

基于响应单元的太湖流域干旱分析方法研究

周祥林¹, 陆宝宏¹, 戴 戴², 孙婷婷¹, 关云霞³, 崔亚军⁴, 余赛英⁵

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 太湖流域管理局防汛抗旱办公室, 上海 200434; 3. 贵州省水文水资源局, 贵州 贵阳 550002; 4. 河南省水文水资源局, 河南 郑州 450003; 5. 福建省水文水资源勘测局, 福建 福州 350001)

摘要 提出一种将区域或流域划分成若干个不同的响应单元, 把每一个响应单元看作一个点, 借助于点干旱指标评价的方法分析面干旱, 并应用到太湖流域。通过太湖流域干旱记录与三种基于降雨的常用指标的对比分析, 得出 Z 指数法的精度最高, 标准化降水指标(SPI)次之, 降水距平百分率(PAI)最低, 而且 Z 指数法显示太湖流域的旱情主要发生在夏秋季节。Z 指数法考虑了降水的时空分布特性, 具有多时间尺度特性, 反映出了不同时间尺度的水分状况。

关键词 响应单元; 面干旱; 太湖流域; 点干旱指标; 聚类分析

中图分类号: TV213.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2006)02-0006-05

Study on areal drought analysis and evaluation method based on the response unit in Taihu Basin

ZHOU Xiang-lin¹, LU Bao-hong¹, DAI Su², SUN Ting-ting¹, GUAN Yun-xia³, CUI Ya-jun⁴, YU Sai-ying⁵

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Taihu Basin Administrative Bureau, Shanghai 200434, China; 3. Hydrological and Water Resources Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550002, China; 4. Bureau of Hydrology and Water Resources of Henan Province, Zhengzhou 450003, China; 5. Water Resources and Hydrological Exploration and Development Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350001, China)

Abstract Based on the response units divided from regions or basins, a method of point drought index evaluation was proposed to evaluate areal drought. Through analysis and comparison of the drought record and three drought indices based on precipitation in Taihu Basin, it can be found out that the best method is Z-index, followed by standardized precipitation index(SPI) and precipitation anomaly index(PAI). The evaluation method of Z-index, which takes the spatial and temporal distribution characters of precipitation into consideration, can reveal the moisture-distribution in different time scales.

Key words response unit; areal drought; Taihu Basin; point drought index; cluster analysis

干旱是指水分的收支或供求不平衡形成的水分短缺, 主要由气候等因子引起, 可发生在任何区域和任何季节。干旱是一种十分复杂的综合现象, 它的发生比较缓慢、强度逐渐积累, 不易察觉, 其造成的损失没有洪涝灾害来的那么立竿见影, 对社会经济和生态环境所造成的破坏具有明显的滞后性。正是

由于这种滞后性, 与洪涝灾害相比, 人们往往低估了干旱带来的影响, 尤其是在富水地区人们更多的关注于洪涝灾害, 忽视了干旱的危害性。随着经济的迅速发展、人口增长及由此引起的全球气候变暖, 干旱有进一步加重的趋势, 从而必将对我国社会经济及人民生活造成严重影响^[1]。因而如何准确、全面

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379008)

作者简介: 周祥林(1981—), 男, 安徽金寨人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源及区域干旱风险分析。E-mail: zhouxianlin@126.com

地描述干旱问题及科学评价其损失,分析其风险,成为十分紧迫而又必须解决的问题。

干旱指标是开展干旱监测预警及评价工作的基本依据,也是建立干旱监测预警业务系统的技术关键。由于干旱的影响因子比较多而且复杂,许多干旱指标都是针对某一个或几个影响因子而设定的,难免带有一定的局限性,但在现阶段仍然不失为一种可应用的评价方法^[2]。描述干旱的指标多种多样,在这些指标中,基于降水量的干旱指标应用最为广泛^[3]。根据研究对象的不同又可将干旱分为点干旱和面干旱两种。本文提出划分流域响应单元,然后把各响应单元看作点,运用点干旱计算方法分析响应单元的干旱,根据面积加权将各点干旱指标综合成面干旱指标,再进行评价的方法。

1 点干旱指标综述

由于干旱是一个由点到面不断扩张的过程,因此点干旱指标经过适当处理后可用来评价面干旱。基于降雨的点干旱评价指标有降水距平百分率(PAI)、Z指数法以及标准化降水指标(SPI)3种,分别阐述如下。

1.1 降水距平百分率(PAI)

降水距平百分率是基于某一时段降水量与多年平均降水量的比较分析,该计算方法简便,不需要其他更多的数学处理,能直接标明某一时段降水量与多年平均值偏离的程度,但并没有考虑到年内降水分配不均这一特征。其计算公式为

$$PAI = (r - r') / r' \quad (1)$$

式中: r 为某一时段的降水量, r' 为这一时段的多年平均值。

1.2 Z指数法(Z-index)

Z指数法是目前使用最广泛的方法之一。它首先假设降水量服从P-III型分布,再对降水量进行正态化处理,这样可以将P-III型分布转换成正态分布^[4]。转换公式为

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \Phi_i + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (2)$$

其中
$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_i^3}{n} \quad \Phi_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

式中: C_s 为偏态系数; Φ_i 为标准变量。

1.3 标准化降水指标(SPI)

在降水分析中,采用 Γ 分布概率来描述降水量的变化。SPI就是先求出降水量 Γ 分布,然后再将

其正态标准化。首先假设某一时段的降水量为 x ,则其 Γ 分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0) \quad (3)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4)$$

α 和 β 分别为形状参数和尺度参数,其值可用极大似然估计方法求得。所以对于某一年的降水量 x_0 ,可求出随机变量 x 小于 x_0 事件的概率为

$$P(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \quad (5)$$

利用数值积分的方法求得(5)式中的累积概率,由于在极大似然估计方法中不能计算降水为0时的情况,所以当降水量为0时的概率由下式计算

$$P(x=0) = m/n \quad (6)$$

式中: m 是降水量为0的样本总数。再将式(5)(6)累积概率转换为标准正态分布函数

$$SPI = s \frac{t - (c_2 t + c_1)t + c_0}{((d_3 t + d_2)t + d_1)t + 1} \quad (7)$$

其中: $t = \sqrt{\ln(1/p^2)}$,当 $p < 0.5$ 时, $p = 1 - p$, $s = 1$;当 $p \geq 0.5$ 时, $s = -1$, $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.18926$, $d_3 = 0.001308$ ^[5]。

本文统一将3种指标划分为7个等级区间,按出现的频率不同对这7个等级区间进行了量化。各指数的旱涝等级划分标准如表1所示。

表1 旱涝等级划分标准

旱涝等级	PAI	SPI	Z-index
大涝	≥ 0.6	≥ 2.2	≥ 1.96
中涝	(0.4, 0.6)	(1.9, 2.2)	(1.44, 1.96)
轻涝	(0.2, 0.4]	(1.2, 1.9]	(0.84, 1.44]
正常	(-0.1, 0.2]	(-1.6, 1.2]	(-0.84, 0.84]
轻旱	(-0.26, -0.1]	(-2.12, -1.6]	(-1.44, -0.84]
中旱	(-0.5, -0.26]	(-2.47, -2.12]	(-1.96, -1.44]
大旱	≤ -0.5	≤ -2.47	≤ -1.96

2 面干旱评价指标

一个区域或流域的干旱情况,与降雨、温度、地貌特征、下垫面的物质组成(包括土壤类型及其含水量,作物组成及种植量等)等因素有关。因此,在区域干旱的描述中,必须考虑上述影响因子。不同的响应单元,其降雨量、温度、地貌特征及下垫面的物质组成不一样,因而干旱程度不一样。如何划分区域或流域响应单元是面干旱计算正确与否的关键。

2.1 响应单元划分方法

影响响应单元划分的因素很多,限于资料条件,本文根据研究区域内不同雨量站点的降雨量、土壤

类型、经纬度、高程等因子,采用动态聚类算法中的C-均值聚类算法将研究区域划分成若干不同类型,再运用泰森多边形法在地理信息图层上将流域划分成不同的响应单元。

C-均值聚类算法是计算每个样本与聚类中心的欧氏距离

$$D(x, y) = \|x - y\| = \left(\sum |x_i - y_i|^2 \right)^{1/2}$$

以最小距离为准则。式中 x_i 为样本序列的特征值, y_i 为聚类中心的特征值。其计算过程如图 1 所示。

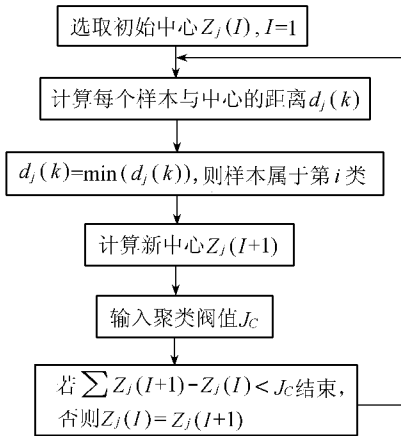


图 1 C-均值聚类流程

2.2 面干旱评价指标

把各响应单元看作一个点,分别计算各响应单元的干旱指标,采用面积加权法计算面干旱指标,即

$$D_s(t) = \sum_{k=1}^n a(k) d_k(t)$$

式中: $D_s(t)$ 为区域 t 时段的干旱指标值; $a(k)$ 为 k 响应单元(站)的有效区域面积,用有效区域面积与总区域面积比值的百分数表示; $d_k(t)$ 为 k 站 t 时段干旱指标 ($k = 1, 2, \dots, n$)。

3 实例

太湖流域属中亚热带季风气候区,主要降雨类型为梅雨及台风雨。由于地形条件不同,降雨量在时空分布上呈现出较大差异。年降雨量在年际之间变化较大,实测最大年降雨量为 1626 mm(1954 年),最小 676 mm(1978 年),倍比为 2.4。太湖流域的地貌情况也比较复杂,流域内有山区、丘陵地带、平原区。流域上游地区地势较高,多年平均降雨量为 1242 mm,下游地区地势低洼,多年平均年降雨量 1132 mm;上下游年降雨量相差 100 多 mm。南部年降雨量大于北部,南北差异明显。降雨时空上的差异导致雨量分配的不均^[6],造成了干旱频繁发生,给该地区造成了严重的经济损失。所以对该地区的干旱展开研究有着重要意义。

由于太湖流域降水分布不均的特性,将整个流域看作一个点来研究显然是不可行的,必须根据其特性进行区域划分。本文通过 C-均值动态聚类算法将太湖流域划分为 5 个响应单元,其各自的代表站分别为湘城、老石坎、长兴、横畈、望新,每站有 1951~1990 年的降雨序列,各个代表站的权重等于它们所代表的区域面积与总面积之比,通过各个站的指标值计算整个流域的指标值,再对上述 3 种指标做详细的对比分析。代表站位置如图 2 所示。

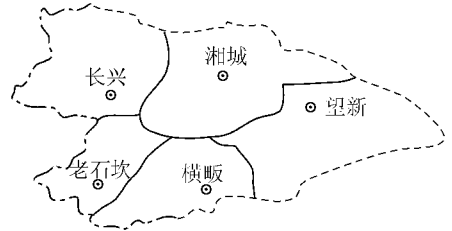


图 2 代表站位置

湘城站面积为 10441.52 km²,权重为 0.285;望新站面积为 13634.14 km²,权重为 0.372;老石坎站面积为 2088.58 km²,权重为 0.057;长兴站面积为 6213.5 km²,权重为 0.17;横畈站面积为 4241.4 km²,权重为 0.116。

在这 40 年中,1978 年的旱情等级最大,为 50 年一遇的特大干旱。按受旱率值 α (受旱面积与播种面积之比)的大小划分干旱等级,太湖流域共有 26 年发生了旱情^[7],见图 3 表 2。

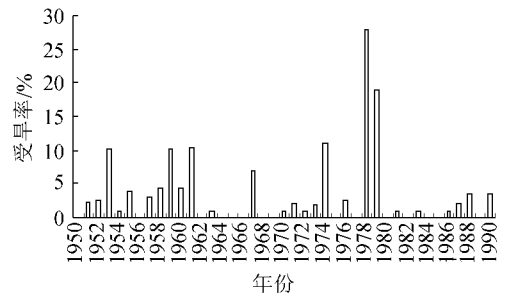


图 3 流域各年受旱
表 2 干旱年份的划分

大旱年份	中旱年份	轻旱年份
$\alpha > 20\%$	$10\% < \alpha < 20\%$	$0 < \alpha \leq 10\%$
		1951, 1952, 1954, 1955, 1957,
		1958, 1960, 1963, 1967, 1970,
1978	1953, 1959, 1961,	1971, 1972, 1973, 1976, 1981,
	1974, 1979	1983, 1986, 1987, 1988, 1990

4 结果分析

干旱是一个持续过程,当持续缺水时间超过某一阈值时就认为发生了干旱,这个值称为最小干旱历时,干旱历时是反应干旱灾害程度的一个依据,由

于不同地区耐旱能力的不同,最小干旱历时还没有统一的定论。太湖流域是富水地区,耐旱能力较强,经分析,本文取两个月作为最小干旱历时,即当连续两个或两个以上月份发生降水不足情况时就认为这段历时发生了旱情,在与实际旱情等进行比较时,相差一个等级也可以看作近似相符^[8]。

4.1 以月为时间步长

首先取月为步长,相同月份的降雨量作为一个序列。分别计算该序列的3种指标值,再依据表1统计分析干旱等级。当连续两个或两个以上月份发生旱情时,则取其旱情等级最大值作为该历时的旱情等级。按上述方法得出的等级结果如图4所示(1—轻旱 2—中旱 3—大旱)。

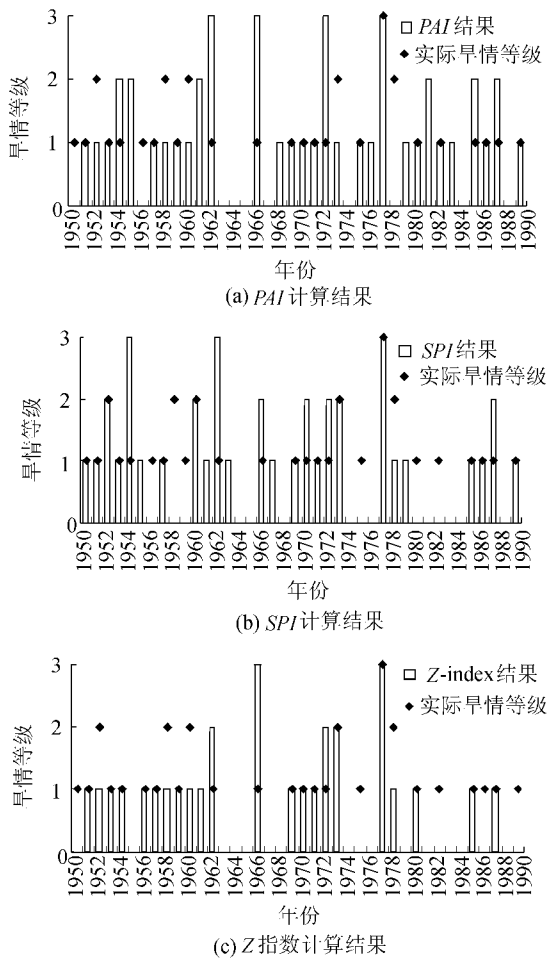


图4 各等级计算结果

从图4(a)可以看出,PAI的计算结果显示,在1951~1990年间有30年发生了旱情,其中有13年的结果与实际情况完全相符,7年旱情近似相符;图4(b)显示,SPI计算得出的25年不同程度旱情中有13年的等级与实际完全相符,5年近似相符,有7年的结果不符,例如在1963年和1955年,SPI计算的结果为大旱而实际旱情等级为轻旱;图4(c)显示Z指数法的吻合程度最高,在其22年的旱情中,有14

年的旱情等级与实际相符,6年近似相符,只有2年与实际不符,其中1967年实际情况是轻旱,而Z指数法得出的结果显示该年属于大旱状态。由图4中还可看出,这3种指标所得出的干旱年数与实际的26年并不吻合,有的干旱年份指标未能反映出来,PAI有2年的旱情没有判断出来,SPI和Z指数各自都有5年,此外PAI计算结果出现不符的年份最多,SPI计算结果次之,Z指数计算结果最少。1978年是太湖流域的特大干旱年,在该年的5~9月汛期,降雨量严重不足。这5个月的各项指标值见表3。

表3 1978年太湖流域3项指标计算结果

月份	降水量/ mm	多年平均值/ mm	PAI	SPI	Z-index
5	93.5	107.89	-0.135	-1.08	-0.18
6	34.7	165.50	-0.790	-2.49	-2.11
7	54.5	144.02	-0.622	-1.82	-1.09
8	1.6	117.76	-0.986	-2.51	-2.76
9	50.6	108.65	-0.534	-1.49	-0.79

由表3可以看出,5~9月份中,太湖流域的降水量与多年平均值相比明显偏少,而在6月份和8月份中缺水情况尤为严重,缺水程度分别达到了79%和98.6%,属于大旱状态,上述3种指标的值也都反映出了在这一时期严重缺水,发生了特大干旱的事实。由于这3种指标值都是月降雨量与其多年平均值作比较后分析得出的,所以同一计算系列中,降雨量越小,其指标值也应该相对越小,即出现干旱的几率越大,干旱程度也越大。由于PAI不考虑降雨分布特性,所以其指标值符合上述规则;SPI值也极好地遵循了上述规则,只有在一个计算序列中降雨量相对较大的几个月份的SPI值可能会出现违背上述规则的情况,这主要是因为,在计算累积概率时采用了数值积分的方法,当序列中的几个极大值之间差距很小时,数值积分求得的累积概率相差很小,从而产生了较大的误差,导致了上述情况;Z指数法则出现了较大的波动,根据袁文平等^[1]的研究成果可知,当降雨量分布在某一个区域,Z指数的变化趋势与降雨量的变化趋势不一致时,假设该序列中有出现上述异常现象的值 X_1, X_2 ,假设已知 $X_1 > X_2$,但是 $Z_1 < Z_2$,则出现这种异常情况的条件^[1]是: $X_1 + X_2 < \frac{-4\sigma}{C_s} + 2\bar{x}$,而且随着右式的增大则出现异常情况的几率就越大。

4.2 以季为时间步长

在实际防汛抗旱工作中,还需要比较不同时间尺度的水分情况,需要对不同时间步长求得的干旱指标值进行对比分析,以便准确地指导抗旱工作。在本次研究中,再取季度作为时间步长,对比分析

SPI 和 *Z* 指数。如果 1 年内有两个或两个以上季度出现了旱情, 则取其中最大值作为该年的值。经过上述方法计算出各季度所得的指标值如图 5 所示。

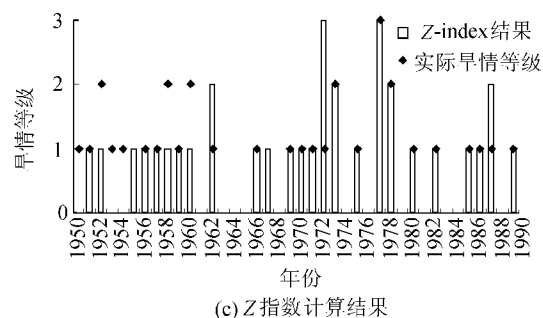
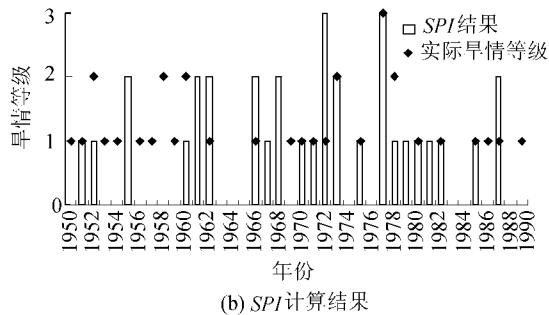
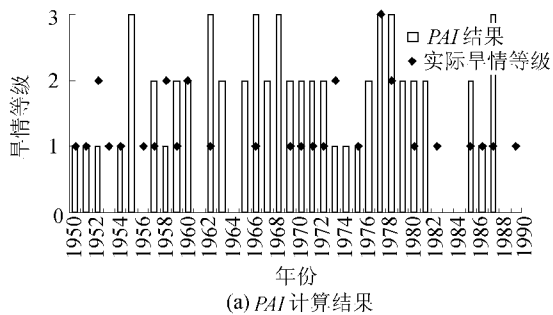


图 5 以季度为步长的各等级结果

仍采取表 1 中的同样标准来判断干旱的等级, 从图 5(a) 可看出, *PAI* 的 31 年旱情中, 只有 7 年与实际等级完全一致, 13 年近似一致, 11 年错误; 图 5(b) 显示, *SPI* 计算得出的 22 年旱情有 9 年与实际完全吻合, 有 6 年是近似吻合的, 其中有 7 年结果是错误的, 以季度为步长的 *SPI* 的精度有所下降, 错误率仍然较高, 可以看出 *SPI* 不具备多时间尺度特性, 不同的时间尺度需要不同的判断标准, 从而不同时间尺度的 *SPI* 值之间不具有可比性, 无法通过 *SPI* 指标来比较不同时间尺度的水分状况和干旱强度; 从图 5(c) 中则可看出, *Z* 指数法得出有 25 年发生旱情, 其中有 17 年与实际等级完全吻合, 5 年近似相符, 精确度最高, 错误率最低, 且 *Z* 指数显示在 1978 年发生了春夏秋三季连旱, 与实际情况一致^[6]。 *Z* 指数法以不同时间为步长得出的结果基本一致, 精确度很高, 不同的时间尺度的结果具有可比

性, 比较图 4(c) 和图 5(c) 可得出, 不同时间步长的 *Z* 指数法在灾害程度很大的中旱和大旱的判断上准确度非常高, 这为指导抗旱工作减少旱灾损失提供了重要的依据, 而 *Z* 指数法出现错误的年份基本上都是灾害程度较轻的轻旱年份, 究其原因, 主要由于缺少资料使得响应单元划分过大所致。不同季节降水量的年际间变化对于干旱的形成有着直接的影响, 降水年际间变化(降水变率)大, 则发生干旱的可能性大, 计算可得太湖流域 3~5 月的降水变率在 0.37~0.4 之间, 6~8 月的降水变率在 0.35~0.46 之间, 9~11 月的降水变率最大, 在 0.5~0.65 之间, 12~2 月的降水变率值在 0.31~0.4 之间, 所以可以看出太湖流域夏秋季节出现干旱的机会较多, 春冬季节出现干旱的机会较少, 而 *Z* 指数法也恰好反映出了这一现象。

5 结论与展望

综上所述, 在太湖流域中, *Z* 指数法的精度最高, *SPI* 次之, *PAI* 的精度最差。 *PAI* 对旱涝的反应慢, 反映出的旱涝程度比较弱且对平均值的依赖性较大, 所以对于降水空间分布极不均匀的太湖地区不宜使用 *PAI* 指标; *SPI* 考虑了降水频率分布的离散程度, 而且又进行了正态标准化处理, 但是该指标和 *PAI* 存在着同样的缺点, 即没有多时间尺度应用的特性, 以不同时间步长得出的结果不一致, 不具有可比性; *Z* 指数法对降水量也进行了正态化处理, 通过偏态系数、均方差等特征反映出了降水分布的情况, 具有多时间尺度特性, 分别以月和季度作为时间步长得出的结果与实际情况基本一致, 精度很高, 可以被防汛抗旱部门用来指导防汛抗旱工作^[7]。

当前的干旱研究还主要集中在定性方面, 指标适用范围小, 具有区域性, 还没有统一的干旱指标; 不同地方、不同部门都使用各自的指标, 为协调各部门防汛抗旱工作带来很多的麻烦; 而且影响干旱的因素很多, 要建立一套全国适用的指标体系就必须考虑这些因素的影响。所以在今后的研究工作中, 还需要进一步完善干旱指标体系。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙荣强. 干旱定义及其指标评述[J]. 灾害学, 1994, 9(1): 17-21.
- [3] 董海滨, 陆宝宏, 周祥林. 关于降水干旱指标的设想[J]. 水文, 2005(2): 4-8.
- [4] 冯平, 李绍飞, 王仲珏. 干旱识别与分析指标综述[J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 13-15. (下转第 15 页)

(10):1391-1405.

- [11] DeVANTIER B A ,LAROCC B E. Modeling Sediment-induced density currents in sedimentation basin[J]. ASCE Jour of Hydraulic Eng ,1987 ,113(1) 80-94.
- [12] BRETSCHER U ,KREBS P ,HAGER W H. Improvement of flow in final settling tanks[J]. ASCE Jour of Enviromental Eng ,1992 ,118(3) 307-321.
- [13] TA T C. Current role of CFD in the design of clarifiers used in water and waste water industries[J]. ASME ,Pressure Vessels and Piping Division 2001 431 :11-15.
- [14] LAINE S ,PHAN L ,PELLARIN P ,et al. Operating diagnostics on a flocculator-settling tank using fluent CFD software[J]. Water Sci Technol ,1999 39(4) :155-162.
- [15] WEISS G J ,GEBHARD J ,MICHELBAACH S. Vortex separator : dimensionless properties and calculation of annual separation efficiencies[J]. Water Sci Technol ,1996 33(9) : 277-284.
- [16] SPENCE S. Performance prediction of screens through flow modeling[J]. Water Services 2001 104(2) :14-15.
- [17] REDDY ,SANJAY. Computer simulation : Reducing cost of chlorine in wastewater plant[J]. Chem Eng World ,2003 38(4) :66-67.
- [18] DO-QUANG Z ,COCKX A ,LAINE J M ,et al. Applying CFD modelling in order to enhance water treatment reactors efficiency : Example of the ozonation process[J]. Water Sci Technol : Water Supply 2001 4(4) :125-130.
- [19] EVANS H ,BAUER M ,GOODMAN N ,et al. The role of ozone in improving drinking water quality in London and Oxford[J]. Ozone : Science and Engineering ,2003 25(5) : 409-416.
- [20] MURRER E ,JOHN G ,GUNSTEAD S ,et al. Development of an ozone contact tank simulation model[J]. Ozone : Science and Engineering ,1995 17(6) : 607-617.
- [21] JANEX M L ,SAVOYE P ,DO-QUANG Z ,et al. Impact of water quality and reactor hydrodynamics on wastewater disinfection by UV ,use of CFD modeling for performance optimization[J]. Water Sci Technol ,1998 38(6) : 71-78.
- [22] BLATCHLEY ,ERNEST R III ,Do - Quang ,et al. Process modeling of ultraviolet disinfection[J]. Water Sci Technol , 1998 38(6) : 63-69.
- [23] JANEX M L ,NACE A ,DO-QUANG ,et al. UV fluence rate evaluation in a UV system : Simulating the impact of operating and design parameters[J]. Inter Water and Irrigation ,2003 , 23(2) :17-20.
- [24] WOOD M G ,GREENFIELD P F ,HOWES T ,et al. Computational fluid dynamic modelling of wastewater ponds to improve design[J]. Water Sci Technol ,1995 31(12) :111- 118.
- [25] VEGA G P ,PENA M R ,RAMIREZ C ,et al. Application of CFD modelling to study the hydrodynamics of various anaerobic pond configurations[J]. Wat Sci Technol 2003 48

(2) :163-171.

- [26] SALTER H E ,TA C T ,OUKI S K ,et al. Three-dimensional computational fluid dynamic modelling of a facultative lagoon [J]. Wat Sci Technol 2000 42(10-11) :335-342.
- [27] PENNA M R ,MARA D D ,SANCHEZ A. Dispersion studies in anaerobic ponds : Implications for design and operation[J]. Water Sci Technol 2000 42(10-11) : 273-282.
- [28] KRETSEER D ,MATTHEWS B ,WILLIAMS M ,et al. Use of computational fluid dynamics to investigate natural and mechanically induced flows in an aerated lagoon[J]. Tappi Journal 2003 4(4) :12-14.
- [29] SHILTON A. Potential application of computational fluid dynamics to pond design[J]. Water Sci Technol 2000 42(10 -11) : 327-334.
- [30] KARAMA A B ,ONYEJEKWE O O ,BROUCKAERT C J ,et al. Use of computational fluid dynamics (CFD). Technique for evaluating the efficiency of an activated sludge reactor [J]. Water Sci Technol ,1999 39(10-11) : 329-332.
- [31] COCKX A ,DO-QUANG Z ,AUDIC J M ,et al. Global and local mass transfer coefficients in waste water treatment process by computational fluid dynamics[J]. Chem Eng and Pro 2001 40(2) :187-194.
- [32] 张庄. 沉沙池水力特性与悬浮物去除率[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑 ,1997 ,12(2) 217-225.
- [33] 蔡金榜. 沉淀池水流流态的数值模拟及结构优化研究 [D]. 南京 :河海大学 2002.
- [34] 何国建. 沉淀池重要结构参数研究 [D]. 南京 :河海大学 2004.
- [35] 詹咏. 水流对混凝沉淀的影响 [D]. 南京 :河海大学 , 2002.
- [36] 季民 ,董广瑞. 移动床生物膜反应器水力特性的数值模拟 [J]. 中国给水排水 2002 18(5) :14-17.
- [37] 庞虹 ,姚征. 大型海水淡化装置流场数值模拟及其优化 [J]. 地质灾害与环境保护 2004 15(1) 37-41.
- [38] 毛劲乔. 曝气池气液两相数学模型的建立与应用 [D]. 南京 :河海大学 2002.
- [39] 张小可 ,姚彤. 海水脱硫曝气池流场的 CFD 分析 [J]. 动力工程 2004 24(2) 276-279.

(收稿日期 2004-09-16 编辑 高渭文)

(上接第 10 页)

- [5] 张强 ,鞠笑生 ,李淑华. 三种干旱指标的比较和新指标的确定 [J]. 气象科技 ,1998(2) 48-52.
- [6] 耿玉琴. 太湖流域降雨时空分布规律分析 [J]. 海河水利 2003(3) 33-35.
- [7] 周文智. 中国水旱灾害 [M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,1997 311-312.
- [8] 黄道友 ,彭廷柏 ,王克林. 应用 Z 指数方法判断南方季节性干旱的结果分析 [J]. 中国农业气象 2003 24(4) :12- 15.

(收稿日期 2005-09-15 编辑 高渭文)