

方国华, 颜敏, 闻昕, 等. 自适应尺度干旱评价模型研究——以淮河流域为例[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 31–37.
[FANG Guohua, YAN Min, WEN Xin, et al. Study on adaptive variable scale drought evaluation model[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 31–37. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.02.008.]

自适应尺度干旱评价模型研究

——以淮河流域为例*

方国华¹, 颜敏¹, 闻昕^{1,2*}, 林榕杰¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 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)

摘要: 该文建立了自适应尺度干旱评价模型, 解决了定尺度评价中的干旱过程割裂和强度低估等问题, 并实现不同历时干旱事件的评估和对比。首先, 构造自适应模糊标准矩阵, 采用模糊评价方法进行定尺度下的干旱评价, 并基于对立统一定理进行干旱的识别, 在此基础上, 对识别的干旱过程进行回归分析和频率分析, 从而建立自适应尺度干旱评价模型。以淮河流域为例, 首先构建自适应矩阵进行干旱的模糊评价, 结果表明淮河流域55年来总体处于干旱且有着明显加强的趋势, 其中‘王蚌区间北岸’的西北部和‘湖西区’的西北部干旱较强。其次通过干旱识别发现淮河流域干旱历时和干旱强度具有较强的相关性且满足自东南向西北逐渐增强的规律。最后建立不同分区下干旱历时和干旱强度间的关系以及判断标准, 构建淮河流域自适应尺度干旱评价模型。

关键词: 干旱评价模型; 变尺度; 自适应; 回归分析; 频率分析; 淮河流域

中图分类号: X43; S423 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2018)02–0031–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.02.008

干旱是一种水分持续性短缺的自然现象^[1–2], 其持续时间长、影响范围广、破坏强度大, 是目前主要的气象灾害之一。科学地进行干旱评价能够反映干旱的形成机理, 解析干旱的时空变化规律, 对流域的抗旱减灾具有重要的指导意义。

干旱评价是干旱研究的基础^[3–4], 国内外众多学者对干旱评价展开了一系列的研究。McKee^[5]等通过对降水分布规律的研究, 提出了标准化降水指数(SPI); Palmer^[6]考虑降水、径流、蒸发等因素, 引入气候适宜降水量, 同时考虑前期降水影响, 建立了一套评估干旱的方法。翟家齐^[7]等构建了一个新的水文干旱评估指标——标准水资源指数(SWRI), 并以海河北系为例, 定量识别了1956–2009年间的水文干旱事件。在已有干旱指标的基础上, 周玉良^[8]等基于帕尔默旱度模式识别了昆明站干旱过程。刘可晶^[9]等利用淮河流域28个国家基本气象站建站以来至2011年间的月值地面气象观测数据, 对不同时间尺度(1月、3月、12月)的标准化降水指数SPI进行特征分析。上述的干旱评价模型给出了不同定义下的干旱量化方法, 同时也针对不同研究区域进行了适用性分析。

目前的干旱评价模型大多是基于某一固定的

时间尺度(年、月或旬), 固定的研究尺度与干旱发生的实际过程可能并不完全匹配, 致使一场完整的干旱事件在评价中被按月或旬进行割裂。并且, 以月尺度为例, 定尺度模型无法准确评价一个半月等非整月的干旱过程, 可能造成干旱强度评价结果的低估或高估, 影响了干旱评估的准确性和可靠性。第三, 对于评估和对比不同历时的干旱事件, 也是干旱评价中亟待解决的问题。

为此, 本文在利用固定尺度模型识别干旱过程的基础上, 通过回归分析和频率分析, 建立自适应尺度的干旱评价模型。一方面在干旱评价过程中考虑区域的时空差异性, 构造自适应矩阵, 增强模型的适用性; 另一方面通过干旱强度与干旱历时构造干旱程度指标, 建立变尺度干旱评价模型, 解决干旱评价中的变尺度问题。

1 研究方法

1.1 自适应模糊标准矩阵构造

不同地区不同时刻的干旱识别标准是不一致的, 枯水期的识别标准和丰水期的识别标准会有

* 收稿日期: 2017–08–10 修回日期: 2017–09–29

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFC0405900); 国家自然科学基金(51609061); 江苏高校优势学科建设工程资助项目
第一作者简介: 方国华(1964–), 女, 安徽定远人, 教授, 主要研究方向为水资源规划及利用、水利经济和工程管理。

E-mail: hhufgh@163.com

通讯作者: 闻昕(1987–), 男, 江苏南京人, 讲师, 主要研究方向为变化环境下水资源系统演变与调控。

E-mail: njwenxin@163.com

很大差异,如果采用单一的模糊标准矩阵,会造成识别的干旱具有较大的误差。已有的研究^[10]是基于气象等级^[11]提出的单一模糊标准矩阵,且时间尺度是以年为单位的,这虽然可以规避干旱识别标准年内不同的问题,但没有考虑地域的差异性,而且年尺度会极大程度割裂干旱过程,对于发生的冬春连旱无法有效识别。

基于以上分析,本文以月为时间尺度。选择月平均降水距平百分率和月连续无雨日数两个指标,构造月尺度下的自适应模糊标准矩阵 M^i 。

$$A^i = [\min p_i \quad \max q_i]^T, A_c^i = [\max p_i \quad \min q_i]^T; \\ M^i = [A^i \quad A_c^i], i=1, 2, 3, \dots, 12. \quad (1)$$

式中: $\min p_i, \max q_i$ 分别代表长序列中第 i 月的月降水距平百分率最小值和月连续无雨日数最大值。 A^i, A_c^i 分别表示是第 i 个月的干旱点和非干旱点, M^i 是第 i 个月的自适应模糊标准矩阵。

1.2 模糊评价

干旱与非干旱的界定是模糊的,存在阈值的选择问题。模糊评价方法^[12-15]由于其物理意义明确,在评价模型中广泛应用。干旱的模糊评价方法是通过对干旱点的综合相对隶属度来表征干旱的水平,隶属度大则靠近干旱点,干旱水平高,隶属度小则远离干旱点,干旱水平低。

1.3 干旱识别

根据对立统一定理^[15],存在某一点 Q 对于干旱点 A 和非干旱点 A_c 的相对隶属度相等,均为 0.5, Q 点前后,对干旱的相对隶属度 $\mu_A(t)$ 和对非干旱的相对隶属度 $\mu_{A_c}(u)$ 两者关系发生了变化,则点 Q 可以看作是干旱与非干旱的过渡阶段。

故以对干旱的综合相对隶属度 $X_0 = 0.5$ 为截断水平,对相对隶属度序列进行截取。游程指标如图 1 所示,当 X_i 在一个或多个时段内连续大于 X_0 时,出现正游程;反之出现负游程。正游程的长度称为干旱历时,相邻正游程之间的间隔称为非干旱历时,阴影部分是连续干旱过程中每个月的 X_i 的累加,记作干旱强度 Z 。

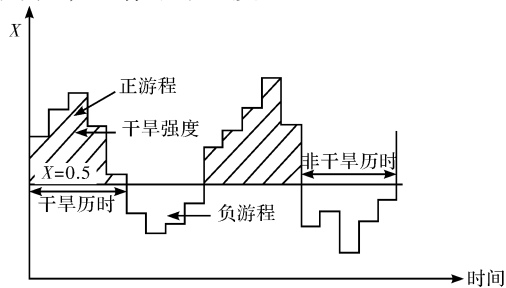


图1 干旱的识别过程

1.4 变尺度干旱评价模型的构建

干旱的模糊评价方法是利用对干旱的相对隶属度来表征干旱水平,其本质是一个定尺度干旱评价模型,以月尺度为例,该方法能够计算每月的干旱指标,也能直观比较各月的干旱程度,但不同的干旱过程时间尺度也是不一致的,有的干旱过程往往会持续几个月,而以月为定尺度的评价模型实际上是将干旱过程按月进行割裂,忽略了干旱过程的整体性,同时也无法评价一个半月

或是两个半月等非整月的干旱过程,如何准确评价不同尺度的干旱过程还是一个问题的。

识别的干旱过程存在干旱历时和干旱强度两个指标,采用单一的干旱历时或干旱强度指标无法准确评价各个干旱过程。如图 2a,两个干旱过程 A 和 B ,干旱强度与干旱历时均不一致,难以比较。平均干旱强度是干旱强度与干旱历时的比值,是一个综合考虑两个指标的物理量,但会出现不同历时下,平均干旱强度一样的两个干旱过程,如果认为这两个干旱过程的干旱程度是一致的,其实是不合理的。如图 2b,两个不同的干旱过程 C 和 D ,平均干旱强度是一样的,但显然干旱过程 D 的干旱程度较 C 要严重。

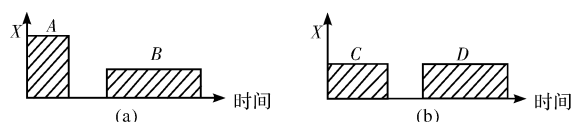


图2 两干旱过程比较图

为了准确评价不同尺度下的干旱过程,本文通过对识别的干旱过程进行回归分析和频率分析,将双变量的干旱过程转换为用干旱程度表征的单变量过程,从而建立变尺度干旱评价模型。

1.4.1 回归分析

变尺度干旱评价模型的回归分析是对干旱过程进行分析,寻找干旱历时和干旱强度对应的关系,从而构造变尺度干旱评价指标。具体步骤如下所示。

(1)将修正后的 n 个干旱过程绘制在坐标系 $Z-t$ 内

$$t = (t_1, t_2, t_3, \dots, t_k, \dots, t_n); \\ Z = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_k, \dots, Z_n). \quad (2)$$

上式表示的是识别的 n 个干旱过程, t_k 和 Z_k 分别代表第 k 个干旱过程对应的干旱历时和干旱强度。

(2)选择不同历时下干旱强度最大的点,并假定这些干旱过程的干旱程度一致,是历史过程中最为干旱的点,在 $Z-t$ 坐标系中进行回归分析, $Z=f(t)$ (图 3)。

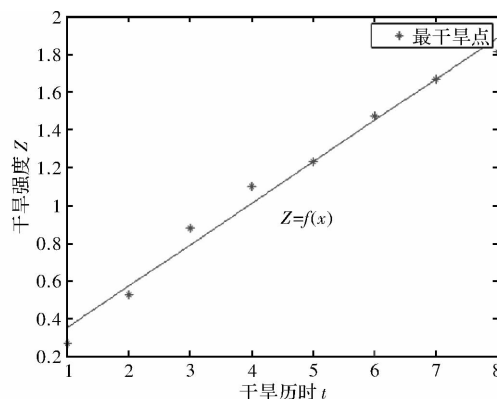


图3 最早点回归分析图

(3)构造干旱程度序列 $X = Z/f(t)$, X 是综合考虑干旱历时和干旱强度的一个指标量,能够反映不同历时下(即变尺度)的干旱强度,其值表征的是与

$Z=f(x)$ 的偏离程度, 值越小说明偏离假定最早点的程度越大, 即干旱程度越轻, 反之说明干旱程度越重, 故可将 X 作为变尺度干旱评价指标。

1.4.2 频率分析

变尺度干旱评价模型的频率分析是利用干旱过程发生的重现期给定干旱的评价标准, 干旱程度是描述干旱的严重程度, 分为特旱、重旱、中旱和轻旱, 可用于干旱过程的稀遇性表征, 即发生概率越低的干旱过程对应的干旱程度越大。变尺度干旱评价标准的确定按以下步骤进行:

(1) 将构造的干旱程度序列 X , 从小到大排序, 并计算各个干旱程度对应的概率。

(2) 在频率格纸上点绘出干旱程度序列 X , 并利用 P-III 型曲线进行拟合(图 4)。

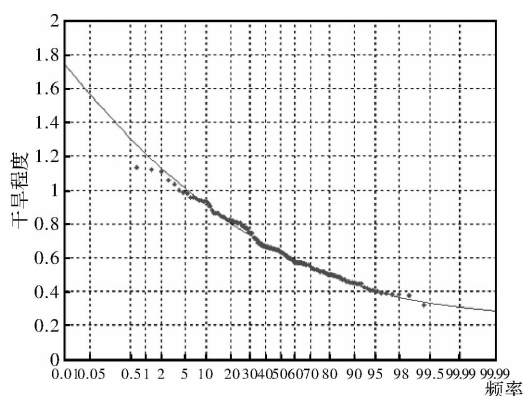


图 4 干旱程度拟合过程

(3) 重现期大于 T_1 、 T_2 、 T_3 分别对应特旱、重旱和中旱, 重现期小于 T_3 对应的是轻旱, 按式(3)和式(4)计算重现期 T 对应的频率 P 。

记某一程度干旱 A 发生的重现期为 T , 在长序列过程中发生干旱为 B , 由条件概率计算公式, $P(AB) = P(A/B) \times P(B)$, 重现期 T 为:

$$T = \frac{E}{P(AB) \times 12} = \frac{E}{P(A/B) \times \frac{S}{Q}} = \frac{Q}{P(A/B) \times \frac{S}{E}} = \frac{Q}{P(A/B) \times n}; \quad (3)$$

$$P_A = P(A/B) = \frac{Q}{T \times n}. \quad (4)$$

式中: S 、 E 分别表示干旱总历时和平均干旱历时, 单位为月, Q 为研究序列的长度, 与 T 一样单位为年, n 为干旱过程数。

(4) 由 T_1 、 T_2 、 T_3 计算概率矩阵 $P = [P_1 \ P_2 \ P_3]$, 在 P-III 型曲线上找到与之对应干旱程度矩阵 $X = [X_1 \ X_2 \ X_3]$ 。

(5) 为了便于表示, 将干旱程度矩阵转化为 0~1 之间。

$$X' = X/X_1 = [X'_1 \ X'_2 \ X'_3]. \quad (5)$$

上述的干旱程度矩阵 X' 则为变尺度干旱评价模型的评价标准。

1.4.3 模型建立

通过回归分析和频率分析, 最终建立的干旱评价模型如下:

$$X_k = Z_k/g(t_k). \quad (6)$$

式中: X_k 、 Z_k 、 t_k 表示第 k 个干旱过程对应的干旱程度、干旱强度和干旱历时, 由于模型中存在关于时间的函数 $g(t_k)$, 因此可以进行不同尺度下的干旱过程评价。其中

$$g(t_k) = f(t_k) \times X_1. \quad (7)$$

当 $X_k \geq X'_1$ 时, 该干旱过程属于特旱; 当 $X'_1 > X_k \geq X'_2$ 时, 该干旱过程属于重旱;

当 $X'_2 > X_k \geq X'_3$ 时, 该干旱过程属于中旱; 当 $X_k < X'_3$ 时, 该干旱过程属于轻旱。

2 淮河流域干旱时空格局及演变分析

淮河流域地处我国东部, 位于 $111^\circ 55' \sim 121^\circ 25' E$, $30^\circ 55' \sim 36^\circ 36' N$, 跨河南、安徽、江苏和山东 4 省, 面积为 27 万 km^2 , 环山临海, 地形复杂, 位于中国南北气候过渡带, 又受季风气候影响, 气候多变, 降水时空差异大, 历史上干旱灾害频发。本文按水资源的二级分区将淮河流域分为 4 个部分: 淮河上游区(王家坝以上南、北)、淮河中游区(王蚌区间南、北和蚌洪区间南、北)、淮河下游区(高天区、里下河区)、沂沭泗河区(沂沭河区、日赣区、中运河区、湖东区、湖西区)。

本文所采用的降水数据为中国地面降水日值格点数据集, 尺度为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格, 时间范围为 1961–2015 年。

2.1 定尺度下的干旱时空分布变化特征

构造月自适应模糊矩阵, 采用模糊评价的方法对淮河流域的 107 个格点(1961–2015 年)进行干旱评价, 为了描述淮河流域干旱的时空分布情况, 本文将 55 年划分成 1961–1971、1971–1981、1981–1991、1991–2001、2001–2015 共五个阶段, 绘制各阶段的干旱分布图(图 5)。

图 5 反映出淮河流域干旱分布满足东部和南部弱、西部和北部强的特征。其中“王蚌区间南岸”、“蚌洪区间南岸”和“里下河区”的东南部干旱较弱, “王蚌区间北岸”的西北部和“湖西区”的西北部干旱较强。

55 年来, 淮河流域总体处于干旱状态, 大部分地区的干旱指标值都超过 0.5, 且干旱有着明显加强的趋势, 以干旱指标大于 0.58 为例, 1961–1971 年只有“王蚌区间北部”、“湖西区”的西北部和“湖东区”的一小部分地区干旱指标大于 0.58; 1971–1981 年干旱指标大于 0.58 的地区明显增大, 向东延伸到了“沂沭河区”; 1981–1991 年虽然“王蚌区间北部”的干旱指标有所下降, 但淮河以北的大部分地区干旱指标都大于 0.58; 1991–2001 年在前面十年的基础上, 干旱指标值也有了明显的增加, 0.62~0.64 的干旱由“湖西区”发展到了整个“王蚌区间北岸”; 2001–2015 年干旱继续加强, 淮河南部的干旱也在加强, 大部分地区的干旱指标值大于 0.54, 几乎整个淮河北部地区干旱指标均大于 0.58, “王蚌区间北部”的西北部大部分地区干旱指标超过 0.62, 达到甚至超过 0.64。

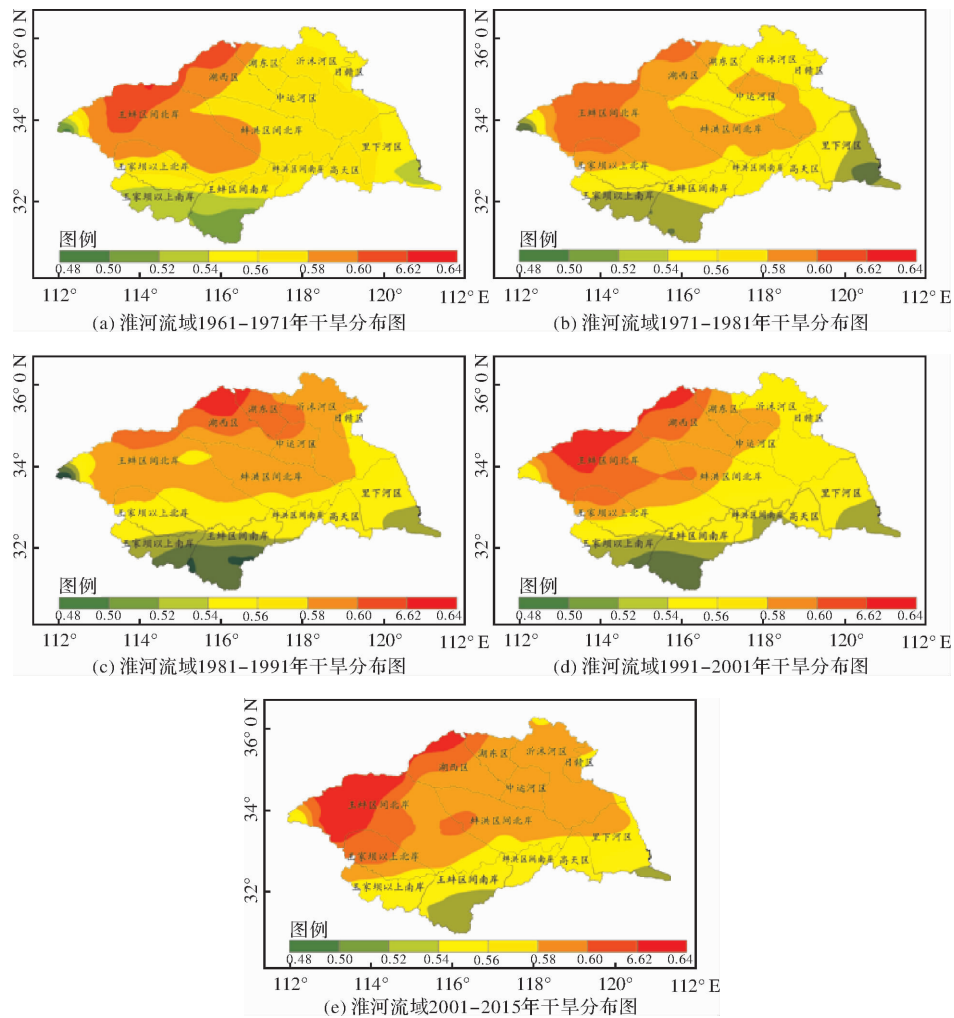


图5 淮河流域干旱时空分布图

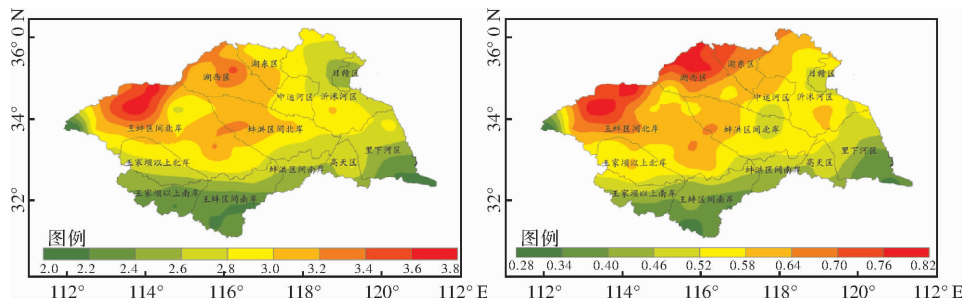


图6 淮河流域平均干旱历时分布图

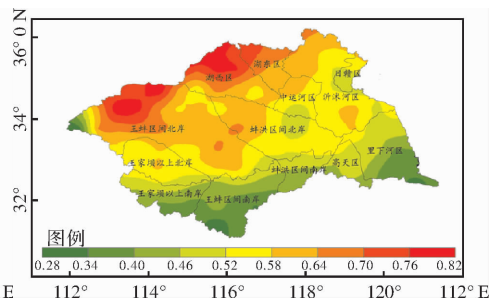


图7 淮河流域平均干旱强度分布图

2.2 干旱历时和强度分析

根据对立统一定理, 以对于旱的综合相对隶属度 $X_0 = 0.5$ 作为截断水平, 进行干旱的游程识别。对淮河流域 107 个格点识别的干旱过程, 计算平均干旱历时和平均干旱强度, 绘制淮河流域的平均干旱历时分布图和平均干旱强度分布图(图 6、图 7)。

图 6 和图 7 对比发现, 淮河流域平均干旱历时和干旱强度具有较强的正相关性, 即干旱历时长的区域对应的干旱强度也较强。

淮河流域平均干旱历时由南部的 2 个月逐渐增加到西北部的 3.6 个月, 其中“王蚌区间北岸”的

西北部地区, 平均干旱历时最长, 部分地区达到了 3.8 个月。流域的平均干旱强度由南部的 0.28 逐渐增加到西北部的 0.78, 其中“王蚌区间北岸”的西北部地区和“湖西区”的北部地区, 平均干旱强度最强, 部分地区超过了 0.8。

总体上看, 平均干旱历时和平均干旱强度均满足由东南向西北逐渐增加的规律, 反映出流域西北干旱总体较东南强。

2.3 变尺度干旱评价模型构建

取每个区域的栅格点降水数据的平均值作为该区域的降水数据资料, 并对识别的干旱过程进行回归分析和频率分析, 建立淮河上游区、淮河

下游区、淮河中游区以及沂沭泗河区, 4 个区域的变尺度干旱评价模型。

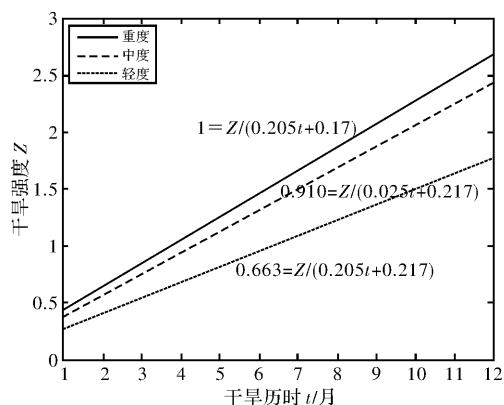
以淮河上游区变尺度干旱评价模型构建为例, 经 1.1 ~ 1.3 识别出淮河上游区 1961 ~ 2015 年的 161 个干旱过程, 选择同一历时下干旱强度最大的点, 假定这些干旱过程的干旱程度是一致的, 对应的是淮河流域最干旱的过程, 在 $Z-t$ 坐标系中进行回归分析, 发现满足 $Z=0.184t+0.195$ 。

构造淮河上游区的干旱程度序列 $X=Z/(0.184t+0.195)$, 利用 P-III 曲线进行拟合, 本文选择大于 10 年一遇、5 年一遇、1 年一遇分别对应的是特旱、重旱和中旱, 小于 1 年一遇对应的是轻旱。通过式(4)计算概率矩阵:

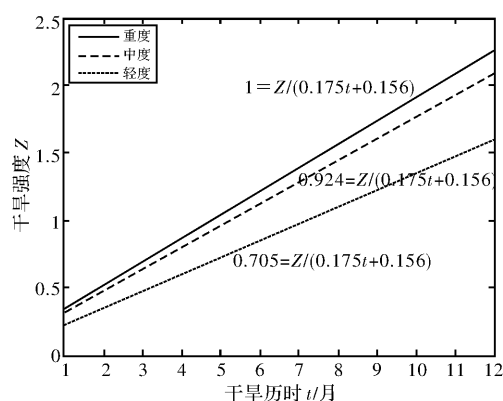
$$P_1 = \frac{55}{10 \times 161} = 0.034, P_2 = \frac{55}{5 \times 161} = 0.068, P_3 = \frac{55}{1 \times 123} = 0.34。$$

表 1 平均干旱强度与变尺度干旱评价指标比较

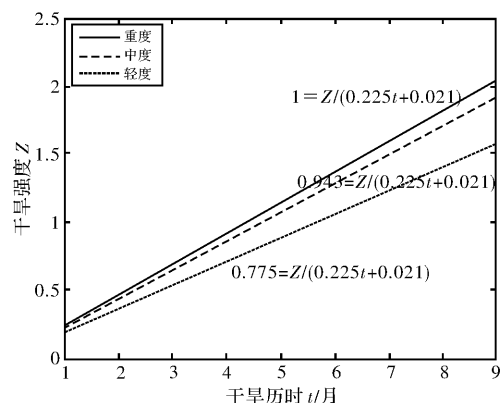
| 序号 | 时间 | 开始月份 | 持续月份 | 干旱强度 | 干旱程度 | 平均干旱强度 | 按干旱程度升序 | 按平均干旱强度升序 |
|----|------|------|------|-------|-------|--------|---------|-----------|
| 1 | 1961 | 1 | 2 | 0.620 | 1.102 | 0.310 | 7 | 6 |
| 2 | 1961 | 4 | 1 | 0.209 | 0.552 | 0.209 | 6 | 7 |
| 3 | 1961 | 6 | 3 | 0.711 | 0.951 | 0.237 | 4 | 10 |
| 4 | 1961 | 10 | 1 | 0.192 | 0.506 | 0.192 | 2 | 5 |
| 5 | 1962 | 12 | 5 | 0.796 | 0.713 | 0.159 | 10 | 4 |
| 6 | 1962 | 6 | 2 | 0.200 | 0.355 | 0.100 | 5 | 2 |
| 7 | 1962 | 10 | 1 | 0.102 | 0.268 | 0.102 | 9 | 3 |
| 8 | 1963 | 12 | 3 | 0.841 | 1.126 | 0.280 | 3 | 9 |
| 9 | 1963 | 6 | 1 | 0.277 | 0.732 | 0.277 | 1 | 8 |
| 10 | 1963 | 10 | 3 | 0.413 | 0.553 | 0.138 | 8 | 1 |



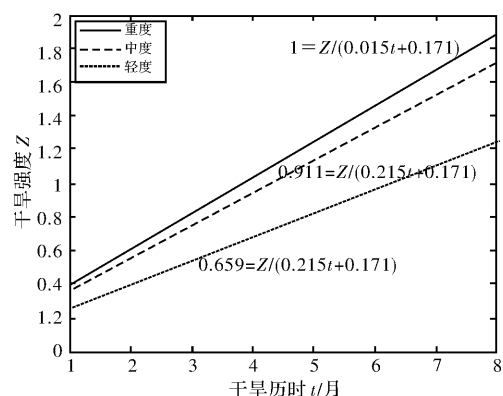
(a) 淮河上游变尺度干旱评价模型



(b) 淮河下游变尺度干旱评价模型



(c) 淮河中游变尺度干旱评价模型



(d) 沂沭泗河变尺度干旱评价模型

图 8 淮河流域变尺度干旱评价模型

在 P-III 曲线上找到对应的干旱程度矩阵 $X = [1.115 \ 1.015 \ 0.739]$ 。

将干旱程度矩阵转化成 0 ~ 1 之间, 则 $X = [1 \ 0.910 \ 0.663]$ 。

故淮河上游区的变尺度干旱评价模型如下:

$$X = Z/[(0.184t + 0.195) \times 1.115] = Z/(0.205t + 0.217)。$$

当 $X \geq 1$ 时, 该干旱过程属于特旱; 当 $1 > X \geq 0.910$ 时, 该干旱过程属于重旱;

当 $0.910 > X \geq 0.663$, 该干旱过程属于中旱;

当 $X < 0.663$ 时, 该干旱过程属于轻旱。

选择淮河流域 1961 ~ 1963 年发生的 10 个典型干旱过程, 分别采用平均干旱强度指标和变尺度干旱指标对实际干旱过程进行评价 (表 1)。

表 2 淮河流域干旱变尺度评价模型

| 区域 | 评价模型 | | 特旱 | 重旱 | 中旱 | 轻旱 |
|------|------------------|-------|----|-----------|---------------|--------|
| | $X = Z/(at + b)$ | | | | | |
| | a | b | | | | |
| 淮河上游 | 0.205 | 0.217 | >1 | 0.910 ~ 1 | 0.663 ~ 0.910 | <0.663 |
| 淮河下游 | 0.175 | 0.156 | >1 | 0.924 ~ 1 | 0.705 ~ 0.924 | <0.705 |
| 淮河中游 | 0.225 | 0.021 | >1 | 0.943 ~ 1 | 0.775 ~ 0.943 | <0.775 |
| 沂沭泗河 | 0.215 | 0.171 | >1 | 0.911 ~ 1 | 0.659 ~ 0.911 | <0.659 |

注：表格中的 X 为干旱程度指标， Z 和 t 分别对应干旱过程的强度和历时， a 和 b 是系数。

表 1 中反映出，两种指标评价 10 个干旱过程的强弱特征基本一致。干旱过程大致可分为三类，1、2、8、9 属于强干旱过程，2、4、5、10 属于中干旱过程，6、7 属于弱干旱过程。

而在每一类别的干旱过程中，两种指标评价的结果存在差异，以弱干旱过程为例，平均干旱强度指标认为 7 大于 6，变尺度干旱评价指标认为 6 大于 7。平均干旱强度指标分别为 0.100 和 0.102，两者近乎相等，而干旱过程 6 和 7 的历时分别是 2 个月和 1 个月，过程 6 可以看作是过程 7 的延续，实际上过程 6 的干旱程度是大于过程 7 的，因此变尺度干旱评价指标更为合理。

平均干旱强度指标其反映的实质是当前干旱过程延续下去，干旱程度保持不变，这会很大程度上高估了一些小历时的干旱过程，如上表中的过程 2，其历时 1 个月，但干旱程度高于历时 5 个月的过程 5，还有过程 4、7、9 也被高估。

绘制淮河上游区的变尺度干旱评价模型如图 8a，同样地淮河下游区、淮河中游区和沂沭泗河的变尺度干旱评价模型见图 8b ~ 8d。

淮河流域变尺度干旱评价模型采用‘重度’、‘中度’和‘轻度’三条线段，将可能发生干旱过程划分成四个区域，在‘重度’线以上对应发生的是特旱，‘重度’线和‘中度’线之间发生重旱、‘中度’线和‘轻度’线之间发生中旱、‘轻度’线以下发生轻旱。

将淮河流域变尺度干旱评价模型用表格形式表达(表 2)。

3 结论

本文研究提出自适应变尺度干旱评价模型，首先构建自适应性模糊矩阵，采用模糊评价的方法进行月尺度下的干旱评价，利用对立统一定理进行干旱的识别，通过对识别的干旱过程进行回归分析和频率分析，建立自适应变尺度干旱评价模型并应用至淮河流域，主要结论如下：

(1) 淮河流域 55 年来总体处于干旱，且有着明显加强的趋势，其中王蚌区间南岸’、‘蚌洪区间南岸’和‘里下河区’的东南部干旱较弱，‘王蚌区间北岸’的西北部和‘湖西区’的西北部干旱较强。

(2) 淮河流域平均干旱历时和干旱强度具有较强的正相关性，即干旱历时长区域对应的干旱强度也较强。总体上看，平均干旱历时和平均干旱强度均满足由东南向西北逐渐增加的规律。

(3) 构建了淮河上游区、淮河下游区、淮河中游区和沂沭泗河区共 4 个区域的自适应变尺度干旱评价模型，解决了不同时间尺度下的干旱过程评价问题。

本文所建立的自适应变尺度干旱评价模型可针对完整的干旱过程进行科学评价，有效解决尺度评价中的干旱过程割裂和强度低估等问题，并实现不同历时干旱事件的评估和对比。为与定尺度评价模型结果进行对比，本文仍以月作为基本尺度进行研究，未来可在回归分析中采用更小的时间尺度，更科学地评价一场完整的干旱过程。

参考文献：

- [1] 顾颖, 刘静楠, 林锦. 近 60 年来我国干旱灾害特点和情势分析[J]. 水利水电技术, 2010, 41(1): 71-74.
- [2] 黄会平. 1949-2007 年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 94-98.
- [3] 冯平, 李绍飞, 王仲钰. 干旱识别与分析指标综述[J]. 中国农村水利水电, 2002(7): 13-15.
- [4] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-988.
- [5] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration of time scales[C]//Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 1993, January, 17-23, Anaheim CA: 179-186.
- [6] Palmer W C. Meteorological Drought. Research Paper No. 45 [M]. Washington, U S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965.
- [7] 翟家齐, 蒋桂芹, 裴源生, 等. 基于标准水资源指数的流域水文干旱评估—以海河北系为例[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 687-698.
- [8] 周玉良, 刘立, 周平, 等. 基于帕默尔旱度模式的干旱识别及其特征频率分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 174-184.
- [9] 刘可晶, 王文, 朱烨, 等. 淮河流域过去 60 年干旱趋势特征及其与极端降水的联系[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1179-1187.
- [10] 雷江群, 黄强, 王义民, 等. 基于可变模糊评价的渭河流域综合干旱分区研究[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 574-584.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T20481-2006 气象干旱等级标准[S]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [12] 陈守煜, 王子茹. 基于对立统一与质量互变定理的水资源系统可变模糊评价新方法[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 253-261.
- [13] 沈简, 饶军, 傅旭东, 等. 基于模糊综合评价法的泥石流风险评价[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 171-175.
- [14] 张明媛, 刘妍, 袁永博. 基于可变模糊聚类的城镇综合承灾能力评价研究[J]. 灾害学, 2012, 27(1): 135-138.
- [15] 李敏, 陈守煜, 王运涛, 等. 基于可变集的汛期分期多指标识别方法[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1420-1424.

Study on Adaptive Variable Scale Drought Evaluation Model

FANG Guohua¹, YAN Min¹, WEN Xin^{1,2*} and LIN Rongjie

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To solve the problem of variable scale drought evaluation, this paper establishes an adaptive variable scale drought evaluation model by regression analysis and frequency analysis to the drought processes and avoid the problem of drought separation and strength undervaluation, which can be distinguished through three steps including putting forward adaptive fuzzy standard matrix, evaluating drought under fixed scale by the way of fuzzy evaluation and distinguishing the drought processes based on the theory of the unity of opposites. Take the Huaihe basin for example, the results of fuzzy evaluation by establishing an adaptive fuzzy standard matrix indicates the Huaihe basin is in drought in the past 55 years and has a strong tendency to strengthen, the degree of drought in northwest area of 'the section between Wangjiaba and Bengbu' and the northwest area of 'the northwest section of Nansi Lake' is higher than other regions. Then the drought processes distinguished reflects that the duration and strength of drought have a strong correlation and meet the law of increasing gradually from southeast to northwest. Finally, this paper establishes adaptive variable scale drought evaluation models for in Huaihe basin by simulating the relationship between the length and strength of the drought.

Key words: drought evaluation model variable scale; adaptive; regression analysis; frequency analysis; Huaihe basin

(上接第 18 页)

- [11] 胡建华, 林阳帆, 周科平. 地下矿山突水通道脆弱性的模糊层次评价[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 16-21.
- [12] 李琰, 赵梓焱, 田水承, 等. 矿工不安全行为研究综述[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(8): 47-54.
- [13] 旭宏, 李玉民, 顾政华, 等. 基于层次分析法和熵权法的区域物流发展竞争态势分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(3): 398-401.

- [14] 刘洋洋, 李永强, 李有鹏, 等. 基于 AHP—模糊综合评价法的山区丘陵公路灾害易损性研究——以河南省修武县为例[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 32-37.
- [15] 沈简, 饶军, 傅旭东. 基于模糊综合评价法的泥石流风险评价[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 171-175.
- [16] 全国质量专业技术人员职业资格考试办公室. 质量专业理论与实务[M]. 北京: 中国人事出版社, 2012.

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Coal Mine Water Disaster Risk Based on Combination Weighting

XU Xing, GUO Bingbing, TIAN Kunyun and WANG Gongzhong

(School of Safety Engineering, Henan university of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Coal mine water disaster is one of the major natural disasters in the coal mine safety production, in order to improve the management level of mine water control, reduce water damage accidents, under the premise of establishing the evaluation index system of water risk with the hierarchical structure, it used the analytic hierarchy process and fuzzy analytic hierarchy process to determine the weight of evaluation indexes in combination, it could fully reflect the subjective evaluation index important degree and objective reflection and evaluation index system of various influencing factors weights, it was combined with fuzzy comprehensive evaluation method to establish a fuzzy comprehensive evaluation model based on combination weighting, and was applied to the Xinzheng Zhaoji-azhai coal mine with MATLAB program of the evaluation system, the depth of the mine water hazard was studied by using the evaluation result, the results showed that: the evaluation results and the actual situation of the mine. The evaluation model can quantitative enough to reflect the potential safety hazard of water disaster in coal mine production system, it has important practical significance in guiding the safe production of coal mines.

Key words: coal mine water disaster; combination weight; fuzzy comprehensive evaluation; Matlab; risk evaluation