

# 基于多元逐步回归分析的 葡萄园干旱监测模型

李雪健<sup>1</sup>,王美丽<sup>1</sup>,赵敏<sup>1</sup>,史颖涵<sup>1</sup>,高 强<sup>2</sup>

(1.西北农林科技大学信息工程学院,陕西 杨凌 712100;2.西安邮电大学通信与信息工程学院,陕西 西安 710121)

**摘要:**为明确葡萄园区干旱评价标准,制定了一种具有区域适用性的干旱指数,通过在渭南市临渭区葡萄研究所葡萄试验田进行干旱胁迫对比试验,得出一种结合植物生长图像与环境要素的干旱监测模型;使用逐步回归分析法,计算出土壤湿度与众多影响因素间的关系,得到干旱监测模型。试验结果表明:回归方程的确定系数(R-square)可达0.91,模型精确,拟合效果较好。搭建了一个干旱监测与预警平台,可以实时监控作物的生长状况,为精准灌溉提供决策。

**关键词:**葡萄园;干旱监测;干旱指数;多元逐步回归分析

**中图分类号:**S423 **文献标志码:**A

## Vineyard drought monitoring model based on multiple stepwise regression analysis

LI Xuejian<sup>1</sup>, WANG Meili<sup>1</sup>, ZHAO Min<sup>1</sup>, SHI Yinghan<sup>1</sup>, GAO Qiang<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China)

**Abstract:** To identify the drought evaluation standard of grape vineyards and solve the problem of lack of irrigation guidance, a drought index with regional applicability was developed in this study. Through the comparative experiment of drought stress in the experimental field of Grape Research Institute in Linwei District of Weinan City, a drought monitoring model combining plant growth image and environmental factors was proposed. The relationship between soil moisture and many factors was calculated by stepwise regression analysis, and the drought monitoring model was obtained. The experimental results showed that the R-square of regression equation reached 0.91. The model was accurate, and the fitting effect was good. Finally, a drought monitoring and early warning platform was built. The system can be used to monitor the growth status and data of crops in real time and provide decision-making for precision irrigation.

**Keywords:** vineyard; drought monitoring; drought index; multiple stepwise regression analysis

近年来,陕西省葡萄种植业发展迅速,种植面积与产量均上升至全国第三位。然而,随着葡萄种植面积的不间断扩大,葡萄产业受自然灾害的影响也随之加剧,尤其是在全球气候变暖背景下,频繁地出现极端天气,农业气象灾害也更频繁地发生。特别是葡萄成熟前期,园区气象灾害频发(7月持续高温干旱),造成葡萄在转色、成熟时由于养分供应不

上,抗病性下降,易出现因白腐病或挂果量过多而造成的穗轴干枯、掉粒、落粒现象,严重影响了葡萄的产量和质量。干旱是影响我国农业发展最严重的气象灾害,主产区是旱灾的易发区和脆弱区<sup>[1-7]</sup>。由于旱灾的发生及其程度存在很强的不确定性,在旱灾发生前对干旱风险进行评估有着重要的实际意义。干旱指数是干旱问题的基础,同时也是量化

干旱风险的标准,其确定是干旱研究的难点,而如何确定影响干旱的主要因素是制定分级标准的关键<sup>[8]</sup>。

干旱指数在干旱监测和预警中发挥着基础性的作用,为了不同的研究目的研究人员提出了多种干旱指数<sup>[9-12]</sup>。标准化降水指数(SPI)可以反映不同地区以及不同时间尺度的旱涝状况,但 SPI 忽略了气温变化对干旱的影响。近年来各种与 SPI 相似的标准干旱指数被国内外学者提出,例如标准化径流指数(SRI)<sup>[13]</sup>、标准化土壤水分指数(SSSI)<sup>[14]</sup>。单指标干旱指数的显著缺点是仅考虑单一因素不能反映下垫面、作物等变量对干旱的影响。由于旱情的复杂性,近年来逐步形成了综合多变量的干旱综合指数。Palmer 干旱指数(PDSI)<sup>[15]</sup>广泛应用于干旱监测中,但其使用的多个经验参数的取值依赖于研究区域。针对 PDSI 所存在的问题,出现了自矫正 PDSI(scPDSI),Liu 等<sup>[16]</sup>通过调整持续因子对 scPDSI 进行了改进。Vincent Serrano 等<sup>[17]</sup>基于大气水分平衡,提出了标准化降雨-蒸散-干旱指数(SPEI)。张强等<sup>[18]</sup>针对相对湿度指数和 SPI 进行加权,建立出了气象综合干旱指数(MCI)。虽然 SPEI 与 SPI 相比优势明显,但也存在不足<sup>[19]</sup>:SPEI 将潜在蒸散量(即蒸发量)用来表示需水量,在限水区域内的误差较大;SPEI 主要描述的是气象干旱,在实际监测其他类型干旱时可能存在误差。针对这一不足,Zhang 等<sup>[20]</sup>提出了不同时间尺度的标准化水异常指数(SZI)。然而由于计算的复杂性,其在数据缺乏地区的应用受到限制<sup>[19]</sup>。综合干旱可以比较准确地反映实际旱情,但需要人工干预才能实现干旱分类,较为复杂<sup>[21]</sup>。

目前的干旱指数大多局限于气象、水文等数据,以单一或多元的变量制定标准,很少有与其他方面结合的干旱指数。为了探寻具有更强区域针

对性与更好直观性的干旱分级指标,本文通过 4 组干旱胁迫对比试验,对 4 组试验田进行梯度灌溉,收集土壤与气象数据,并对作物的叶片果实生长状况进行拍摄,以作物叶片、果实出现明显外观变化为依据,确定出了土壤湿度与植物外观变化相结合的干旱指数。探究了土壤、气象、人为灌溉等因素对其的影响,本文使用多元逐步回归分析法<sup>[22]</sup>,得出土壤湿度与众多影响因素之间的数量依存关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 干旱胁迫试验设计

为制定植物生长状况与土壤湿度结合的干旱分级标准,本研究在陕西省渭南市临渭区葡萄研究所进行了干旱胁迫对比试验。渭南市临渭区是陕西省葡萄栽种面积最大的县(区),总面积 1 221 km<sup>2</sup>。临渭区属于暖温带半湿润半干旱气候,该地区年降雨量 560 mm,年日照时长 2 277 h,四季分明,阳光充足。十分利于发展农业,但也存在对农作物造成较大危害的伏旱、秋涝和夏季干热风。

试验材料为阳光玫瑰葡萄植株,选取开花期、生长期、成熟期 3 个生长阶段,安装灌溉水泵、摄像头、土壤墒情传感器,进行 4 组干旱胁迫试验。试验在人工控水条件下进行,为避免土壤水分在水平方向上的交换,试验区采用玻璃纤维制成的隔离层分隔,4 个试验区域的单次灌溉时间初步设置为 0、5、10、15 min,灌溉间隔为 5 d,灌溉形式为滴灌,滴头流量为 6 L·h<sup>-1</sup>,在试验场地铺设水管,并安装水表,以量化灌溉供水。

每 30 min 收集土壤墒情数据与气象数据,持续拍摄植株生长状况,以植株出现明显外观变化为目标记录该时的土壤湿度,土壤湿度与植株生长状况结合作为本文制定的分级标准,如表 1 所示。

表 1 基于葡萄生长状况的干旱分级标准

Table 1 Drought classification standard based on grape growth

项目 Item	重度干旱 Severe drought	中度干旱 Moderate drought	轻度干旱 Mild drought	正常生长 Growing normally
描述 Description	藤蔓枯萎 Vine withered	叶子整片枯黄 Leaves withered throughout	部分叶片枯黄 Part of the leaves withered	无明显变化 No significant change
土壤湿度/% Soil moisture	<34	34~42	42~50	>50

### 1.2 数据整理与分析

试验过程中,记录各个时间点的土壤、气象数据。土壤湿度作为选定的重要干旱指标,受其他众多因素影响,为了在众多常规因素指标中找出影响土壤湿度的主要因素,以土壤湿度为因变量,采用

逐步回归分析法对影响土壤湿度的核心因素进行分析。统计指标包括:土表温度( $x_1$ )、浅层(10 cm)土壤温度( $x_2$ )、浅层(10 cm)土壤湿度( $x_3$ )、深层(20 cm)土壤温度( $x_4$ )、深层(20 cm)土壤湿度( $x_5$ )、风速( $x_6$ )、风向( $x_7$ )、空气温度( $x_8$ )、空气湿

度( $x_9$ )、大气压力( $x_{10}$ )、降雨量( $x_{11}$ )、本组土壤灌溉量( $x_{12}$ )。其中对于浅层、深层土壤与表层土壤数据进行比较发现,存在不同程度的滞后性,浅层较表层变化时间推迟 2 h、深层较表层变化时间推迟 6 h,所以对二者共 4 项指标做时间平移处理,以便得到更好的拟合效果。

使用 Matlab 数学软件对上述统计指标进行逐步回归分析,可得到 4 组试验对应的回归方程:

$$y_1 = -3.910x_2 + 1.113x_3 + 3.110x_4 - 0.320x_5 - 0.497x_8 - 0.207x_9 - 0.738x_{10} + 0.223x_{11} + 772.271 \quad (1)$$

$$y_2 = -2.107x_2 + 0.661x_3 + 1.107x_4 + 0.427x_8 + 0.089x_9 - 0.647x_{10} + 647.371 \quad (2)$$

$$y_3 = 0.298x_1 - 0.880x_2 + 0.365x_3 + 0.503x_{10} - 0.019x_{11} + 0.419x_{12} - 458.663 \quad (3)$$

$$y_4 = -0.891x_1 + 8.596x_2 + 2.135x_3 - 2.685x_4 - 0.309x_5 + 0.991x_8 + 0.483x_9 + 1.766x_{10} + 0.650x_{11} + 0.111x_{12} - 1865.46 \quad (4)$$

### 1.3 干旱监测与预警平台

通过上述方法得到的干旱指数与回归方程搭建了一个干旱监测与预警平台,包含硬件与软件两部分。

**1.3.1 硬件设备** 设备包括供水灌溉、干旱指数测定、干旱监测预警和灌溉决策控制 4 个模块,其中供水灌溉模块包括水池、电源、电动机、水泵、电磁阀、管网、喷头等,干旱指数测定模块由摄像头、土壤参数传感器、气象参数测定仪、图像处理软件和数据分析软件组成,干旱监测预警模块由显示屏、报警器和上位机组成,灌溉决策控制模块由手机客户端、Web 网页和上位机操作软件组成。

设备的结构如图 1 所示:干旱指数测定模块中,土壤参数传感器收集土表、浅层(10 cm)、深层(20 cm)的土壤温度、湿度数据,气象参数测定仪收集空气温度、空气湿度、光照、降雨量、风速、风向等气象数据,摄像头拍摄作物生长录像供图象处理软件进行分析,数据分析软件用于对各类数据进行分析处理,以及干旱指数的计算。

干旱监测预警模块实时显示当前各类数据与干旱指数,低于或超过标准值范围时通过报警器进行预警播报。

灌溉决策控制模块中,可通过手机客户端与 Web 网页查看土壤、气象、作物生长录像的实时与历史数据,查看系统根据当前数据与干旱指数计算出此刻所需最佳灌溉量,为用户提供灌溉决策,用户能够通过上位机软件对作物进行远程灌溉。

此硬件设备通过连续采集土壤、气象和处理后的图象 3 种数据,测定出适用本地区、适用此类作物的干旱指数,将数据与干旱指数实时显示在显示屏上,为灌溉决策提供理论依据;用户通过手机客户端软件、Web 网站和上位机软件操作系统随时随地查看土壤、气象实时与历史数据,查看作物生长实时与历史录像,获取干旱指数标准表格与当前时刻最佳灌溉量,提供手动与远程两种方式对作物进行灌溉,操作便捷;通过数据分析软件获取相关数据变化趋势,逐步回归分析法计算灌溉量为用户提供灌溉决策。

**1.3.2 软件系统** 为完成干旱胁迫对比试验,实现监测植物气象、土壤数据及生长状况,本研究设计的软件系统结构如图 2 所示。

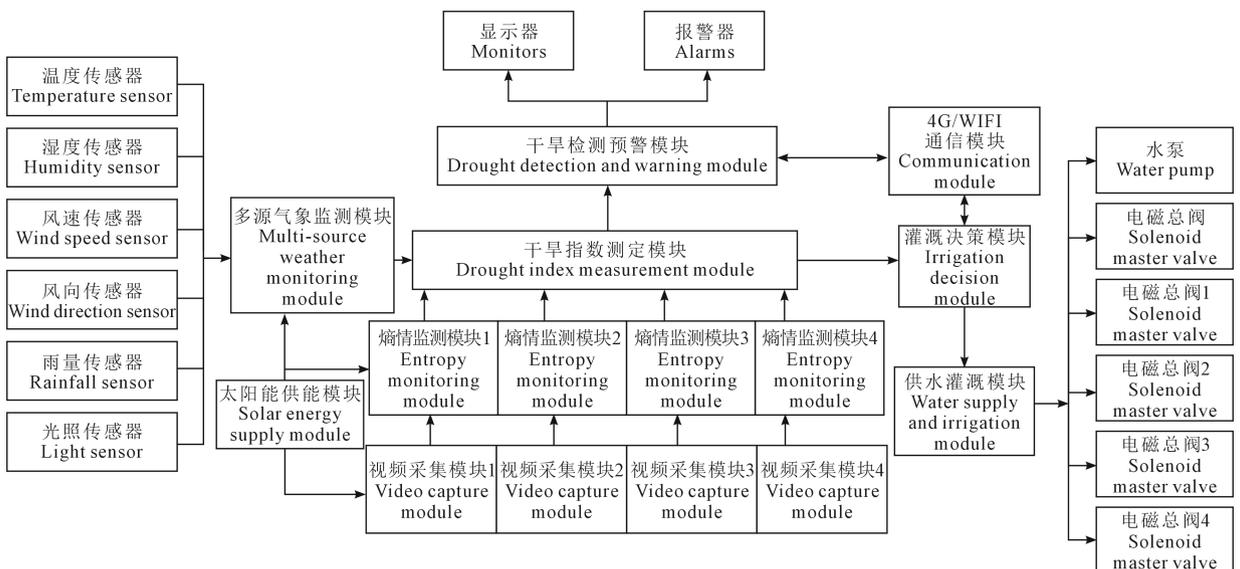


图 1 硬件设备结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of hardware equipment structure

本系统合理地实现智能灌溉,进行全面详细的数据收集、分析,提供灌溉决策,其实时性、目的性强,可针对不同区域与作物种类,适用范围广,得到的灌溉方案具有很高的参考价值。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验结果

通过干旱胁迫对比试验,得到了结合植物生长

状况图像与土壤湿度数据的干旱指数,计算出土壤湿度作为因变量的逐步回归方程,干旱指数与方程共同构成干旱监测模型。通过对 1.2 中所述 12 个可能影响土壤湿度的变量进行逐步回归分析,可得到各个自变量的系数与  $T$  检验中的  $p$  值,如表 2 所示。

4 组不同干旱情况对比试验的原始数据和预测曲线如图 3 所示。

对曲线计算确定系数(R-square)进行回归模型

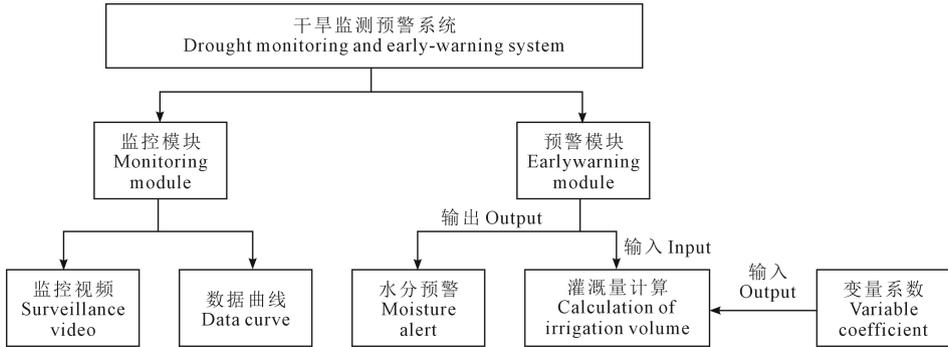


图 2 软件系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of software system structure

表 2 各变量系数与  $T$  检验中的  $p$  值

Table 2 Coefficient of each variable and  $p$  value in  $T$  test

组 Group	项目 Item	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	$x_{11}$	$x_{12}$
1	系数 Coefficient	0.352	-3.910	1.113	3.110	-0.320	-0.338	-0.000	-0.497	-0.207	-0.738	0.223	0.021
	$p$	0.262	0	0	0	0	0.245	0.932	0.000	0	0	0.000	0.120
2	系数 Coefficient	0.026	-2.107	0.661	1.107	0.012	0.451	0.000	0.427	0.089	-0.647	-0.271	0.008
	$p$	0.936	0.004	0.001	0.074	0.644	0.255	0.766	0.001	0.015	0.017	0.471	0.566
3	系数 Coefficient	0.298	-0.880	0.365	0.019	0.006	0.130	-0.001	-0.081	0.016	0.503	-0.019	0.419
	$p$	0	0	0	0.634	0.612	0.365	0.437	0.101	0.251	0	0	0.004
4	系数 Coefficient	-0.891	8.596	2.135	-2.685	-0.309	0.591	-0.004	0.991	0.483	1.766	0.650	0.111
	$p$	0.063	0	0	0.027	0	0.175	0.169	0	0	0	0	0

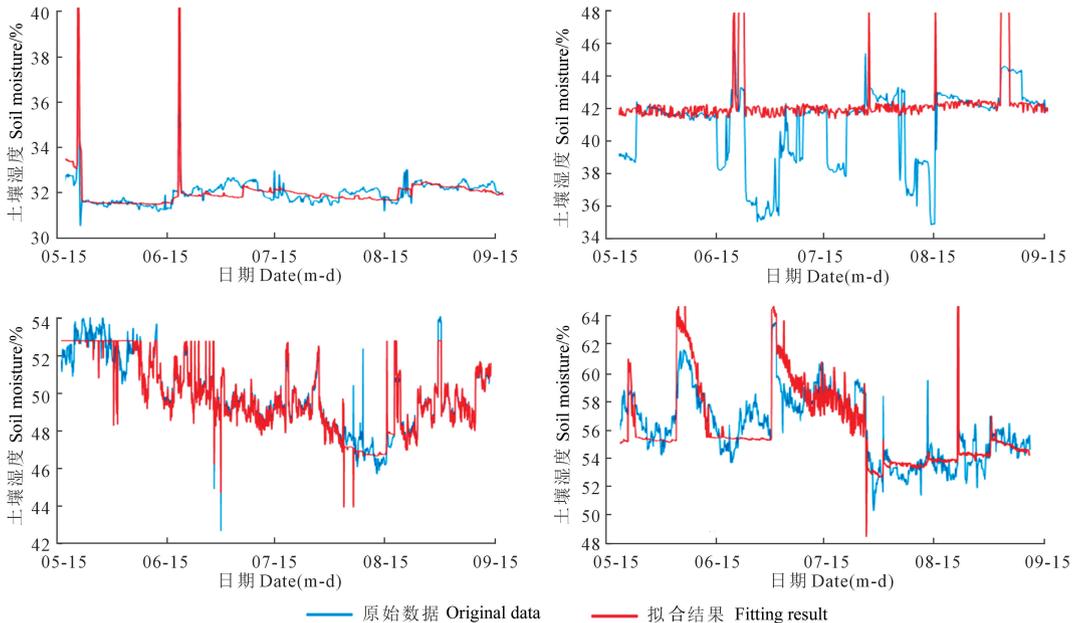


图 3 土壤湿度的拟合结果与原始数据对比

Fig.3 Comparison between fitting results and original data of soil moisture

评估,结果分别为: $R_1^2 = 0.6859$ ,  $R_2^2 = 0.532233$ ,  $R_3^2 = 0.910663$ ,  $R_4^2 = 0.7232$ 。

观察到  $R_3^2$  高达 0.91, 接近 1, 可知第三个曲线拟合效果最好, 模型精确, 回归效果显著。

由式(3)可得到最终的干旱监测模型公式:

$$H = 0.298 t_1 - 0.880 t_2 + 0.365 h_1 + 0.503 P - 0.019R + 0.419I - 458.663 \quad (5)$$

式中,  $H$  为土壤湿度(10 cm 土层),  $t_1$  为土表温度,  $t_2$  为浅层土壤温度(10 cm 土层),  $h_1$  为浅层土壤湿度(10 cm 土层),  $P$  为大气压强,  $R$  为降雨量,  $I$  为灌溉量。回归方程的 R-square 为  $R = 0.91$ , 预测值和实际值的误差在  $-1.8\% \sim 2.0\%$ , 说明方程中自变量与因变量线性关系比较密切, 拟合度较好。

## 2.2 灌溉决策建议

作物种植与生产过程中最重要的环节即是灌溉环节, 很大程度上决定了能否提高作物产量。我国是一个农业大国, 水资源短缺, 灌溉用水的需求量很大, 但灌溉用水占总用水量比例却在不断降低, 导致农作物产量下降, 水资源短缺已经成为了农业可持续发展的障碍。目前农田的灌溉方式存在以下问题:(1)作物灌溉仍然以经验主导, 灌溉量全凭农民个人感觉与经验, 没有明确指标与理论依据;(2)对作物生长过程的监控都采用人工管理完成, 管理水平落后, 并且人工劳动成本较大, 人机交互水平差, 农作物产量与质量无法得到保证。本研究通过干旱胁迫试验, 通过对比试验得到的逐步回归方程, 可以推导出灌溉量( $x_{12}$ )与其他变量间的关系, 使用拟合效果最好的第三组试验的回归方程可得:

$$I = 2.387H - 0.711 t_1 + 2.100 t_2 - 0.871 h_1 - 1.200P + 0.045R + 1093.661 \quad (6)$$

结合对比试验确定的干旱指数, 在出现干旱情况时可通过上述方程计算出将土壤湿度恢复到正常水平所需的灌溉量, 为把控灌溉时间与灌溉量提供了理论依据。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

本研究得到了土壤湿度作为因变量, 其他众多影响因素为自变量的回归方程, 观察方程可知:

(1) 土表温度( $t_1$ )、接近土表的温度( $t_2$ )及湿度( $h_1$ )对因变量土壤湿度( $H$ )有显著的相关性, 而对于深层土壤温度湿度, 由于存在滞后性, 并且随着水分渗透, 导致数据曲线趋于平滑, 对土壤湿度( $H$ )的影响变弱。

(2) 风速风向主要影响土壤湿度的均匀性, 并不影响单处传感器测得的土壤湿度数据( $H$ ), 所以风速、风向二者不作为公式中的自变量。

(3) 空气温度与湿度系数较小, 并且因为不满足显著性检验同样没有出现在公式中, 这是因为该葡萄园区所在地气候相对平稳, 降雨量少导致的。

### 3.2 结论

本研究建立了一种干旱监测与预警系统, 实现了监测、预警、实施灌溉等多种功能, 为农业生产带来便捷。主要取得了如下结果:

(1) 土壤湿度作为重要的干旱指标, 受众多因素的影响, 本研究提出了一种结合植物生长状况与土壤湿度的干旱指数制定方法, 适用于本区域, 为其他地区的干旱评估提供了一种思路。

(2) 运用数学统计方法对影响土壤湿度的众多因素进行逐步回归分析, 剔除不符合显著性检验的变量, 建立了葡萄园区干旱情况的监测模型, 并进行预测拟合, 最终确定的回归方程预测值和原始数据的误差较小, 回归方程的 R-square 高达 0.91, 可知模型的拟合效果较好。利用逐步回归方程推导出灌溉量的计算公式, 为作物种植者进行精准灌溉提供了指导。

本文的研究表明, 使用多元逐步回归分析法, 对土壤湿度进行预测是可行的, 对智慧农业的发展具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 中国气象局. 中国灾害性天气气候图集: 1961-2006[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 32-39.  
China Meteorological Administration. Atlas of disastrous weather and climate in China: 1961-2006[M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2007: 32-39.
- [2] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 371-378.  
ZOU X K, REN G Y, ZHANG Q. Droughts variations in china based on a compound index of meteorological drought[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 371-378.
- [3] 倪深海, 顾颖, 王会容. 中国农业干旱脆弱性分区研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 705-709.  
NI S H, GU Y, WANG H R. Study on frangibility zoning of agricultural drought in China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 705-709.
- [4] 黄会平. 1949-2007年我国干旱灾害特征及成因分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 659-665.  
HUANG H P. Analysis of the characteristics and causes of drought in China from 1949 to 2007[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 659-665.
- [5] 王鹤龄, 王润元, 张强, 等. 甘肃省旱作区越冬作物对气候暖干化的响应及其原因研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5):

- 1040-1045.
- WANG H L, WANG R Y, ZHANG Q, et al. Responses of winter crops to climate shifting to warm and dry and causes in dry-farming regions of Gansu Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1040-1045.
- [6] 邓振镛,王强,张强,等.甘肃黄土高原旱作区土壤贮水量对春小麦水分生产力的影响[J].*冰川冻土*,2011,33(2):425-430.
- DENG Z Y, WANG Q, ZHANG Q, et al. Impact of soil water storage capacity and water consumption on water productivity of spring wheat in the dry-farming area on the Loess Plateau of Gansu Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 425-430.
- [7] 李景保,代勇,尹辉,等.1950-2009年洞庭湖流域农业旱灾演变特征及趋势预测[J].*冰川冻土*,2011,33(6):1391-1398.
- LI J B, DAI Y, YIN H, et al. Agricultural drought in Dongting Lake Basin in recent 60 years: evolution characteristics and trend prediction[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1391-1398.
- [8] 范嘉智,谭诗琪,罗宇,等.湖南省最适干旱指数研究及近50年干旱演变分析[J].*江苏农业科学*,2019,47(15):291-295,306.
- FAN J Z, TAN S Q, LUO Y, et al. Study on optimum drought index and drought evolution in recent 50 years in Hunan Province [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(15): 291-295, 306.
- [9] 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.
- [10] 赵一磊,任福民,李栋梁,等.基于有效降水干旱指数的改进研究[J].*气象*,2013,39(5):600-607.
- ZHAO Y L, REN F M, LI D L, et al. Study on improvement of drought index based on effective precipitation[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(5): 600-607.
- [11] HAO C,ZHANG J H, YAO F M.Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015,35(Part B): 270-283.
- [12] ZHANG X, CHEN N C, LI J Z, et al.Multi-sensor integrated framework and index for agricultural drought monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017,188: 141-163.
- [13] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02405.
- [14] HAO Z C, AGHAKOUCHAK A. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 57: 12-18.
- [15] PALMER W C.Meteorological drought[M].Washington: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [16] LIU Y, ZHU Y, REN LL, et al.A multiscale palmer drought severity index[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(13): 6850-6858.
- [17] VICENTE-SERRANO S M,BEGUERA S, LPEZ-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.
- [18] 张强,韩兰英,王胜,等.影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征[J].*科学通报*,2018,63(23):2378-2392.
- ZHANG Q, HAN L Y, WANG S, et al. The affected characteristic of key period's climate factor on the agricultural disaster loss caused by drought in the south China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(23): 2378-2392.
- [19] ZHANG B Q, AGHAKOUCHAK A, YANG Y T, et al. A water-energy balance approach for multi-category drought assessment across globally diverse hydrological basins [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 247-265.
- [20] ZHANG B Q, ZHAO X N, JIN J M, et al. Development and evaluation of a physically based multiscale drought index: the standardized moisture anomaly index [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2015, 120(22): 11575-11588.
- [21] 郝增超,侯爱中,张璇,等.干旱监测与预报研究进展与展望[J].*水利水电技术*,2020,51(11):30-40.
- HAO Z C, HOU A Z, ZHANG X, et al. Research progresses and prospects of drought monitoring and prediction [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(11): 30-40.
- [22] 陈小军,李鹏飞,李萍,等.多元逐步回归分析法在煤层含气量预测中的应用[J].*煤炭工程*,2019,51(2):106-111.
- CHEN X J, LI P F, LI P, et al.Application of multiple stepwise regression analysis in prediction of coal seam gas content[J].*Coal Engineering*,2019,51(2):106-111.