5 统计分析方法 为定量分析土壤水分干旱指数的时序变化特征及其空间一致性,采用非参数统计方法进行趋势检验与相关性分析。时间序列趋势分析采用Mann-Kendall(M-K)检验方法,该方法不依赖于样本分布形式,对异常值不敏感,适用于水文气象序列的趋势识别。当检验结果满足 $p < 0.05$ 时,认为趋势达到显著水平^[22]。趋势变化幅度采用Sen's斜率估计法进行表征,其估计结果可反映时间序列变化的方向及速率。

不同干旱事件特征的空间分布一致性采用Spearman秩相关系数进行量化分析^[23]。以研究区像元为基本统计单元,在同一时间尺度和土壤层条件下,对各指数在所有像元位置对应的干旱特征值进行排序,计算其Spearman秩相关系数,从而定量表征不同干旱指数在空间上对于干旱特征值排序的一致程度。该方法基于秩次而非原始数值进行计算,不受指数取值范围和量纲差异的影响。

1.3.6 干旱事件识别与指数验证方法 游程理论是一种用于识别时间序列中连续事件的方法,通过设定阈值来识别连续高于或低于该阈值的数据区段,目前已广泛用于干旱事件识别^[24-26]。本文选取4种土壤干旱指数(SSMI、SMDI、SMP、DSI),这些指数的干旱等级及阈值定义见表1^[7,27-29]。

由于不同指数阈值体系存在差异,且DSI未设置轻度干旱等级,为提高不同指数之间的可比性,本文将无旱和轻度干旱合并,并统一从中度干旱等级开始识别事件,以降低阈值差异带来的系统性偏差。干旱事件的识别条件为:当SSMI、SMDI、SMP低于中度干旱阈值(DSI高于中度干旱阈值)时事件开始,反之结束。在月尺度和周尺度分析中,事件最小持续时间分别设定为1个月和1周。基于干旱事件识别,提取3类关键干旱特征变量:1)干旱持续时间:干旱事件起止时间的差值;2)干旱频率:单位时间内(每年)干旱事件的发生次数;3)干旱严重程度:干旱事件持续期间干旱指数绝对值的累积和。

表 1 不同土壤干旱指数的干旱等级划分
Table 1 Classification of drought levels for different soil moisture drought indices

干旱等级	SSMI	SMDI	SMP	DSI
无旱/轻度干旱	SSMI>-1.0	SMDI>-1.0	SMP>0.20	0<DSI≤0.25
中度干旱	-1.5<SSMI≤-1.0	-1.5<SMDI≤-1.0	0.10<SMP≤0.20	0.25<DSI≤0.50
重度干旱	-2.0<SSMI≤-1.5	-2.0<SMDI≤-1.5	0.05<SMP≤0.10	0.50<DSI≤0.75
极端干旱	SSMI≤-2.0	SMDI≤-2.0	SMP≤0.05	0.75<DSI≤1.00

为定量评估不同土壤干旱指数在干旱事件识别中的性能,采用 3 种二元分类评价指标:命中率(probability of detection, POD)、虚警率(false alarm rate, FAR)和临界成功指数(critical success index, CSI)^[30]。其中,POD 表示实际干旱事件被正确识别的比例,FAR 反映指数误判干旱事件的比例,CSI 则综合考虑命中、漏报及虚警情况,对干旱识别的整体性能进行评价。计算公式为:

$$POD = \frac{H}{H + M} \tag{10}$$

$$FAR = \frac{F}{H + F} \tag{11}$$

$$CSI = \frac{H}{H + M + F} \tag{12}$$

式中:H 为正确识别的干旱事件数(命中);F 为被错误判断为干旱的事件数(虚警);M 为实际发生但未被指数识别的干旱事件数(漏报)。

2 结果与分析

2.1 土壤干旱的时空演变特征

2.1.1 年际变化趋势 基于 Sen's 斜率对区域平均土壤干旱指数年际变化趋势的分析结果见图 2。为便于直观比较,本文将不同时间尺度下计算得到的 Sen's 斜率统一转换为年变化率。

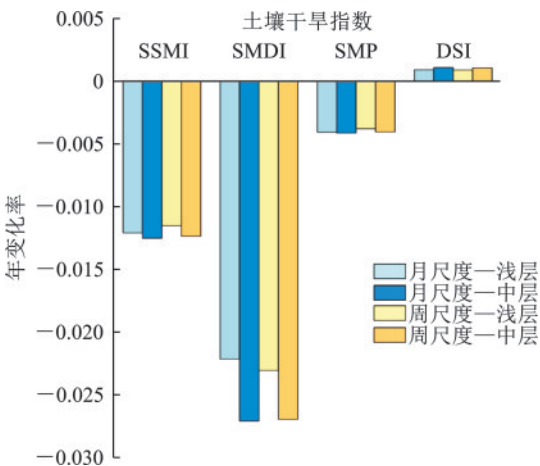


图 2 区域平均土壤干旱指数年变化率
Fig.2 Annual rate of change in regionally averaged soil moisture drought indices

不同土壤干旱指数对研究区干旱演变的响应存在明显差异:SSMI、SMP 与 SMDI 在浅层和中层土

壤中均呈现负向年变化率,指示土壤水分条件持续下降;而 DSI 在各土层和时间尺度下均表现为正向年变化率,指示农业干旱的严重程度增强。

从指数类型的角度来看,SMDI 的下降趋势最为显著,约为-0.025/a;SSMI 和 SMP 同样呈下降趋势但变化幅度较小;DSI 的年变化率整体最小(约为 0.001/a)。从不同土壤层次来看,各指数在中层土壤中的变化幅度均大于浅层土壤,表明中层土壤水分对长期水分亏缺的响应具有一定的累积特征。从时间尺度角度分析,周尺度与月尺度下各土壤干旱指数的年变化率在趋势和变化幅度上整体较为一致,表明基于不同时间尺度构建土壤干旱指数对总体干旱演变趋势的判断影响不大。

2.1.2 季节性变化空间特征 不同土壤干旱指数在季节尺度下浅层土壤中识别的干旱变化趋势见图 3。季节划分采用气象学标准,即 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至翌年 2 月为冬季。整体来看,研究区西部及南部地区在多数季节中以显著干旱加剧趋势为主($p<0.05$),而东部地区在春季和夏季主要表现为无显著变化或干旱缓解趋势,在秋季和冬季逐渐转为干旱加剧。

从季节尺度分析,春季、秋季和冬季整体呈现干旱加剧趋势,其中在东部三江平原与西部松嫩平原地区表现最为明显;夏季干旱空间异质性较强,西北部干旱显著加剧,中部和东部部分区域干旱呈缓解趋势或不显著变化。

在不同干旱指数的响应上差异进一步显现。不同土壤干旱指数在秋季和冬季表现高度一致,以干旱加剧为主,表明土壤干旱在农业关键季节持续加重;春季指数间的差异最为明显。SMDI 春季的不显著缓解面积占比为 22.4%,明显高于 SSMI(6.6%)、SMP(6.5%)和 DSI(2.5%);夏季显著加剧面积占比 14.1%,略高于其他指数(8.7%~9.5%),表明其对局部轻微干旱变化趋势更敏感。DSI 显著干旱加剧的覆盖面积在春季为 30.1%,明显高于其他指数(14.8%~20.5%);秋季为 29.6%,也高于其他指数(22.9%~23.4%),表明其对于干旱加剧的响应敏感度高,但这些区域分布相对分散,空间连续性较弱。

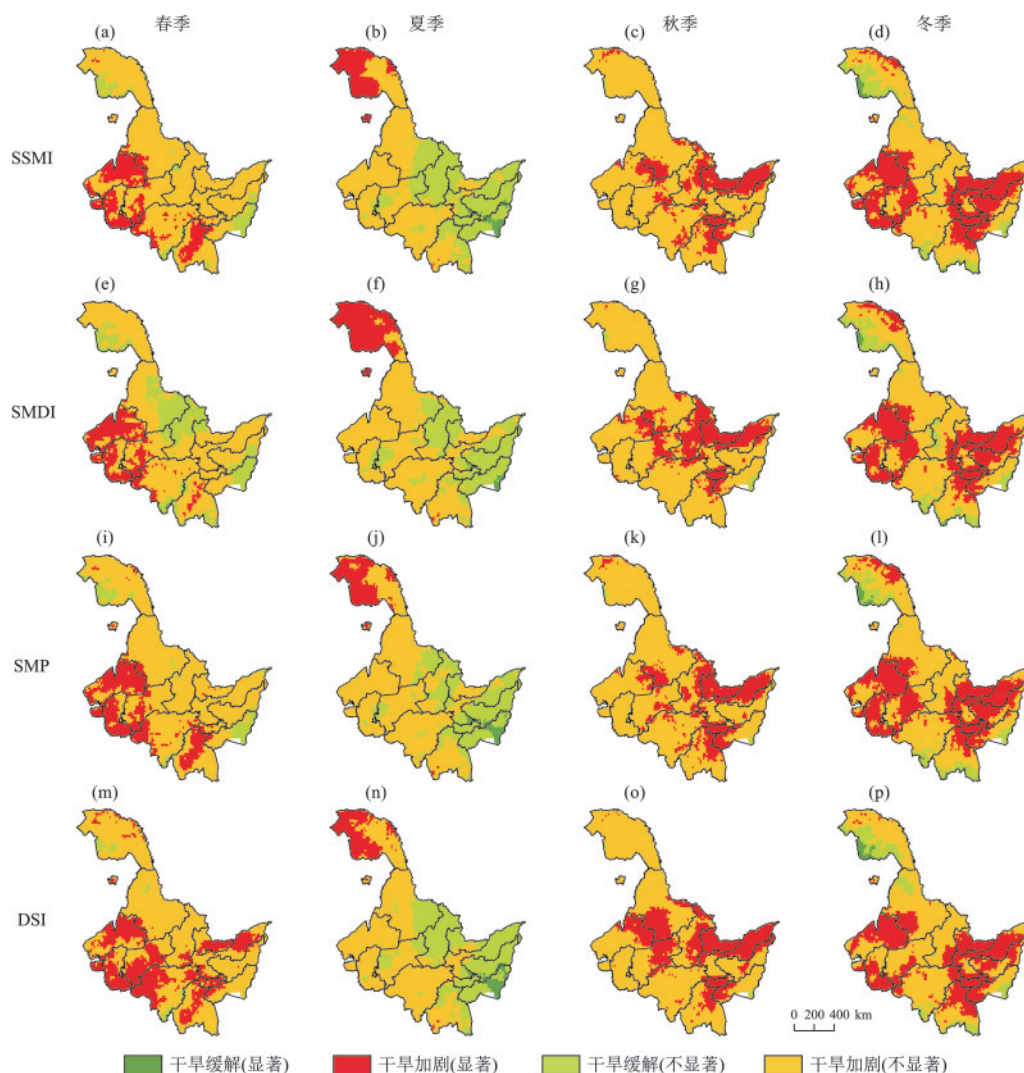


图3 季节性土壤干旱变化趋势空间分布

Fig.3 Spatial distribution of seasonal soil drought trends

2.2 干旱识别对比分析

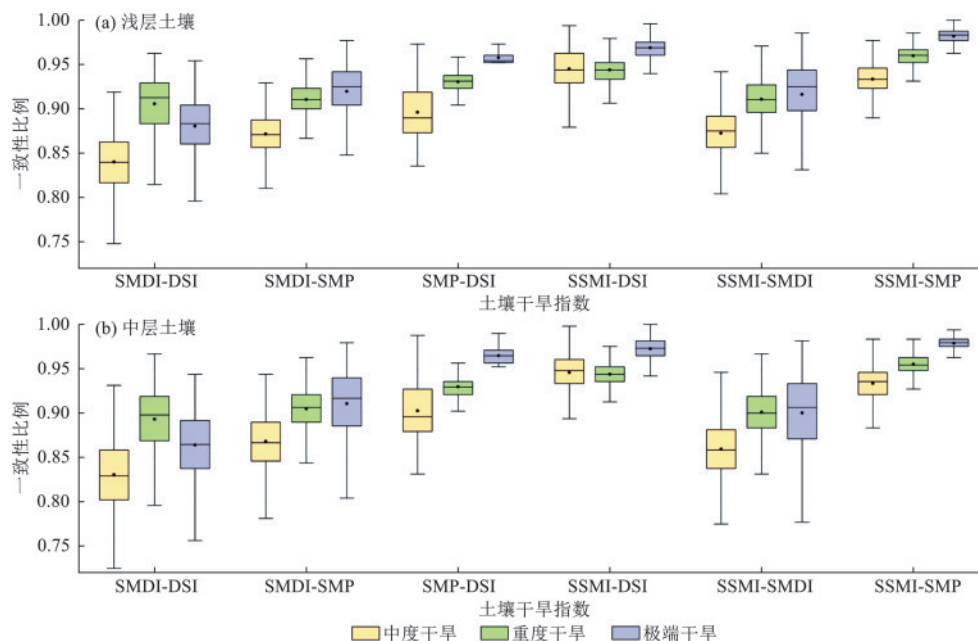
2.2.1 干旱事件识别一致性分析 基于二元化干旱判别方法,本文以每个像元的土壤干旱指数月尺度时间序列为基础,统计不同指数在浅层与中层土壤中识别中度、重度及极端干旱的一致性比例(图4)。一致性比例定义为2个指数在同一像元时间序列中判定为相同干旱状态的月数占总月数的比例。结果显示,不同干旱指数对月尺度干旱状态的识别一致性较高,浅层与中层土壤中不同指数组合判别干旱状态的一致性中位数总体分布在0.829~0.983,最小值为0.725~0.963,最大值为0.919~1.000。

从指数组合来看,在各土壤层和干旱等级下SSMI-SMP(0.883~1.000)与SSMI-DSI(0.879~1.000)的一致性整体高于其他指数组合(0.725~0.990),且分布最为集中,在部分区域对极端干旱的判别完全一致,反映2组指数在干旱响应特征方面较为相似。而SMDI与其他指数整体一致性偏低且离

散性较大,可能与不同指数的构建原理及其对土壤水分变化的敏感性差异有关。

从干旱强度等级分析,中度干旱的一致性比例最低(中位数0.829~0.948)且箱体范围较大,反映在弱干旱条件下对水分异常刻画的不确定性更高;随着干旱强度增强,重度干旱一致性明显提高(中位数0.898~0.960),而在极端干旱条件下,除SMDI-DSI外,其他指数组合的一致性比例达到最高(中位数0.906~0.983),部分地区达到1.000,表明在强烈水分亏缺背景下不同指数对于干旱状态的判定较为稳定。

2.2.2 不同时间尺度与土壤层条件下干旱特征分析 本文对不同土壤干旱指数在多时间尺度和土壤层条件下的干旱频率与平均持续时间进行对比分析(图5)。结果表明,研究区域不同干旱指数识别的干旱频率及平均持续时间在月尺度与周尺度、浅层与中层土壤条件下呈现出不同的分布特征,说明干旱指数类型、时间尺度及土壤层深度均对干旱特征的刻画产生影响。



注:箱体表示第25百分位数(Q1)至第75百分位数(Q3),中间横线表示中位数,黑点表示平均值;上下须表示1.5倍四分位距(IQR)范围内的最小值和最大值,超出该范围的异常值未显示。下同。

图4 不同土壤干旱指数干旱判别一致性比例

Fig. 4 Consistency ratios of drought identification among different soil moisture drought indices

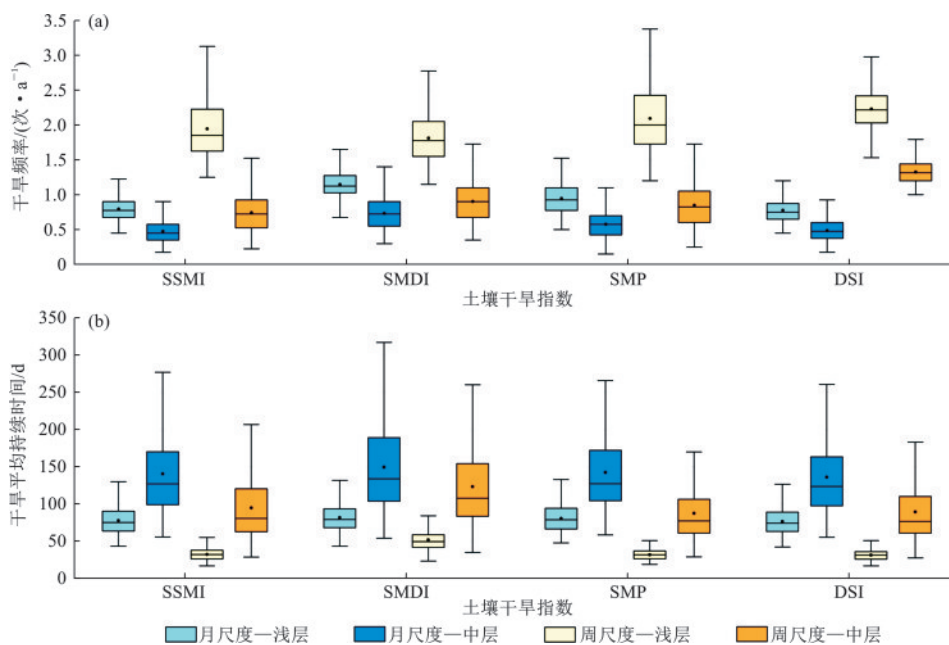


图5 不同干旱指数在多时间尺度和不同土壤层条件下的干旱频率与持续时间

Fig. 5 Drought frequency and duration of different drought indices under multiple temporal scales and soil layers

在干旱频率方面,周尺度条件下DSI在浅层和中层土壤中的中位数分别为2.22、1.32次/a,是其他指数的1.1~1.8倍,表明其对高频、短历时干旱事件具有更强的识别能力;而月尺度条件下识别干旱频率最高的指数为SMDI,中位数为其他指数的1.2~1.6倍。在干旱持续时间方面,SMDI在各条件下的平均持续时间最长,尤其在周尺度下浅层与中层土壤的中位数分别为49、107 d,是其他指数的1.3~1.6倍,反映其指数构建中所包含的记忆效应。

在相同时间尺度下,不同土壤层之间的干旱特征

也表现出系统差异。以月尺度为例,浅层土壤中不同指数的干旱频率分布在0.45~1.65次/a,整体高于中层土壤的0.3~1.4次/a;而干旱平均持续时间42~132 d,明显低于中层土壤的53~316 d,表明浅层土壤对气象条件变化响应更为迅速。在相同土壤层条件下分析时间尺度的影响,以浅层土壤为例,周尺度下干旱频率集中分布于1.15~3.38次/a,而月尺度为0.45~1.65次/a,整体上周尺度干旱发生频率为月尺度的1.7~3.4倍。同时,周尺度下干旱频率的离散性更大,表明短时间尺度干旱事件在空间分布上的差异较大。

进一步分析发现,时间尺度与土壤层次之间存在显著的交互作用。在周尺度条件下,浅层与中层土壤的干旱频率差异更为明显,短期干旱事件主要影响浅层土壤水分,而中层土壤受人渗过程及响应滞后影响,对短期干旱信号的响应相对不足,因此在周尺度下识别能力较弱。相比之下,在月尺度条件下随着干旱过程持续发展,水分亏缺逐渐向下传递,中层土壤能够充分响应干旱过程,浅层与中层之间的差异有所减弱,表明时间尺度与土壤层次通过影响土壤水分的传输与累积过程,共同调控干旱特征的识别。

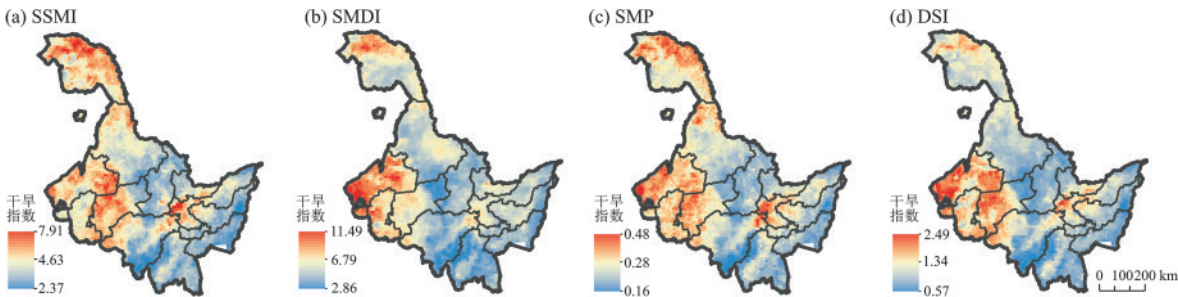


图 6 不同干旱指数下平均干旱严重程度的空间分布特征
Fig.6 Spatial distribution characteristics of mean drought severity under different drought indices

然而,不同指数在局部极值区的敏感性仍存在差异。为量化各指数提取干旱特征在空间上的一致性,本文在浅层土壤条件下对 6 组指数组合计算干旱持续时间、严重程度和发生频率的 Spearman 秩相关系数(表 2)。

表 2 不同干旱指数干旱特征空间分布一致性 Spearman 秩相关系数

指数组合	持续时	严重程	频率/	持续时	严重程	频率/
	间/月	度/月	月	间/周	度/周	周
SSMI-SMDI	0.857	0.752	0.705	0.905	0.834	0.895
SSMI-SMP	0.918	0.895	0.835	0.938	0.942	0.929
SSMI-DSI	0.972	0.903	0.950	0.962	0.894	0.826
SMDI-SMP	0.831	0.832	0.778	0.851	0.862	0.873
SMDI-DSI	0.853	0.849	0.709	0.882	0.904	0.744
SMP-DSI	0.893	0.902	0.789	0.898	0.916	0.739

结果表明,各指数对的相关系数整体较高,且均通过显著性检验($p<0.001$),不同干旱指数在像元尺度上的空间一致性较高。其中,在月尺度下空间相关性最高的组合为 SSMI-DSI,3 类干旱特征的相关系数均超过 0.90;周尺度下为 SSMI-SMP,相关系数

2.2.3 干旱特征空间分布一致性分析 4 种土壤干旱指数在研究区浅层月尺度条件下的长期平均干旱严重程度空间分布特征见图 6。图 6 中采用连续色阶分别表示干旱严重程度在研究区内的相对高低,各子图图例均标注为实际数值区间,由于各指数取值范围不同,不宜跨指数进行绝对值比较。由图 6 可知,不同干旱指数所刻画的干旱空间格局总体接近,研究区西部松嫩平原、北部大兴安岭地区及部分东部地区干旱严重程度较高,中部及南部地区干旱程度相对较低。

均超过 0.92。相比之下, SMDI 与其他指数的相关性相对较低,表明其在空间上对干旱特征的排序结果与其他指数存在差异,尤其在捕捉干旱频率时差异最为明显。对比不同干旱特征量,干旱持续时间的空间一致性整体高于严重程度和发生频率,表明其对指数类型的敏感性较低,是多指数联合条件下相对稳定的干旱特征量。

2.3 实测干旱事件验证

2003—2021 年黑龙江省历史干旱事件及不同土壤干旱指数的识别情况对比见图 7。基于月尺度浅层土壤水分干旱指数的区域平均序列,对历史干旱事件进行对比验证,所选干旱事件主要来源于气象部门记录,其本质上反映的是气象干旱过程,与土壤干旱在形成机理及响应时间上存在一定差异。因此,本文以“事件重叠时间 ≥ 1 个月”为命中标准,以降低响应时间差异对匹配结果的影响。在 2003—2021 年共筛选出 17 次可用于验证的历史干旱事件。由于样本数量有限,单个事件对统计指标的影响较大。因此,本节评价结果仅反映不同指数在历史干旱识别中的相对性能差异。

由表 3 可知, DSI 的综合评分(CSI)最高(0.650), 兼顾高命中率与低虚警率,适合作为优选指标用于长短期干旱识别。SSMI 的 CSI 次之,且虚警率最低,能较好反映干旱事件而不过度放大短期波动。SMP 命中率较低,可能低估短期骤发干旱。SMDI 的命中率最高但虚警率也最高,其对于干旱开始阶段的水分异常较为敏感,易高估干旱频率和持续时间,可作为早期干旱预警或风险提示指标。

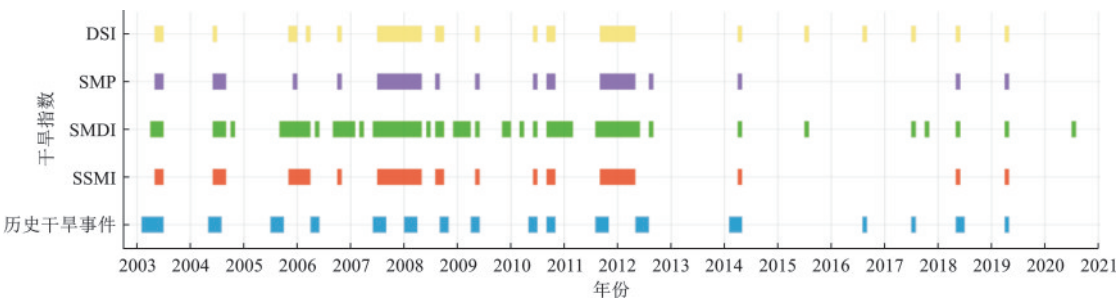


图7 黑龙江省 2003—2021 年历史干旱事件与干旱指数识别结果的时序分布及持续时间对比

Fig.7 Temporal distribution and duration comparison of historical drought events and drought index identification results in Heilongjiang Province from 2003 to 2021

表 3 不同土壤干旱指数识别历史干旱事件的 POD、FAR 和 CSI 指标

Table 3 POD, FAR, and CSI metrics of different soil moisture drought indices in identifying historical drought events

土壤干旱指数	POD	FAR	CSI
SSMI	0.688	0.154	0.611
SMP	0.625	0.286	0.500
SMDI	0.933	0.440	0.538
DSI	0.813	0.235	0.650

3 讨论

基于周尺度与月尺度、浅层与中层土壤层,本文构建 SSMI、SMDI、SMP 和 DSI 4 种土壤干旱指数,系统分析其在黑龙江省农业干旱监测中对于干旱演变过程、干旱特征及历史干旱事件的识别差异。结果表明,不同指数在趋势响应、识别一致性及对事件的刻画能力方面存在明显差异,主要受指数构建原理、时间尺度及土壤层深度的共同影响。

区域平均年际趋势分析显示,不同土壤干旱指数一致表明研究区农业干旱加剧,与李颖等^[31]对东北地区干旱时空演变特征的研究结论一致。SSMI 与 SMDI 变化幅度较大,SMP 与 DSI 的年际变化率相对较小,与指数的取值范围和计算方法有关,并不能直接反映对土壤水分的敏感性差异。从土壤层次看,中层土壤变化幅度普遍大于浅层土壤,其干旱加剧信号更为突出,可能与下渗、长期水分亏缺累积及响应滞后等因素有关。季节尺度分析进一步表明,干旱演变具有季节性差异,与东北地区季风气候条件下降水年内分配不均的特征相一致,相关规律也在史风梅等^[32]对黑龙江省农业干旱的研究中得到验证。

多尺度一致性分析结果表明,不同干旱指数在干旱强度增强时识别结果趋于一致,而在干旱强度较弱或发生早期阶段不确定性较高。浅层土壤中指数一致性整体高于中层土壤,表明浅层土壤对根区水分变化的响应更为直接,不同指数对干旱信号的识别相对一致;而中层土壤受下渗、土壤结构等因素的影响,不同指数对水分异常的响应差别更大。进一步来看,时间

尺度与土壤层次的交互作用也影响干旱特征的识别。在短时间尺度下,干旱信号主要集中于浅层土壤,而随着时间的尺度延长,水分亏缺逐渐向中层累积,从而改变不同土层对干旱的响应程度。不同干旱指数在干旱特征提取方面也表现出明显差异,例如,DSI 对周尺度短期干旱事件的识别能力较强,而 SMDI 在月尺度及中层土壤中捕捉到的干旱过程持续时间更长。Spearman 秩相关分析显示,不同指数在提取干旱特征的空间分布上存在差异,其中 SMDI 与其他指数的相关性较低。结合历史干旱事件验证,各指数在响应速度与稳定程度方面各有优势:稳健型指数(SSMI、SMP)更适合反映长期背景下的干旱状态,而敏感型指数(DSI、SMDI)在捕捉干旱初始信号方面具有优势。为降低单一指数的不确定性,可构建多指数协同监测框架,将稳健型指数与敏感型指数结合使用以提高农业干旱监测结果的可靠性。例如,以综合表现最优的 DSI 为核心指标,结合 SMDI 进行辅助识别,对农业干旱发生、发展过程进行分阶段刻画,从而在提高干旱早期识别能力的同时,降低短期波动引起的误报风险。

需要指出的是,本文关于不同土壤干旱指数差异及适用性的结论,是基于黑龙江省特定气候背景与土壤条件得到的,其推广应用具有一定前提条件。研究区自东向西呈湿润、半湿润至半干旱的过渡特征,土壤类型以暗棕壤、黑土和草甸土为主,整体有机质含量较高,其中黑土和草甸土的持水能力较强^[33-34]。在此背景下,各指数对土壤水分异常的响应关系相对稳定,从而支撑 DSI 在综合识别能力上的优势。在不同气候区或土壤类型条件下,相关结论可能有所差异。例如,在湿润地区土壤水分常年处于较高水平,干旱多表现为短期异常波动,DSI 在此类较轻或短期干旱条件下的响应可能相对不敏感。因此,本文中评价指数的结论主要适用于具有类似气候与土壤条件的地区,在其他区域仍有待进一步验证。土壤干旱指数的适用性不仅受指数构建原理和时间尺度影响,还与气候背景和土壤物理性质密切相关,在实际应用中需结合区域气候特征与土壤类型,有针对性地选择或组合使用干旱指数。

本研究从多角度比较土壤干旱指数在农业干旱监测中的表现,但仍存在一定局限性。首先,受历史干旱事件样本数量及时间尺度限制,验证结果对个别事件敏感,影响结论的稳健性,评价指标只能反映不同指数的相对性能差异。其次,各干旱指数均参考已有研究的阈值标准,旨在反映实际应用中的监测效果,而不同干旱指数在统计分布上存在差异,可能影响多指标对比的绝对公平,例如,各指数在识别干旱频率上的差异,部分可能来源于阈值设定而非指数本身。未来研究可考虑采用百分位数匹配法,在多指数比较框架下进一步增强指数间的可比性,并结合更长的时间序列或跨区域对比分析,引入农业灾情或植被响应信息,以提升结论的稳健性和应用价值。

4 结论

1)不同干旱指数在反映年际和季节性干旱趋势上存在明显差异。年际变化率方面,SMDI变化最显著,DSI变化率最小。季节响应上春季指数间的差异最明显:SMDI对局部轻微干旱缓解较敏感;DSI对显著干旱加剧的响应最突出,其识别面积为其他指数的1.5~2.0倍。

2)不同干旱指数在干旱状态判定上存在差异。指数组合SSMI-SMP和SSMI-DSI一致性最高,分布区间分别为0.883~1.000和0.879~1.000,表明2组指数在干旱响应特征上较为接近;SMDI与其他指数一致性偏低且离散性较大,差异较为显著。总体来看,干旱强度越高,各指数识别结果越一致。

3)在不同土壤层条件下,各干旱指数在干旱特征刻画上表现出的差异较为一致。干旱频率方面,基于中位数计算,不同时间尺度响应频率最高的指数不同:周尺度下DSI为其他指数的1.1~1.8倍,月尺度下SMDI为其他指数的1.2~1.6倍。相比之下,干旱持续时间在不同尺度和土壤层条件下相对稳定,其中SMDI平均持续时间最长,且受指数类型的影响低于严重程度和频率,是多指数条件下较为稳定的特征量。

4)历史干旱事件验证表明,各指数在敏感性与稳定性方面各具优势:DSI综合评分最高,表现出较优的识别能力,可优先作为识别指标;SSMI稳健,虚警率最低;SMDI敏感性高,适用于早期干旱预警或局部水分异常监测;SMP较保守,对干旱敏感性不足。本文结论主要适用于具有与黑龙江省相似气候和土壤条件的地区,在其他区域的适用性仍需进一步验证。在实际应用中,可多指数协同应用以降低单一指数不确定性。

参考文献:

[1] Wu Jianjun, He Bin, Lü Aifeng, et al. Quantitative assessment and spatial characteristics analysis of agricultural drought vulnerability in China[J]. *Natural Hazards*,

2011,56(3):785-801.

- [2] Hao Zengchao, Singh V P, Xia Youlong. Seasonal drought prediction: Advances, challenges, and future prospects[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018,56(1):108-141.
- [3] Dutra E, Viterbo P, Miranda P M A. ERA-40 reanalysis hydrological applications in the characterization of regional drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008,35(19):116-122.
- [4] Hao Zengchao, AghaKouchak A. Multivariate standardized drought index: A parametric multi-index model[J]. *Advances in Water Resources*, 2013,57:12-18.
- [5] 周洪奎,武建军,李小涵,等.基于同化数据的标准化土壤湿度指数监测农业干旱的适宜性研究[J]. *生态学报*, 2019,39(6):2191-2202.
- Zhou Hongkui, Wu Jianjun, Li Xiaohan, et al. Suitability of assimilated data-based standardized soil moisture index for agricultural drought monitoring[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(6):2191-2202.
- [6] Sheffield J, Wood E F. Characteristics of global and regional drought, 1950—2000: Analysis of soil moisture data from off-line simulation of the terrestrial hydrologic cycle[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007,112(D17):e2006JD008288.
- [7] Singh G, Das N N, Prasad P V V. Geospatial monitoring and analysis of agricultural drought to identify hot-spots and risk assessment for Senegal[J]. *Geography and Sustainability*, 2025,6(1):e100248.
- [8] Fan Keke, Zhang Qiang, Gu Xihui, et al. Global soil moisture drought identification and responses to natural and anthropogenic forcings[J]. *Journal of Hydrology*, 2022,610:e127993.
- [9] Cammalleri C, Micale F, Vogt J. A novel soil moisture-based drought severity index (DSI) combining water deficit magnitude and frequency[J]. *Hydrological Processes*, 2016,30(2):289-301.
- [10] 孙思琪,丁艺鼎,吕海深,等.黄淮海平原不同土壤层的农业干旱特征及影响因素分析[J]. *节水灌溉*, 2025(11):55-62.
- Sun Siqi, Ding Yiding, Lü Haishen, et al. Analysis on agricultural drought characteristics and influencing factors in different soil layers of the Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Water Saving Irrigation*, 2025(11):55-62.
- [11] 游漫,贺中华,张浪,等.贵州省农业与气象干旱特征及其响应关系[J]. *水土保持学报*, 2022,36(5):255-264.
- You Man, He Zhonghua, Zhang Lang, et al. Characteristics of agricultural and meteorological drought in Guizhou Province and their response relationship[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(5):255-264.
- [12] 陆玫,朱永华,吕海深,等.淮北平原冬小麦农业干旱时空变化规律[J]. *灌溉排水学报*, 2024,43(11):74-81.
- Lu Wen, Zhu Yonghua, Lü Haishen, et al. Spatiotemporal variation in droughts during winter wheat growing season in the Huaibei Plain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024,43(11):74-81.
- [13] 吕天,刘珺,李子璇,等.土壤湿度农业干旱指数的改进及其适用性[J]. *农业工程学报*, 2023,39(17):116-123.
- Lyu Tian, Liu Jun, Li Zixuan, et al. Improvement and

- applicability of the soil moisture based agricultural drought index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(17): 116-123.
- [14] Zhang Yuefen, Hao Yimin, Tian Jiyang, et al. Studying the impacts of land use types and soil textures on agricultural drought in Ziya River basin using SWDI[J]. Scientific Reports, 2025, 15: e42088.
- [15] Li Peng, He Liang, Wang Xuetong, et al. How reliable are long time-series reanalysis and model-based soil moisture products for agricultural soil water stress monitoring? Insights from a five-dataset evaluation across China[J]. Agricultural Water Management, 2025, 320: e109845.
- [16] 刘维成, 徐丽丽, 朱姜韬, 等. 再分析资料和陆面数据同化资料土壤湿度产品在中国北方地区的适用性评估[J]. 大气科学学报, 2022, 45(4): 616-629.
- Liu Weicheng, Xu Lili, Zhu Jiangtao, et al. Evaluation of reanalysis and LDAS soil moisture products over northern China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(4): 616-629.
- [17] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2004—2022)[M]. 北京: 气象出版社, 2023.
- China Meteorological Administration. China meteorological disaster yearbook (2004—2022)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2023.
- [18] Afshar M H, Bulut B, Duzenli E, et al. Global spatio-temporal consistency between meteorological and soil moisture drought indices[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 316: e108848.
- [19] Narasimhan B, Srinivasan R. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 133(1/2/3/4): 69-88.
- [20] Sheffield J, Goteti G, Wen Fenghua, et al. A simulated soil moisture based drought analysis for the United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D24): e2004JD005182.
- [21] Zhu Qian, Luo Yulin, Xu Yueping, et al. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of SMAP-derived soil water deficit index in Xiang River basin, China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): e362.
- [22] Yue Sheng, Wang Chunyuan. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series[J]. Water Resources Management, 2004, 18(3): 201-218.
- [23] 王佃来, 宿爱霞, 刘文萍. 基于 Spearman 等级系数的植被变化趋势分析[J]. 应用科学学报, 2019, 37(4): 519-528.
- Wang Dianlai, Su Aixia, Liu Wenping. Trend analysis of vegetation cover changes based on spearman rank correlation coefficient[J]. Journal of Applied Sciences, 2019, 37(4): 519-528.
- [24] Herbst P H, Bredenkamp D B, Barker H M G. A technique for the evaluation of drought from rainfall data[J]. Journal of Hydrology, 1966, 4: 264-272.
- [25] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 206-214.
- Wang Xiaofeng, Zhang Yuan, Feng Xiaoming, et al. Analysis and application of drought characteristics based on run theory and copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 206-214.
- [26] 杨铭珂, 贺中华, 张浪, 等. 不同时间尺度下气象干旱向水文干旱传播过程[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 350-360.
- Yang Mingke, He Zhonghua, Zhang Lang, et al. Propagation process of meteorological drought to hydrological drought in different time scales[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 350-360.
- [27] Liu Jiaying, Zhu Yonghua, Horton R, et al. Agricultural drought recovery characteristics and water requirement for rapid drought recovery in the Huai River basin, China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 59: e102396.
- [28] Svoboda M, LeComte D, Hayes M, et al. The drought monitor[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1181-1190.
- [29] Pan Ying, Zhu Yonghua, Lü Haishen, et al. Accuracy of agricultural drought indices and analysis of agricultural drought characteristics in China between 2000 and 2019[J]. Agricultural Water Management, 2023, 283: e108305.
- [30] Zhang Linqi, Liu Yi, Ren Liliang, et al. Analysis of flash droughts in China using machine learning[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(12): 3241-3261.
- [31] 李颖, 马双, 徐菀笛, 等. 东北三省干旱时空特征及其对植被覆盖变化的影响[J]. 生态学报, 2026, 46(5): 2701-2723.
- Li Ying, Ma Shuang, Xu Wandu, et al. Spatiotemporal characteristics of drought and its impact on vegetation cover change in the three northeastern provinces of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(5): 2701-2723.
- [32] 史风梅, 裴占江, 卢玢宇, 等. 黑龙江省农业干旱灾害时空变化特征研究[J]. 黑龙江农业科学, 2019(7): 18-24.
- Shi Fengmei, Pei Zhanjiang, Lu Binyu, et al. Study on the change characteristics of agrometeorological drought disaster in Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(7): 18-24.
- [33] 范作伟, 彭畅, 金荣德, 等. 东北地区主要土壤类型及其肥力指标与气象因子的相关性[J]. 玉米科学, 2018, 26(3): 140-146.
- Fan Zuowei, Peng Chang, Jin Rongde, et al. Main soil types in northeast China and fertility index correlation with meteorological factors[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(3): 140-146.
- [34] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 1-12.
- Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1-12.