

郑金丽, 严子奇, 周祖昊, 等. 基于综合干旱指数的鄱阳湖流域干旱时空分异特征研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(8): 91-100.

ZHENG Jinli, YAN Ziqi, ZHOU Zuhao, et al. Spatial and temporal differentiation of drought in Poyang Lake basin based on comprehensive drought index [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(8): 91-100.

基于综合干旱指数的鄱阳湖流域干旱 时空分异特征研究

郑金丽¹, 严子奇¹, 周祖昊¹, 王钦钊², 刘佳嘉¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 江西省水文局, 江西 南昌 330000)

摘要: 干旱指数适用性问题是当前干旱研究中的热点问题。本文基于标准化降水指数(SPI), 标准化降水蒸散指数(SPEI)和降水Z指数(CZI)等传统标准化干旱指数, 以线性组合方法构建综合气象干旱指数(linear combination synthesis drought index, LSDI), 提出混淆矩阵评价方法对所有气象干旱指数的适用性进行比选分析, 并在鄱阳湖流域加以应用。研究表明: (1) LSDI指数与标准化干旱指数的准确率和精度的季节性均值近似相等, 但LSDI指数召回率和综合评价指标F1-Score的季节性均值更高。LSDI指数能够像标准化干旱指数一样很好地捕捉到干旱事件, 同时具备三个标准化干旱指数表征干旱的优势, 对干旱事件识别的效果更好。(2) 鄱阳湖流域干旱强度未来趋势: 夏季和冬季表现为下降趋势, 干旱情况有所缓解, 春秋季表现为上升趋势, 干旱情况有所加重。(3) 鄱阳湖流域夏季和秋季干旱发生频率高, 频率范围在30%~40%。干旱发生频率呈现赣南较低, 赣北较高的空间分布形式。(4) 鄱阳湖流域易发生全域性和局域性干旱, 夏季和秋季干旱发生范围存在不显著上升趋势; 春季和冬季干旱发生范围存在不显著下降趋势。

关键词: 线性组合综合干旱指数(LSDI); 标准化干旱指数; 混淆矩阵; 干旱特征; 鄱阳湖流域

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.08.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2021)08-0091-10



与作者互动
听语音 聊科研

Spatial and temporal differentiation of drought in Poyang Lake basin based on comprehensive drought index

ZHENG Jinli¹, YAN Ziqi¹, ZHOU Zuhao¹, WANG Qinzha², LIU Jiajia¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hydrology Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330000, Jiangxi, China)

Abstract: The applicability of drought index is a hot issue in current drought research. Based on the traditional standardized

收稿日期: 2020-11-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402405); 江西省水利科技项目(202022ZDKT03, KT201501, KT201508); 国家自然科学基金(51779270); 水利前期计划项目“全国江河湖库旱限水位(流量)确定试点”(2019-000011-76-01-000983)

作者简介: 郑金丽(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源领域研究。E-mail: zhengjl_22@126.com

通信作者: 严子奇(1983—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水文及水资源领域研究。E-mail: yanzq@iwhr.com

drought indexes such as Standardized Precipitation Index (*SPI*), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (*SPEI*) and Precipitation Z Index (*CZI*), this paper uses a linear combination method to construct a comprehensive meteorological drought index (*LSDI*), and uses a confusion matrix evaluation method to evaluate the applicability of all meteorological drought indexes, which is applied in the Poyang Lake basin. The results show that: (1) The accuracy and precision of *LSDI* and the standardized drought index are approximately equal to the seasonal mean. However, the *LSDI* index recall rate and the comprehensive evaluation index *F1-Score* have a higher seasonal mean. *LSDI* index can capture drought events as well as the standardized drought indexes, and at the same time, it has the advantage of three standardized drought indexes to represent drought, so it has a better identification efficiency on drought events. (2) The future trend of drought intensity in Poyang Lake basin is downward in summer and winter, and the drought may be relieved to some extent. It will show an upward in spring and autumn, and the drought may be aggravated. (3) The drought frequency in Poyang Lake basin is high in summer and autumn, and the frequency ranges from 30% to 40%. The frequency of drought is lower in southern Jiangxi and higher in northern Jiangxi. (4) The drought range of Poyang Lake basin is prone to local and global drought. The drought range in summer and autumn is not significantly increased. The drought range in spring and winter is not significantly decreased.

Keywords: linear combination synthesis drought index (*LSDI*); standardized drought index; obfuscation matrix; drought characteristics; Poyang Lake basin

0 引言

干旱作为一种慢性自然灾害,具有出现频率高、持续时间长、波及范围广的特点。在全球气候变化背景下,干旱发生频次、波及范围和持续时间都有增加趋势,给全球农业、水资源、生态环境安全以及社会可持续发展造成巨大威胁。鄱阳湖是我国第一大淡水湖,鄱阳湖流域水文气象演变对长江中下游地区水资源情势有重要影响^[1-3]。近 50 年统计资料表明^[4],在鄱阳湖区干旱造成的受灾面积和受灾人口都明显多于水灾,旱灾的社会影响更大。因此,识别鄱阳湖流域干旱发生和发展规律对流域经济建设和社会稳定具有举足轻重的意义。

近年来针对鄱阳湖流域干旱的研究主要集中在季节性干旱、干旱特征分析、干旱时空分布等。鄱阳湖流域应用广泛的气象干旱指数有标准化降水指数 (*SPI*)^[5], 标准化降水蒸散指数 (*SPEI*)^[6], 降水 Z 指数 (*CZI*)^[7] 等。如洪兴骏等^[8-9] 分析了鄱阳湖流域 *SPI* 指数最适宜分布函数, 研究鄱阳湖流域干旱的时空演变, 结果表明鄱阳湖流域干旱具有明显季节性特征, 春季和秋季干旱化趋势明显。李斌等^[10] 分析 *SPEI* 在鄱阳湖流域的应用情况, 研究发现流域春季干旱明显剧烈增加, 秋季干旱呈现增加的趋势。闵岫等^[11] 采用 Z 指数分析鄱阳湖流域全年 12 个月的干旱气候特征, 发现鄱阳湖流域 7—12 月发生的干旱以偏旱为主, 1—6 月主要发生大旱和特旱。研究中不同干旱指数分析得到的干旱规律不相似, 存在流域干旱指数的适用性问题。已有研究如茅海祥^[12] 对淮河流域五种干旱指标从季节典型年份空间一致性、与大典

实况数据吻合率综合对比等方面进行分析。YAN 等^[13] 分析鄱阳湖流域三种标准化干旱指数 *SPI*、*SPEI* 和 *SPDI* 干旱发生频率的一致性。容锦盟等^[14] 分析了 4 种干旱指标在华北地区的适用性。以上方法虽然可用来分析干旱指数的适用性, 但是没有一个完整客观的方法进行定量分析。

针对干旱指数适用性问题的一个思路则是建立一套综合指数来综合各个指数的优势。线性组合是综合干旱指标发展的重要方法, 用于构建综合干旱指数, 其理论基础已经由 HAO 等^[15] 在美国加利福尼亚州得到应用。另一个解决思路是结合算法采用典型年资料比选适用的干旱指数。混淆矩阵是一种结合干旱指数识别结果与高精度的样本干旱典型年数据的典型方法, 它刻画了分类模型分类准确程度, 是判断分类好坏的方法, 常用于表征机器学习和遥感识别等方面分类结果与真实情况的差异^[16], 这些差异可以作为干旱指数识别干旱精度的度量。为此, 本文基于三种传统标准化干旱指数 (*SPI*、*SPEI*、*CZI*) 构建一种新的综合干旱指数 (*LSDI*), 提出混淆矩阵精度评价方法, 以优选的干旱指数分析揭示了鄱阳湖流域 1959—2018 年气象干旱时空分异特征, 为干旱指数的适用性评价研究提供参考。

1 研究区域及数据

1.1 研究区概况

鄱阳湖流域位于长江中下游, 流域面积约 16.23 万 km^2 , 处于江西省境内的流域面积占江西面积的 94% (见图 1)。鄱阳湖是中国最大的淡水湖, 是与长江相连的湖泊之一, 对长江中下游地区的水生态安全

意义重大。其入流主要由五大支流赣江、修水、抚河、信江和饶河构成,并在北面排入长江。近年来湖区及流域内干旱灾害频发,尤其是 2000 s, 干旱灾害频发使得鄱阳湖流域的生态环境和水资源管理得到更多的关注^[17]。

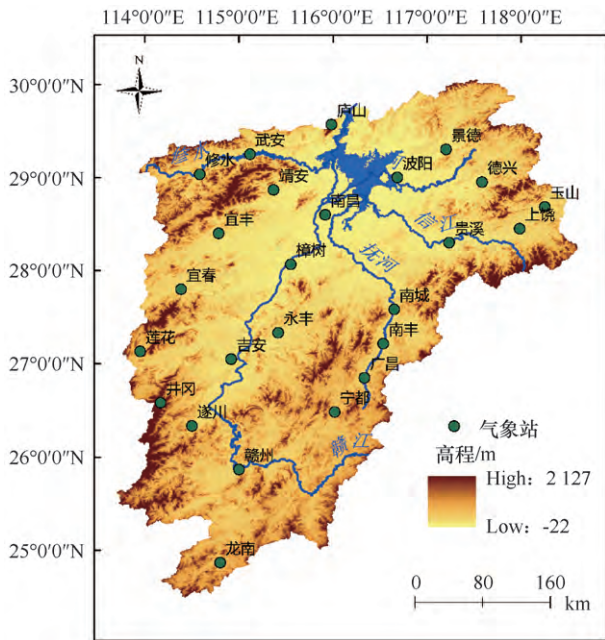


图 1 鄱阳湖流域地理位置及气象站点分布

Fig. 1 Geographical location and meteorological station distribution of Poyang Lake basin

1.2 数据来源

为了研究干旱特征,本文选取鄱阳湖流域 1959—2018 年 25 个气象站点的气象数据,数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)。鄱阳湖流域 1959—1990 年实际发生干旱统计资料摘自《中国气象灾害大典》(江西卷)^[18],实际干旱数据用于干旱指数适用性评价的分析(见表 1)。研究中定义春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—次年 2 月)。对于标准化降水蒸散指数 $SPEI$ 中潜在蒸散发计算,本文主要参考 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》推荐的 Thornthwaite 方程来计算潜在蒸散发,该方法的优点是考虑了温度的变化,能较好地反映地表潜在蒸散。近几年大量应用研究表明,Thornthwaite 方法在表征中国气象干旱方面效果显著,所以本文依然沿用该方法计算潜在蒸散量^[19-20]。

2 研究方法

2.1 传统标准化干旱指数

本文选取了标准化降水指数(SPI)、标准化降

表 1 鄱阳湖流域 1959—1990 年实际发生干旱统计资料

Table 1 Statistics on actual drought in Poyang Lake basin from 1959 to 1990

季节	干旱年份
春季	1962、1963、1968、1971、1972、1974、1977、1978、1985、1988、1990
夏季	1960、1961、1963、1965、1966、1971、1972、1978、1979、1981、1982、1984、1985、1986、1987、1990
秋季	1963、1964、1966、1967、1974、1976、1978、1979、1986
冬季	1962、1964、1971、1979、1988

水蒸散指数($SPEI$)和降水 Z 指数(CZI)^[5-7]等标准化干旱指数。这些标准化干旱指数通常是假设变量服从确定的分布,而后将其正态标准化转换为高斯变量,以便于统计模型的应用。具体地, SPI 、 $SPEI$ 和 CZI 分别假定服从伽马分布、三参数 log-logistic 分布、Person III 型分布,其计算原理如表 2 所列。

2.2 基于 $LSDI$ 的鄱阳湖流域综合干旱指数

2.2.1 线性组合综合干旱指数($LSDI$)

本文基于常用的标准化气象干旱指数 SPI 、 $SPEI$ 和 CZI 通过线性组合的方式构建新的综合气象干旱指标。因为每个标准化干旱指数是标准正态随机变量,因此这些概率分布可以进行组合优化。根据多元正态分布的基础理论^[21],假设标准化干旱指数的联合分布是一个多元正态分布,基于此假设标准化干旱指数的线性组合也是正态分布。公式可表示为

$$LSDI = \alpha_1 SPI + \alpha_2 SPEI + \alpha_3 CZI \quad (1)$$

式中, $\alpha^T = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]$ 是线性组合的权重。依据多元正态分布的基础理论^[21],可推导出 $LSDI$ 的均值和协方差矩阵分别为

$$u_{LSDI} = \alpha_1 u_{SPI} + \alpha_2 u_{SPEI} + \alpha_3 u_{CZI}, \sigma_{LSDI}^2 = \alpha^T \sum_{LSDI} \alpha \quad (2)$$

$$\sum_{LSDI} = \begin{pmatrix} cov(SPI, SPI) & cov(SPI, SPEI) & cov(SPI, CZI) \\ cov(SPEI, SPI) & cov(SPEI, SPEI) & cov(SPEI, CZI) \\ cov(CZI, SPI) & cov(CZI, SPEI) & cov(CZI, CZI) \end{pmatrix} \quad (3)$$

可以得到 $LSDI$ 的分布函数

$$LSDI \sim N(u_{LSDI}, \alpha^T \sum_{LSDI} \alpha) \quad (4)$$

式中, u_{LSDI} 是 $LSDI$ 的均值; u_{SPI} 、 u_{SPEI} 、 u_{CZI} 分别是 SPI 、 $SPEI$ 和 CZI 的均值。 α 是与不同标准化干旱指数相关的权重,可以通过经验确定或通过优化方法确定^[21-22]。本文参考 MO 和 LETTENMAIER^[23]及 HAO 等^[15]的研究,初步对均 SPI 、 $SPEI$ 、 CZI 指数进行综合,通过线性组合得到的 $LSDI$ 指数与单个标准化干旱指数存在差异,前者服从普通正态分布,后者服从标准正态分布。相比之下, $LSDI$ 指数的优越

表 2 传统标准化干旱指数原理

Table 2 Principle of traditional standardized drought index

干旱指数	服从分布	公式	备注
SPI	Gamma 分布	$g(x) = \frac{1}{b^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{b}}, \quad x > 0$ $G(x) = \frac{1}{b^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{b}} dt, \quad x > 0$ $H(x) = q + (1 - q) G(x)$ $SPI = \phi^{-1}H$	降水量: x 概率密度函数: $g(x)$ 累积分布函数: $G(x)$
SPEI	log-logistic 概率分布	$PET = 16.0 \times \left(\frac{10T_i}{H}\right)^A$ $H = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$ $A = 6.75 \times 10^{-1}H^3 - 7.71 \times 10^{-5}H^2 + 1.792 \times 10^{-2}H + 0.49$	潜在蒸散发: PET 其余计算过程如同 SPI 方法, 对 D_i 数据序列进行正态化处理, 计算每个数值对应的 SPEI 值。
CZI	Person III 型分布	$Z_i = \frac{6}{C_s} \left \frac{C_s}{2} \phi_i + 1 \right ^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6}$ $C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})}{n\delta^3}, \quad \phi_i = \frac{X_i - \bar{X}}{\delta}$ $\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$	偏态系数: C_s 标准变量: ϕ_i 序列均方差: δ

性在于对标准化干旱指数结果的加权调和, 并且服从的分布更接近于真实情况。

2.2.2 干旱强度分级

采用美国干旱监测(USDMD)推荐的百分比分类方法对 LSDI 干旱指数进行干旱强度等级的划分(见表 3)。具体而言, 对于标准化干旱指数, 这些百分位数对应于阈值 $T = [-0.5, -0.8, -1.3, -1.6$ 和 $-2]$ ^[24]。

表 3 LSDI 干旱强度分级

Table 3 Drought intensity classification of LSDI index

分类	等级	百分位
D0	轻度干旱	20%~30%
D1	中度干旱	10%~20%
D2	重度干旱	5%~10%
D3	极度干旱	2%~5%
D4	异常干旱	<2%

由于 LSDI 与标准化干旱指数服从的分布存在差异, 导致两者指定的百分位 P_0 对应的阈值不同。对于百分位 P_0 , 取公式(4)正态分布的逆函数进行分位数变化, 得到 LSDI 不同干旱强度分级百分位数对应的阈值为

$$Z_{0LSDI} = N^{-1}(P_0, u_{LSDI}, \sigma_{LSDI}^2) \quad (5)$$

2.2.3 干旱频率

干旱频率表示不同干旱等级发生的年数与总年数的百分比, 计算公式为

$$P_i = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (6)$$

式中, n 为站点发生干旱的年数; N 为降水资料年数; i 为某站点。

2.2.4 干旱范围

本文用干旱站次比表示干旱范围, 干旱站次比是区域内干旱发生站数与站点总数的百分比, 计算公式为

$$R_j = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (7)$$

式中, m 为发生干旱的站点数; M 为总站点数; j 为某年份。干旱影响范围划分如表 4 所列。

表 4 干旱影响范围划分

Table 4 Classification of drought influence area

分类	等级	干旱站次比
P0	无干旱	<10%
P1	局域性干旱	10%~25%
P2	部分区域性干旱	25%~33%
P3	区域性干旱	33%~50%
P4	全域性干旱	≥50%

2.3 基于混淆矩阵的干旱指数评价体系

干旱指数是研究干旱的基础。从宏观上可认为, 在仅考虑是否发生干旱的前提下, 只有干旱和非干旱两种情况发生, 因此干旱指数属于常见的分类模型。已有研究成果表明, 混淆矩阵可以用来分析这些分类

结果并描述专题分类精度^[25-27], 目前常用的定量核心评价指数有准确率和针对不平衡数据的精度、召回率及综合评价指标 $F1-Score$ 。干旱指数作为统计意义上的分类模型, 可采用以上方法对其适用性进行定量评价。

混淆矩阵是定量衡量模型结果的指标^[28], 其主要用于比较分类结果和实例的真实信息, 矩阵中主要包含了四个区域, 分别代表了真正例(TP)、假正例(FP)、假负例(FN)、真负例(TN)四个值(见表5)。

表5 混淆矩阵
Table 5 Confusion matrix

		实际发生干旱	
		干旱	非干旱
干旱指数预测干旱	干旱	TP	FP
	非干旱	FN	TN

$F1-Score$ 表示干旱指数对干旱事件的识别效果。 $F1-Score$ 是精度和召回率的调和平均值, 综合考虑精度和召回率所代表的两种情况, $F1-Score$ 越高, 则说明结果的质量越好。相应计算公式为

$$F1-Score = 2 \times \frac{Pr \times Re}{Pr + Re} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9)$$

$$Re = \frac{TP}{TP + FN} \quad (10)$$

式中, Pr 表示精度; Re 表示召回率。精度表示干旱指数预测结果中干旱事件的正确率, 召回率表示实际发生的干旱事件被指数识别正确的比例。

准确率指干旱指数识别干旱与非干旱事件的正确率, 是最常用的评价结果质量的指标。计算公式为

$$Ac = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (11)$$

2.4 时空演变特征分析

采用 Mann-kendall 法与极差重标法(R/S)结合的综合趋势分析法分析气象干旱指数的趋势和持续性^[29-30]。用 Mann-kendall 法^[31]分析时间序列的趋势, 计算统计特征值 U , 从而能判断序列的趋势特征: 特征值 $U > 0$ 时, 表明有上升趋势, 反之表明有下降趋势; 当 $|U| > U_{0.05/2} = 1.96$, 表明序列趋势变化显著。

用 R/S 法^[32] 求出 Hurst 指数(H), 用以指出序列的持续性或者反持续性特征。如果 $H > 0.5$ 时, 即具有持续性, 表明未

来变化趋势与过去趋势相同; 反之表明未来变化趋势与序列过去趋势相反。

表6 Mann-kendall 与 R/S 综合趋势法
Table 6 Mann-kendall and R/S combined trend method

	$U > 0$	$U < 0$
$H > 0.5$	上升趋势	下降趋势
$H < 0.5$	下降趋势	上升趋势

3 结果与分析

3.1 线性组合综合干旱指数适用性评价

大量研究学者发现, SPI 、 $SPEI$ 和 CZI 对气象干旱监测比较合适的尺度是 3 个月和 12 个月。因此本文选择 3 个月时间尺度的 SPI 、 $SPEI$ 和 CZI 进行线性组合, 采用第 2.3 节中的精度评价指标对 SPI 、 $SPEI$ 、 CZI 及 $LSDI$ 进行综合比选。

3.1.1 干旱指数综合评价分析

鄱阳湖流域季节性干旱中除春季 $LSDI$ 的 $F1-Score$ 偏低外, 其余季节 $LSDI$ 的 $F1-Score$ 均为最高(见图2)。此外, $LSDI$ 的 $F1-Score$ 季节性均值最高, 达 56%, 标准化干旱指数季节性均值都低于 50%, 说明 $LSDI$ 比标准化干旱指数能反应更多的干旱信息。尤其是夏季和秋季 $LSDI$ 的 $F1-Score$ 值都在 60% 以上, 明显高于标准化干旱指数, 反映出 $LSDI$ 对鄱阳湖流域伏旱和秋旱的监测效果更好。而已有研究表明夏季和秋季是鄱阳湖流域干旱频发的季节, 因此认为 $LSDI$ 能更好的监测流域干旱情况^[8-12]。

进一步分析精度和召回率发现(见表7), $LSDI$ 的精度季节性均值与标准化干旱指数的差别不大。但是 $LSDI$ 的召回率明显高于其他指数, 这说明 $LSDI$ 捕捉到的干旱事件与实际发生的干旱事件吻合率更高。

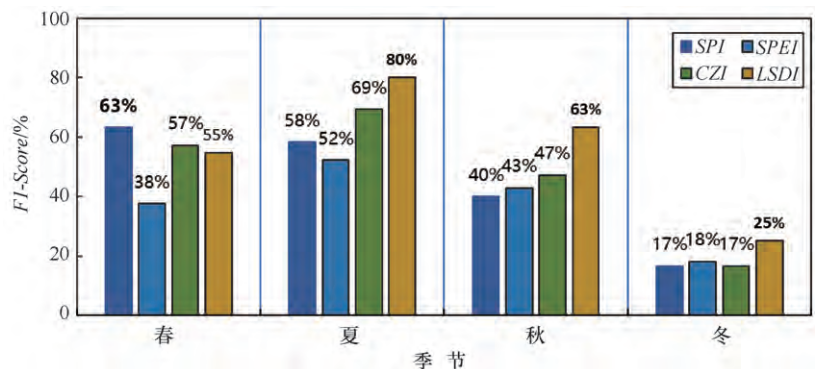


图2 不同干旱指数预测结果综合评价

Fig. 2 Comprehensive evaluation of forecast results of different drought indexes

表 7 1959—1990 年鄱阳湖流域干旱指数精度和召回率

Table 7 Drought index percision and recall rate of Poyang Lake basin from 1959 to 1990

季节	精 度 / %				召回率 / %			
	SPI	SPEI	CZI	LSDI	SPI	SPEI	CZI	LSDI
春	75	60	60	55	55	27	55	55
夏	88	86	90	86	44	38	56	75
秋	50	60	50	60	33	33	44	67
冬	14	17	14	18	20	20	20	40
均 值	57	56	54	55	38	30	44	59

3.1.2 干旱指数准确率分析

鄱阳湖流域所有干旱指数准确率都在 63%~81% 之间, 季节性干旱识别结果的准确率均在 60% 以上。干旱指数识别的准确率季节性均值在 70%~73% 之间, 这说明标准化干旱指数与 LSDI 对流域干旱和非干旱事件的识别效果很好, 而且两者之间没有明显差异(见表 8)。

表 8 1959—1990 年鄱阳湖流域干旱指数准确率

Table 8 Accuracy of drought indexes in Poyang Lake basin from 1959 to 1990

季 节	指 标			
	SPI	SPEI	CZI	LSDI
春	78%	69%	72%	69%
夏	69%	66%	75%	81%
秋	72%	75%	72%	78%
冬	69%	72%	69%	63%
均 值	72%	70%	72%	73%

3.2 基于 LSDI 的鄱阳湖流域气象干旱特征时空演变

干旱指数适用性评价结果表明在鄱阳湖流域, LSDI 捕捉气象干旱事件的效果更好, 因此本研究采用 LSDI 指数分析鄱阳湖流域的气象干旱演变特征。

3.2.1 气象干旱强度变化趋势

(1) 气象干旱强度过去趋势分析。图 3 为鄱阳湖流域时程上干旱季节变化特征。可以看出, 不同时期鄱阳湖流域干旱化程度差异明显, 呈现交替变化, 1960—1990 年期间, 流域不同季节 LSDI 多小于 0(红色渲染多), 渲染多呈现纵向条状, 而 1990—2000 年期间, 流域不同季节 LSDI 多大于 0(蓝色渲染多), 这说明随着时间的推移鄱阳湖流域气象干旱发生呈周期性变化, 同时易发生季节连旱现象。结合 Mann-kendall 趋势检验结果可知(见表 9), 在 1959—2018 年期间, 鄱阳湖流域干旱强度在春季、夏季和秋季均存在不显著上升趋势, 冬季存在不显著下降趋势。

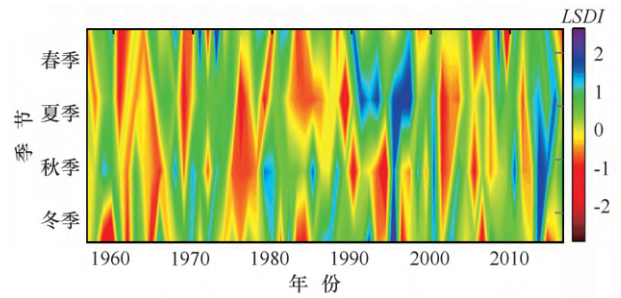


图 3 鄱阳湖流域年和季节尺度 LSDI 指数趋势变化

Fig. 3 Changes of annual and seasonal LSDI index in Poyang Lake basin

(2) 气象干旱强度未来趋势分析。结合鄱阳湖流域气象干旱过去趋势变化, 进一步分析鄱阳湖流域气象干旱强度的未来趋势变化。由表 9 可见, 春季和秋季未来表现依然为上升趋势、冬季未来表现依然为下降趋势。与之相对的, 夏季存在较弱的反持续性, 也就是未来呈现下降趋势。干旱强度上升表明越偏向于干旱。也就是说, 鄱阳湖流域夏季和冬季流域的气象干旱情况有所缓解。春秋季气象干旱情况会加重, 而 9、10 月则是晚稻和棉花的重要生长期^[33], 一旦这种趋势成为现实, 将加剧鄱阳湖流域的农业干旱问题。

表 9 鄱阳湖流域气象干旱强度过去趋势及未来趋势结果

Table 9 Past and future trends of meteorological drought intensity in Poyang Lake basin

时间尺度	特征值 U	赫斯特指数 H	过去趋势	持续性及未来趋势
春季	0.23	0.58	不显著上升趋势	具有持续性, 上升趋势
夏季	0.10	0.47	不显著上升趋势	具有反持续性, 下降趋势
秋季	0.27	0.65	不显著上升趋势	具有持续性, 上升趋势
冬季	-1.12	0.81	不显著下降趋势	具有持续性, 下降趋势

3.2.2 气象干旱发生频率

图 4 表明鄱阳湖流域在 1959—2018 年间共发生了 229 个月份的气象干旱。鄱阳湖流域干旱发生频率以轻度干旱和中度干旱为主, 2000 s 干旱的发生频率最高, 1980 s 和 1990 s 干旱发生频率最低。从季节角度看, 气象干旱发生频率最高的是夏季和秋季, 其次是春季和冬季, 与鄱阳湖流域干旱多发生于夏、秋季, 春旱和冬旱发生较少的实况相符合^[19]。

图 5(a) —图 5(d) 表示鄱阳湖流域不同季节干旱发生频率的空间分布, 可以看出季节性干旱发生频率在空间分布上存在差异, 夏季和秋季大部分地区干旱发生频率较高, 春季和冬季只有局部地区干旱发生频率高, 整个流域的干旱发生频率在 20%~40% 之间。

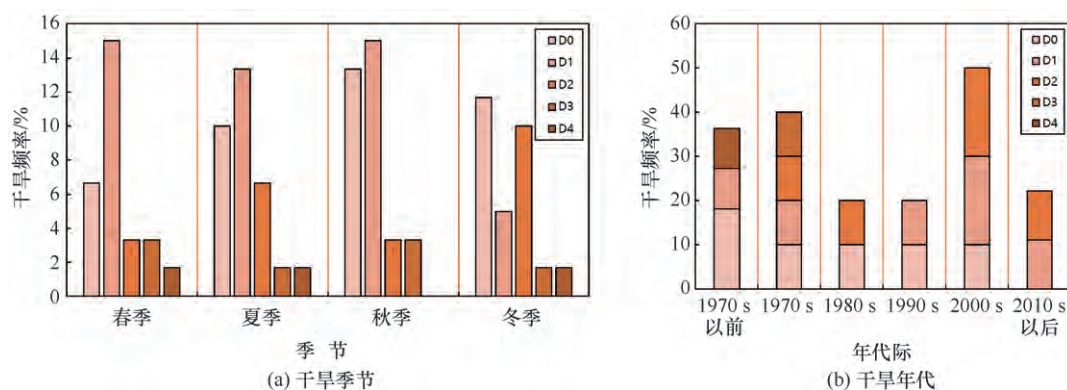


图 4 鄱阳湖流域 1959—2018 年干旱发生频率

Fig. 4 Frequency of drought in Poyang Lake basin from 1959 to 2018

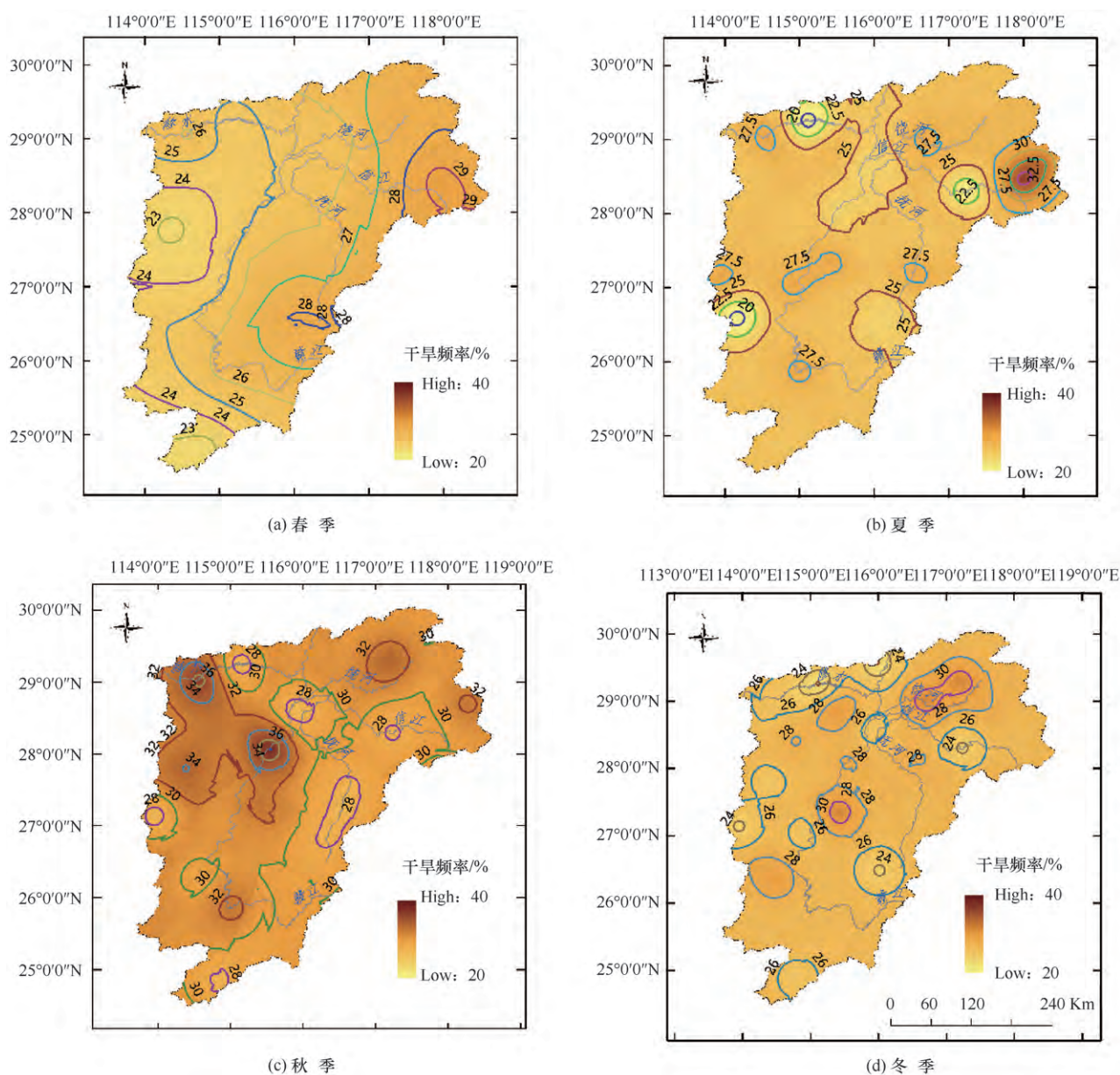


图 5 鄱阳湖流域 1959—2018 年干旱频率的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of drought frequency in Poyang Lake basin from 1959 to 2018

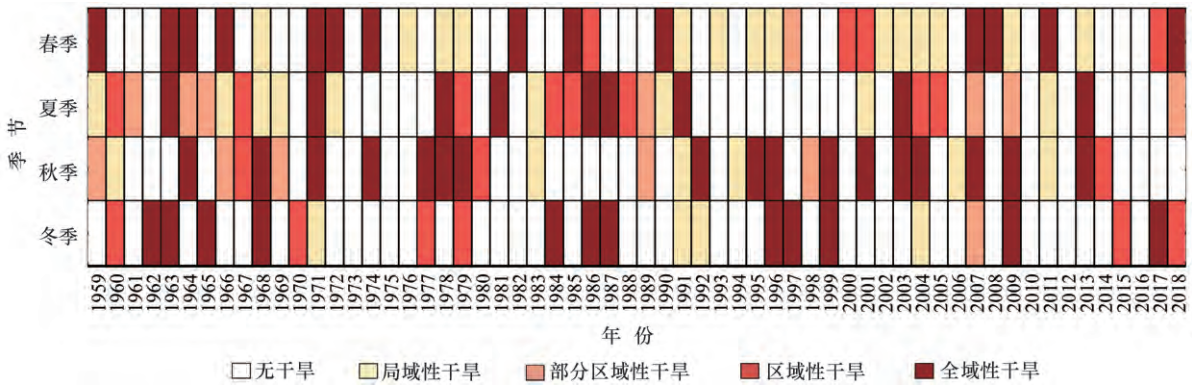


图 6 1959—2018 年鄱阳湖流域干旱范围变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of drought range in Poyang Lake basin from 1959 to 2018

季节性干旱在赣南地区的发生频率低, 干旱频率最高发生在秋季。赣北地区季节性干旱发生频率普遍偏高, 在湖区附近、信江下游等区域干旱发生频率高, 在 30% 以上。上述干旱频率的空间分布情况, 与以往关于鄱阳湖流域气象干旱演变特征的研究能够互相印证^[8-11]。

3.2.3 气象干旱范围

图 6 显示了鄱阳湖流域近 60 年干旱范围变化特征。统计结果表明, 鄱阳湖流域易发生全域性和局域性干旱, 其中四个季节中全域性干旱和局域性干旱事件发生年数春季最多 28 a, 其次是秋季发生 23 a、夏季发生 18 a、冬季发生 16 a。具体而言, 秋季全域性干旱事件发生年数最多, 集中发生在 1960—1980 年和 1990—2010 年期间, 呈周期性交替变化; 春季局域性干旱事件发生年数最多, 集中发生在 1990—2010 年期间, 连续干旱发生的频率较高。进一步采用 Mann-Kendall 法对各季节干旱发生范围进行趋势分析, 发现夏季和秋季干旱发生范围序列的特征值分别为 0.1 和 0.4, 说明夏季和秋季干旱发生范围存在不显著上升趋势; 春季和冬季干旱发生范围序列的特征值分别为 -0.6 和 -0.8, 说明春季和冬季干旱发生范围存在不显著下降趋势。

4 结 论

(1) 与标准化干旱指数的多个适用性评价指标相比, *LSDI* 指数评价指标的季节性均值都高于标准化干旱指数, 其能够像标准化干旱指数一样很好地捕捉到干旱事件, 说明 *LSDI* 能够综合三个标准化干旱指数的优点, 对干旱事件识别的效果更好。

(2) 从干旱强度上看, 基于 *LSDI* 指数的鄱阳湖流域季节性干旱呈周期性变化, 易发生季节连旱现象。鄱阳湖流域未来气象干旱在夏季和冬季有所缓

解, 春季和秋季干旱情况加重, 因此需要提前采取相应措施以缓解对农业的影响。

(3) 从干旱频率上看, 基于 *LSDI* 指数的鄱阳湖流域夏季和秋季气象干旱发生频率高, 干旱发生频率在空间上基本呈现北高南低的分布形式。流域发生季节性干旱的可能性较大, 干旱事件的发生趋于常态化。

(4) 从干旱范围上看, 基于 *LSDI* 指数的鄱阳湖流域易发生全域性和局域性干旱, 其中秋季全域性干旱事件发生年数最多, 春季局域性干旱事件发生年数最多, 整体上呈周期性变化。

参考文献(References):

- [1] ZHANG D, CHEN P, ZHANG Q, et al. Copula-based probability of concurrent hydrological drought in the Poyang lake-catchment-river system (China) from 1960 to 2013 [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 773-784.
- [2] ZHANG Z, CHEN X, XU C Y, et al. Examining the influence of river-lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522: 510-521.
- [3] 郭华, 张奇. 近 50 年来长江与鄱阳湖水文相互作用的变化 [J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 609-618.
GUO Hua, ZHANG Qi. Changes of the hydrological interaction between The Yangtze River and Poyang Lake in the past 50 years [J]. *Journal of Geographical*, 2011, 66(5): 609-618.
- [4] 闵骞. 平原湖区也须重视防旱——以鄱阳湖区为例 [J]. *中国减灾*, 2003 (3): 39-41.
MIN Qian. Drought prevention in plain lakes: a case study of Poyang Lake [J]. *Chinese Journal of Disaster Mitigation*, 2003 (3): 39-41.
- [5] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [J]. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 1993, 17(22): 179-183.
- [6] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized

- precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [7] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 523-529.
YUAN W P, ZHOU G S. Comparative analysis of the application of standardized precipitation index and Z index in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(4): 523-529.
- [8] 洪兴骏, 郭生练, 马鸿旭. 基于 SPI 的鄱阳湖流域干旱时空演变特征及其与湖水位相关分析 [J]. *水文*, 2014, 34(2): 25-31.
HONG Xingjun, GUO Shenglian, MA Hongxu. Spatial and temporal evolution of drought in Poyang Lake basin based on SPI and its correlation analysis with lake level [J]. *Hydrology*, 2014, 34(2): 25-31.
- [9] 洪兴骏, 郭生练, 周研来. 标准化降水指数 SPI 分布函数的适用性研究 [J]. *水资源研究*, 2013, 2: 33.
HONG X J, GUO S L, Zhou Y L. Applicability of SPI distribution function of standardized precipitation index [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2: 33.
- [10] 李斌, 李洁. 基于 SPEI 的鄱阳湖流域旱涝特征分析 [J]. *水资源研究*, 2016, 5(5): 488-494.
LI Bin, LI Jie. Analysis of drought and flood characteristics of Poyang Lake basin based on SPEI [J]. *Water Resources Research*, 2016, 5(5): 488-494.
- [11] 闵岫, 严蜜, 刘健. 鄱阳湖流域干旱气候特征研究 [J]. *湖泊科学*, 2013, 25(1): 65-72.
MIN Shen, YAN Mi, LIU Jian. Study on arid climate characteristics in Poyang Lake basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(1): 65-72.
- [12] 茅海祥. 五种干旱指数在淮河流域的适用性研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
MAO Haixiang. Applicability of five drought indexes in The Huaihe River basin [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Technology, 2012.
- [13] YAN G, WU Z, LI D, et al. A comparative frequency analysis of three standardized drought indices in the Poyang Lake basin, China [J]. *Natural Hazards*, 2018, 91(1): 353-374.
- [14] 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(1): 37.
RONG Jinmeng, ZHOU Dan, LUO Jing, et al. Applicability of four drought indicators in meteorological drought monitoring in North China [J]. *Agricultural Research in Arid Regions*, 2019(1): 37.
- [15] HAO Z, HAO F, SINGH V P, et al. A theoretical drought classification method for the multivariate drought index based on distribution properties of standardized drought indices [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 92: 240-247.
- [16] 李宜展, 潘耀忠, 朱秀芳等. 土地覆盖类别面积混淆矩阵校正与回归遥感估算方法对比 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(11): 115-123+295.
LI Yizhan, PAN Yaozhong, ZHU Xiufang, et al. Comparison of land cover category area confusion matrix correction and regression remote sensing estimation method [J]. *Chinese Journal of Agricultural Engineering*, 2013, 29(11): 115-123+295.
- [17] 刘剑宇, 张强, 邓晓宇等. 气候变化和人类活动对鄱阳湖流域径流过程影响的定量分析 [J]. *湖泊科学*, 2016, 28(2): 432-443.
LIU Jianyu, ZHANG Qiang, DENG Xiaoyu, et al. Quantitative analysis of impacts of climate change and human activities on runoff processes in Poyang Lake basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(2): 432-443.
- [18] 陈双溪. 中国气象灾害大典. 江西卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
CHEN Shuangxi. China meteorological disasters canon. Jiangxi volume [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2006.
- [19] THORNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate [J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94.
- [20] 尹文杰, 张梦琳, 胡立堂. 柴达木盆地干旱时空变化特征 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 387-394.
YIN W J, ZHANG M L, HU L T. Spatial and temporal variation characteristics of drought in Qaidam basin [J]. *Arid Region Research*, 2018, 35(2): 387-394.
- [21] TONG Y L. The multivariate normal distribution [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [22] HAO Z, SINGH V P. Drought characterization from a multivariate perspective: A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 668-678.
- [23] MO K C, LETTENMAIER D P. Objective drought classification using multiple land surface models [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15(3): 990-1010.
- [24] SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, et al. The drought monitor [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1181-1190.
- [25] CONGALTON R G, GREEN K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices [M]. Florida: CRC press, 2019.
- [26] STRAHLER A H, BOSCHETTI L, FOODY G M, et al. Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps [J]. *European Communities, Luxembourg*, 2006, 51(4): 1-43.
- [27] 易俐娜. 面向对象遥感影像分类不确定性分析 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
YI Lina. Uncertainty analysis of object-oriented remote sensing image classification [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.
- [28] 张安定. 遥感原理与应用题解 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHANG Anding. Remote sensing principle and application problem solving [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [29] 于延胜, 陈兴伟. R/S 和 Mann-Kendall 法综合分析水文时间序列未来的趋势特征 [J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(3): 41-44.

- YU Yansheng, CHEN Xingwei. Comprehensive analysis of future trend characteristics of hydrological time series by R/S and Mann-Kendall method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(3): 41-44.
- [30] 张迎,黄生志,黄强. 基于 Copula 函数的新型综合干旱指数构建与应用[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 703-714.
- ZHANG Ying, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 703-714.
- [31] 覃基爱,陈雪英,郑艳霞. 宜昌径流时间序列的统计分析[J]. 水文, 1993, 13(5): 15-21.
- TAN Jiai, CHEN Xueying, ZHENG Yanxia. Statistical analysis of runoff time series in Yichang [J]. Hydrology, 1993, 13(5): 15-21.
- [32] 法尔科内. 分形几何数学基础及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- FALCONER. Foundation of fractal geometry and its application [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2007.
- [33] 沈文清,鄢帮有,谢冬明. 干旱灾害对江西省农业生产的影响及其对策[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(7): 905-910.
- SHEN Wenqing, YAN Bangyou, XIE Dongming. Effects of drought on agricultural production in Jiangxi Province and its countermeasures [J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2012, 21(7): 905-910.

(责任编辑 康健)