

新疆阿克苏河流域的干湿特征分析

颜乐, 夏自强, 丁琳, 黄峰, 周艳先

(河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘要: 结合新疆阿克苏河流域1960–2011年4个气象站逐月降水资料, 利用 Z 指数进行干湿情况分析, 划分了干湿等级。运用MK非参数检验方法、分摊熵和Morlet小波分别对不同时间尺度(年、季、月)干湿趋势变化以及流域的干湿周期规律进行分析。结果表明: 在20世纪90年代左右存在由干到湿的转变过程; 月尺度上, 各站 Z 指数总体呈不显著上升趋势; 季尺度上, 秋季 Z 指数呈显著上升趋势, U 值通过了95%的显著性检验; 年尺度上, 各站 Z 指数总体呈显著上升趋势; 阿克苏河流域存在14年左右的年代干湿周期和5年左右的年际干湿周期。

关键词: 干湿; Z 指数; 干湿趋势; 干湿周期; 阿克苏河流域

中图分类号: P338.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)01-0042-06

Analysis of dry and wet characteristics of Aksu river basin in Xinjiang

YAN Le, XIA Ziqiang, DING Lin, HUANG Feng, ZHOU Yanxian

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Combining the monthly precipitation data of four weather stations from 1960 to 2011 in Aksu River Basin, the paper divided dry and wet levels by Z index and analyzed the dry-wet trend and dry-wet cycle regularity in different time scales (annual, quarterly, monthly) by using the MK non-parametric test, apportionment entropy and Morlet wavelet method. The results show that in the 1990s, there was a process from dry to wet; on monthly scale, Z index of each station is not significant upward trend in general; on quarter scale, Z index in autumn shows a significant upward trend, the value of U passes the significance test of 95%; on annual scale, Z index of each station shows a trend of significant increase; there are about 5 years dry-wet cycles and 14 years interannual dry-wet cycles in Aksu river basin.

Key words: dry and wet; Z index; dry-wet trend; dry-wet cycle; the Aksu river basin

在全球气温升高的背景下, 西北地区气候正由暖干向暖湿转变。而天山南北是主要的变化区域之一, 新疆阿克苏河流域恰好在其范围内, 该地区的干旱特征也在转变^[1]。多年来有关干旱方面的问题一直受到专家、学者的关注, 王新龙^[2]、黄道友^[3]等研究表明 Z 指数法可较好的反应干旱规律以及干旱的严重程度。干旱严重困扰着我国经济社会的发展, 尤其对农业生产的影响最大, 而阿克苏河流域是新疆重要的农作物基地, 尤其对小麦、玉米、棉花等作物的生长十分有利。阿克苏河流域受气候变化与下垫面的影响较为显著, 开展地区干湿变化研究对该流域的农业发展极为重要。

1 研究区概况

阿克苏河流域位于天山中段南麓西部地区、塔里木盆地西北边缘, 范围介于东经 $75^{\circ}35'$ ~ $80^{\circ}59'$,

北纬 $40^{\circ}17'$ ~ $42^{\circ}27'$ 之间, 流域面积约5.0万 km^2 , 其中境内面积3.1万 km^2 , 境外面积1.9万 km^2 ^[4]。阿克苏河流域地处欧亚大陆腹地, 水汽主要来源于西风环流, 降水主要集中在山区, 且东部多、西部少; 垂直地带分布显著, 具有干旱地区河川径流补给的垂直地带性和多样性的典型特征^[5]。流域地势从北向南, 从西向东逐渐降低, 地貌分带较为明显^[6]。根据流域的气候特点, 划定3–5月为春季, 6–8月为夏季, 9–11月为秋季, 12–2月为冬季。阿克苏河流域水系图如图1所示。

2 资料与方法

2.1 资料来源

为了研究阿克苏河整个流域的干湿状况, 建立均一、稳定的气象序列, 且使之具有代表性。本文选

收稿日期: 2013-10-19; 修回日期: 2013-11-08

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201001052); 2011年度国家社科基金重大项目(11&ZD168)

作者简介: 颜乐(1989-), 女, 山东省章丘市人, 硕士研究生, 研究方向: 生态水文与水环境保护。

用阿克苏河流域附近的 4 个分布均匀、记录比较齐全的气象站点(阿克苏、阿拉尔、柯坪、阿合奇)1960-2011 年 52 a 的逐月降水资料。数据主要来自中国气象局国家气象信息中心。气象站点信息见表 1。4 个气象站点降水的年内分配见图 2。

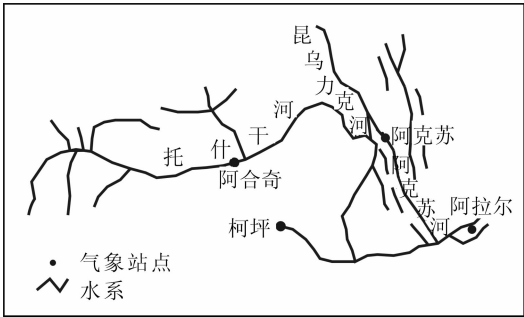


图 1 阿克苏河流域水系图

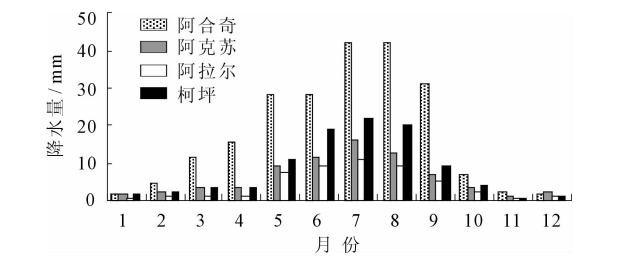


图 2 新疆阿克苏河流域降水年内分配图

2.2 研究方法

2.2.1 Z 指数法 Z 指数法^[7]假设某时段的降水

量服从 P - III 型分布,通过对月降水量、年降水量的标准化处理,将概率密度函数转变为标准正态分布,再根据得出的 Z 值进行干旱程度判定。具体的计算公式如下:

$$Z_i = \frac{6}{C_s}(\frac{C_s}{2}\psi_i)^{1/3} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6}$$
 (1)

式中: ψ 为降水的标准化变量; C_s 为偏态系数。 ψ 及 C_s 的计算公式为

$$\varphi_i = \frac{x_i}{x}$$
 (2)

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n\delta^3}$$
 (3)

式中: x_i 为降水量; $\bar{x}$ 为降水量均值; δ 为样本均方差; n 为样本数。

根据以上公式计算出的 Z 值,可根据 Z 的正态分布曲线划分干湿等级。由于新疆阿克苏流域属于西北干旱区,干旱区主要以干旱为主,因此在划分洪涝等级时只能说明是多雨。西北干旱区的降水量比较少,为了得到比较合理的频率分布,一般要求异常多雨和异常干旱所占比例分别为 1%,明显多雨和大旱所占比例分别为 4%,多雨和干旱所占比例分别为 10%,偏雨和偏旱所占比例分别为 15%,正常所占比例为 40%,将 Z 指数的干旱等级重新划定,见表 2, Z 指数应用在西北地区具有较好的结果^[8-9]。

表 1 阿克苏河流域气象站点表

站点	位置 (经度 E, 纬度 N)	多年平 均降水量	C_v	C_s	海拔	数据长度 年份
阿克苏	(80°14', 41°10')	73.55	0.45	0.88	11038	1960 - 2011
阿合奇	(78°27', 40°56')	216.86	0.35	0.71	19849	1960 - 2011
阿拉尔	(81°03', 40°30')	49.05	0.45	0.30	10122	1960 - 2011
柯 坪	(79°03', 40°30')	96.38	0.47	0.98	11618	1960 - 2011

表 2 重新确定的 Z 指数干湿等级标准

等级	Z 值	类型
1	$Z > 2.0$	异常多雨
2	$1.645 < Z \leq 2.0$	明显多雨
3	$1.037 < Z \leq 1.645$	多雨
4	$0.542 < Z \leq 1.037$	偏雨
5	$-0.542 < Z \leq 0.542$	正常
6	$-1.037 < Z \leq -0.542$	偏旱
7	$-1.645 < Z \leq -1.037$	旱
8	$-2.0 < Z \leq -1.645$	大旱
9	$Z \leq -2.0$	异常旱

2.2.2 分摊熵 利用分摊熵(A_E)度量降水年内分配的不均匀性,计算公式为^[10]:

$$A_E = - \sum_{i=1}^{12} P_i \log_2 P_i = - \sum_{i=1}^{12} \frac{r_i}{R} \log_2 \frac{r_i}{R}$$
 (4)

式中: r_i 为第 i 个月降水量; R 为全年降水量。
分摊熵的取值范围为 0 ~ log₂12。分摊熵的值越大,表明降水的年内分配愈均匀;分摊熵的值越小,表明降水的年内分配愈不均匀。当年降水量全部集中在某一个月时, A_E 值最小为 0;当每个月的降水量均占全年降水量的 1/12 时, A_E 的值最大为 log₂12。

2.2.3 Mann - Kendall 法 非参数统计检测方 Mann - Kendall 法简称 MK^[11-12],它的优点是不需要样本遵循一定的分布,也排除少量异常值的干扰,计算方法比较简便。在 MK 检验中,对于具有 n 个样本的时间序列 $X_i = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$,先确定所有对偶值的大小关系。趋势检验的统计量 S 为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{5}$$

S 为正态分布,其均值为 0,方差 $\text{Var}(S) = n(n - 1)(2n + 5)/18$ 。当 $n > 10$ 时,标准的正态统计变量通过下式计算:

$$U = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{6}$$

在给定的显著性水平 α 下,如果 $|U| \geq U_{1-\alpha/2}$,拒绝原假设,即在 α 的置信水平上,时间序列存在明显的上升或下降趋势,反之,认为趋势不明显。其绝对值大于等于 1.64、1.96、2.58 时分别表示通过了置信度为 90%、95% 和 99% 的显著性检验。

2.2.4 小波分析法 小波分析^[13]是经典傅立叶方法的突破,但它与经典的傅立叶分析存在很大不同,经典傅立叶是一种纯频域分析,而小波分析是一种时域 - 频域分析,它能够分析时间序列的局部变化特征,更清楚的看到序列随时间的变化情况,因此在气候分析中得到广泛地应用,同时小波分析是水文学的研究中也是比较成熟的方法^[14-17]。

采用 Morlet 小波作为母小波函数,其定义为:

$$\psi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \tag{7}$$

式中: c 为常数; i 为虚部。

对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变化为:

$$\begin{aligned} W_f(a,b) &= \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \\ &= |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \end{aligned} \tag{8}$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波系数; $f(t)$ 为个分析信号函数; a 为尺度因子; b 为平移因子。

定义小波方差为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{W_f(a,b)\}^2 db \tag{9}$$

式中: $\text{Var}(a)$ 为小波方差; $W_f(a,b)$ 为小波系数。

3 结果分析

3.1 干湿年际变化特征分析

流域各站点不同年代的干旱频次见表 3。由表 3 可以看出:1970s 以前,各站点干旱发生频次基本相同;1980s 阿拉尔站的干旱频次最少,仅为 1 次,其他各站点基本相同;1990s 之前干旱发生的次数明显多于 1990s 之后。这与施雅风^[1]等人关于西北地区在 1987 年由暖干向暖湿转化的观点一致。21 世纪以来阿克苏站与阿拉尔站的干旱频次高于其他两个站点。

表 3 不同年代的干旱发生频次

	阿合奇	阿克苏	阿拉尔	柯坪
1960 - 1969	3	3	4	4
1970 - 1979	4	3	5	5
1980 - 1989	3	3	1	3
1990 - 1999	0	0	0	1
2000 - 2009	0	2	3	0
2010 - 2011	0	0	0	0

3.2 干湿年内变化特征分析

利用分摊熵可以分析降水的年内分配的均匀程度,同时也可以用来分析该流域 4 个站点的年内干湿变化特征,图 3 为流域站点的分摊熵变化情况。对比 4 个站点的分摊熵变化情况可以看出:阿合奇站的各年的分摊熵明显低于其他站点,说明阿合奇站的干湿年内变化最为明显。

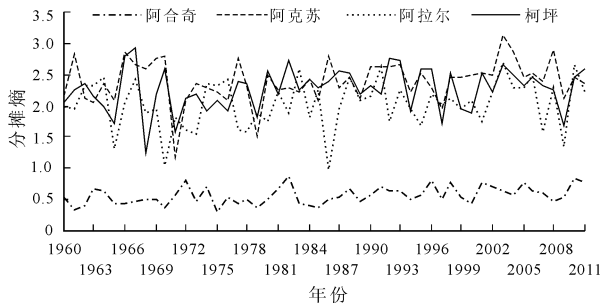


图 3 分摊熵年际变化系列图

3.3 干湿趋势分析

3.3.1 月尺度趋势分析 采用线性倾向率和 MK 法对流域各站各月的干湿的变化趋势进行分析,计算结果见表 4。由表 4 可看出:阿合奇站 7、9 - 10 月的 Z 指数呈显著上升趋势,干旱程度逐渐减轻, Z 指数每 10 年分别以 0.18、0.24、0.24 的速率增加,其他月份均呈现不显著上升趋势;阿克苏站 6、12 月

的 Z 指数呈显著上升趋势,干旱程度逐渐减轻, Z 指数分别以每 10 年 0.14、0.07 的速率增加,4、8 月的 Z 指数减少不显著,其他月份均呈现不显著增加趋势;阿拉尔站 5、9 月呈不显著减少趋势,其他月份呈不显著增加趋势;柯坪站仅 9 月份呈显著增加趋势,干旱程度逐渐减弱,线性倾向率为 0.22/10a,4、11 月呈不显著减少趋势,其他月份呈不显著增加趋势。

表 4 各站月 Z 指数变化趋势及显著性(线性倾向率为每 10 年变化值)

	阿合奇		阿克苏		阿拉尔		柯坪	
	线性倾向率	U 值	线性倾向率	U 值	线性倾向率	U 值	线性倾向率	U 值
1 月	0.01	-0.17	0.04	-0.02	0.06	1.10	0.05	0.05
2 月	0.08	0.77	0.13	0.92	0.07	0.82	0.10	1.44
3 月	0.08	0.85	0.05	0.48	0.04	-0.24	0.08	0.98
4 月	0.04	0.44	-0.01	-0.62	0.01	0.24	-0.02	-0.33
5 月	0.05	0.11	0.02	0.40	-0.03	0.25	0.02	0.21
6 月	0.01	-0.14	0.14	1.82 *	0.13	1.52	0.07	0.85
7 月	0.18	1.74 *	0.06	0.59	0.01	0.88	0.14	1.37
8 月	0.08	0.68	-0.03	-0.54	0.01	1.05	0.17	1.60
9 月	0.24	2.41 *	0.13	1.19	-0.01	-0.46	0.22	2.39 *
10 月	0.24	2.71 *	0.11	1.22	0.01	-0.16	0.08	1.32
11 月	0.04	0.98	0.05	0.99	0.01	0.64	-0.04	-0.30
12 月	0.08	1.43	0.07	1.97 *	0.01	1.05	0.08	1.19

注: * 表示通过了置信度 90% 的显著性检验。

3.3.2 季尺度趋势分析 利用 Z 指数计算方法,可以计算出阿克苏河流域 1960 – 2011 年各季的 Z 指数,对新疆阿克苏河流域近 52 年各季节干湿趋势进行分析, Z 指数各季变化的线性倾向率、 U 值如表 5 所示。从表 5 中可以看出:阿合奇站秋季 Z 指数呈显著上升趋势,线性倾向率为 0.28/10a,干旱程度逐渐减轻,其他季节的 Z 指数呈不显著上升趋势,这与该站 9、10 月份的显著上升趋势相对应;阿克苏站秋季的 Z 指数呈显著上升趋势,线性倾向率为 0.17/10a,其他季节呈不显著增加趋势;阿拉尔站夏

季的 Z 指数呈显著上升趋势,线性倾向率为 0.18/10a,春季和秋季呈不显著下降趋势,这可能是 12 ~ 1 月、9 ~ 11 月 Z 指数呈不显著上升的结果,冬季呈不显著增加趋势;柯坪站除春季外都呈显著上升的趋势,线性倾向率分别为 0.22/10a、0.20/10a、0.18/10a。这与高惠芸^[18] 等人研究的阿克苏河流域降水的季节变化特征有很好的一致性。春季和夏季是生产、生活用水的高峰时期,从表 5 可以看出,春夏季阿克苏流域北部比南部湿润,夏季更为明显。

表 5 四季 Z 指数变化趋势统计表(线性倾向率为每 10 年变化值)

	阿合奇		阿克苏		阿拉尔		柯坪	
	线性倾向率	U 值	线性倾向率	U 值	线性倾向率	U 值	线性倾向率	U 值
春季	0.08	0.43	0.07	0.84	-0.01	0.06	0.06	0.40
夏季	0.12	1.21	0.08	1.12	0.18	2.08 *	0.22	2.22 *
秋季	0.28	3.41 *	0.17	2.13 *	-0.04	-0.18	0.20	2.43 *
冬季	0.02	0.13	0.15	1.53	0.14	1.62	0.18	2.07 *

注: * 表示通过了置信度 90% 的显著性检验。

3.3.3 年尺度趋势分析 采用 MK 法和线性倾向率对年 Z 指数的变化趋势进行分析,计算结果见表 6。由表 6 可以看出,仅阿合奇站和柯坪站通过了 95% 的显著性检验, Z 指数呈显著上升趋势,以每 10 年 0.28 的速率增加,其他 2 个站都没有通过显著性检验。利用 Arcgis 中的泰森多边形进行空间分析,结果如图 4

所示,颜色越深表示干旱越严重。从图中可以明显地看出东部地区的干旱程度比西部严重。21 世纪以来,降水量的增加使得干旱发生次数明显减少。由于近年来人们不断扩大耕地面积,不断增大灌溉引水量,导致平原区的蒸发量、空气湿度不断增大,当存在较好的降水环流条件时,就会导致较多的降水^[9],从

而使得近几年的干旱程度不断减弱。

表 6 各站年 Z 指数变化趋势及显著性

	阿合奇	阿克苏	阿拉尔	柯坪
线性倾向率 (每 10 年变化)	0.28	0.17	0.11	0.28
U 值	3.02*	1.54	1.21	2.87*

注：* 表示通过了置信度为 90% 的显著性检验。

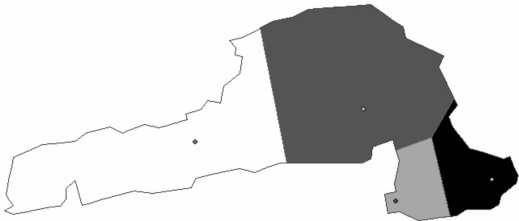


图 4 阿克苏河流域泰森多边形图

3.4 干湿周期分析

为了进一步研究阿克苏河流域内的干湿变化情况，对年 Z 指数做小波分析。

由图 5 可以看出，该流域近 52a 来 Z 指数的主要变化周期。图中实线表示小波系数为正值，说明处于偏雨时期，气候比较潮湿，虚线表示小波系数为负值，说明处于偏旱时期。以阿拉尔站为例，从图 5(a)中可以看出，存在小尺度周期变化嵌套在大尺

度下的复杂结构现象，近 52a 来，流域内交替出现了多个干旱期和湿润期，干旱指数 Z 指数的周期性比较明显，在整个时间序列上存在 5、7a 的短周期，以及 14a 的长周期，其在短周期尺度上，5a 周期在 21 世纪之前比较显著，到 21 世纪之后 7a 周期比较显著。在长周期尺度上，经历了 4 个干旱期和 3 个湿润期，1963 - 1973 年为偏旱期，1973 - 1975 年为偏雨期，1975 - 1983 年为偏旱期，1983 - 1987 年为偏雨期，1987 - 1995 年为偏旱期，1995 - 2003 年为偏雨期。从 2003 - 2010 年小波系数等值线图都没有闭合，且刚刚进入正值区，即刚刚进入湿润时期，表明这种湿润趋势将继续下去，未来几年流域将会出现一个短暂的湿润期。

由小波方差图(图 6)可看出，阿拉尔站 Z 指数距平序列存在 2 个峰值，分别为 5、14a 周期，其中 5a 峰值最大，周期振荡最明显，说明阿拉尔站 Z 指数距平的主周期为 5a。阿合奇站小波方差图存在 5、9a 两个峰值，其中 5a 峰值最大，周期振荡最明显，表明阿合奇站 Z 指数距平主周期为 5a。柯坪站只有一个峰值，因此 7a 为其主周期。阿克苏站有两个峰值，8a 为其主周期。上述研究与孙晓娟^[19]等人对于阿克苏河流域的气候周期变化具有很好的一致性。

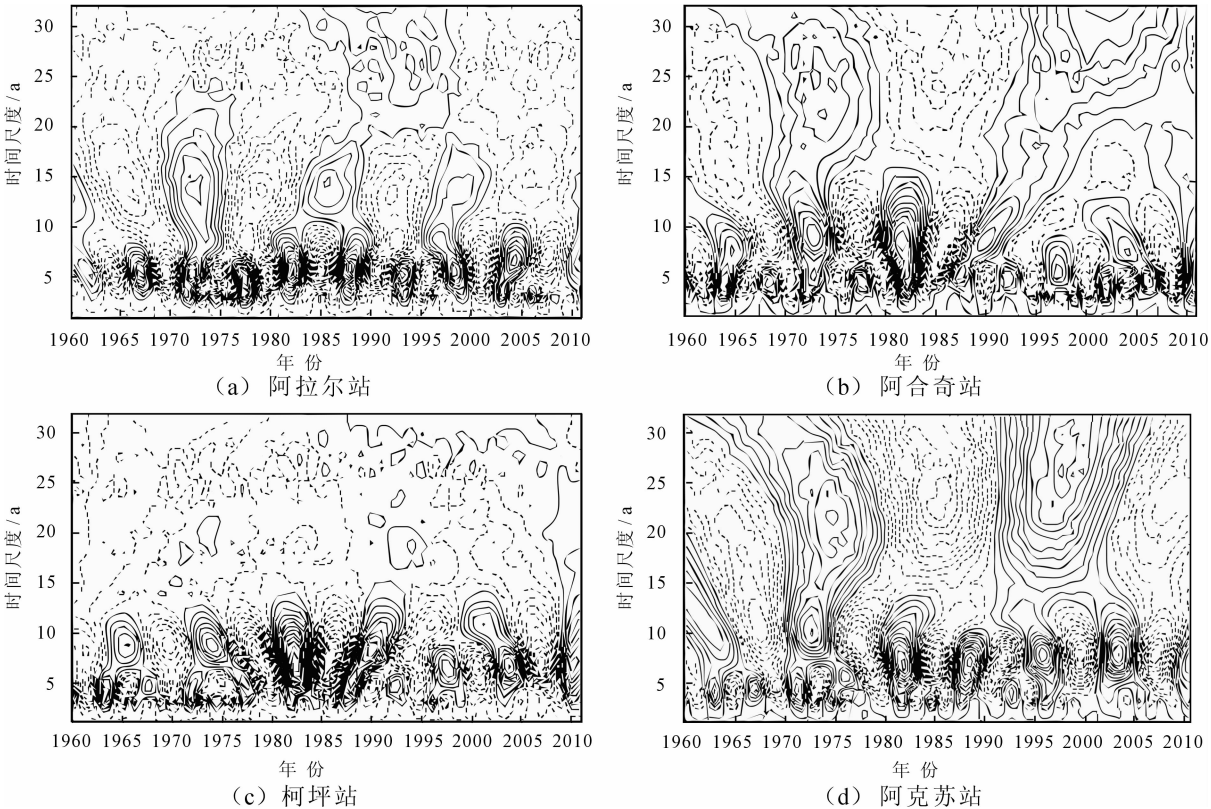


图 5 各水文站 Z 指数序列小波变换系数实部等值线图

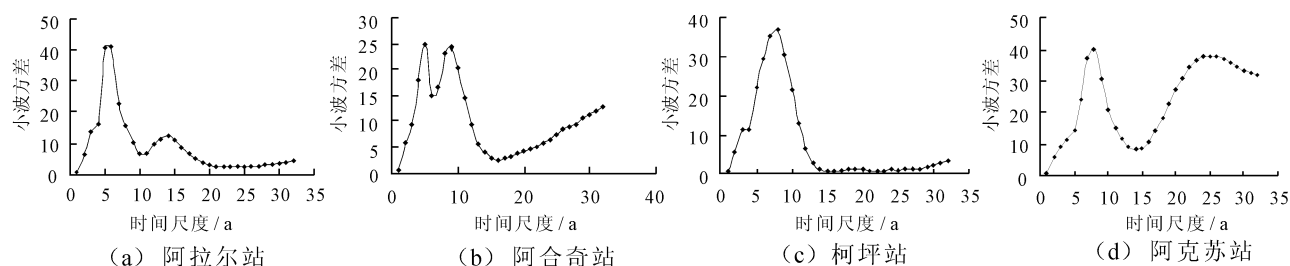


图6 新疆阿克苏流域Z指数距平序列小波方差图

5 结 语

基于4个气象站1960–2011年的逐月降水资料,分析新疆阿克苏河流域的干湿趋势变化和周期变化,得出以下结论:统计4个站点52年的干湿情况,通过计算发现干旱主要集中在20世纪90年代之前,而在90年代之后逐渐向湿润转变;月尺度上阿克苏河流域Z指数总体呈现不显著上升趋势,个别月份呈现显著上升趋势和不显著下降趋势;季尺度上,秋季Z指数总体呈显著上升趋势;年尺度上,Z指数总体呈显著上升趋势;阿克苏河流域存在5a、7a~8a及14a 3个时间尺度的振荡周期,存在小尺度周期变化嵌套于大尺度周期变化的结构。干旱严重影响了农业生产、生态保护和环境保护,因此需要制定出长远的发展战略。根据该地的干湿年际年内和周期变化情况,发展适宜的工业和农业,提高生产力水平,重视水资源的开发、利用、治理,注重环境保护和生态建设。目前国内判别干旱的指标很多,本文仅用Z指数指标分析干旱,未与其他干旱指标进行对比分析,且干旱等级划分指标主要以降水为主,尚未与农业结合,还需要做进一步研究和分析。

参考文献:

- [1] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [2] 王新龙,钟平安,万新宇,等. 淮河流域洪涝时空分布规律[J]. 水电能源科学,2013,31(3):45–49.
- [3] 黄道友,彭廷柏,王克林,等. 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.
- [4] 蒋艳,周成虎,程维明. 阿克苏河流域径流补给及径流变化特征分析[J]. 自然资源学报,2005,20(1):27–34.
- [5] 汤奇成,曲耀光,周聿超. 中国干旱区水文及水资源利用[M]. 北京:科学出版社,1992:80.
- [6] 沈永平,王国亚,张建岗,等. 人类活动对阿克苏河绿洲气候及水文环境的影响[J]. 干旱区地理,2008,31(4):524–534.
- [7] 赵春雨,戴廷仁,李晶. 辽宁两种气候旱涝指标的确定及其旱涝分布[J]. 辽宁气象,1999(1):31–32.
- [8] 张存杰,王宝灵,刘德祥,等. 西北地区旱涝指标的研究[J]. 高原气象,1998,17(4):381–389.
- [9] 任朝霞,杨达源. 西北干旱区近50a旱涝时空变化及其防御措施研究[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(6):118–121.
- [10] Maruyama T, Kawachi T, Singh V P. Entropy – based assessment and clustering of potential water resources availability[J]. Journal of Hydrology,2005,309(1~4):104–113.
- [11] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,1990.
- [12] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:62–72.
- [13] 高新全. 年代际–世纪时间尺度气候系统的演变特征及其数值模拟[D]. 兰州:兰州大学,2002.
- [14] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [15] Torrence C, Compo G P A. practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998,79(1):61–78.
- [16] 黄峰,夏自强,张楠. 宜昌站主汛期流量及水温变化多时间尺度分析[J]. 水电能源科学,2010,28(4):16–18.
- [17] 郭文献,夏自强,王鸿翔,等. 近50年来长江宜昌站水温变化的多尺度分析[J]. 水利学报,2008,39(11):1197–1203.
- [18] 高惠芸,杨青,梁岩鸿. 新疆阿克苏河流域降水的时空分布[J]. 干旱区研究,2008,25(1):70–74.
- [19] 孙晓娟,赵成义,郑金丰. 阿克苏河流域近46年气候变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(3):78–83.