

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20180446

径流丰枯分类的投影寻踪-集对分析耦合方法

郑 威, 于国荣, 张代青

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要:针对集对分析的年径流丰枯分类方法未考虑不同时段对径流丰枯贡献的不同,将投影寻踪技术和集对分析方法互补耦合,探讨径流丰枯分类。首先根据径流年内分配赋予权重因子,利用投影寻踪法求得加权联系数;然后应用集对分析方法判断年径流的丰枯等级;最后以宜昌地区年径流为数据资料进行案例研究。结果表明:与径流丰枯分类的集对分析方法比较,投影寻踪和集对分析耦合方法解决径流丰枯分类问题更加客观、准确。

关键词:投影寻踪;集对分析;加权联系数;丰枯分类;径流

中图分类号:P333.9

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2020)02-0017-06

河流水资源蕴藏量是规划兴建水利工程和流域水资源合理开发和高效利用的重要依据,特别是河川径流丰枯变化直接影响河流生态环境需水和社会经济供水变化过程,则与生态、生产和生活等“三生需水”息息相关。因此,研究河流流域径流丰枯分类与变化,对于河流水资源开发、利用和管理具有重要意义^[1]。

关于河川径流的丰枯划分,常用方法有均值标准差法、频率分析法^[2]、灰色分类法^[3]、模糊聚类法^[4]、投影寻踪法^[5-7]和集对分析法(set pair analysis, SPA)^[8-9]等。其中,集对分析法作为一种新兴的数学分析方法,已成功应用于河川径流的丰枯划分,文献[10]将集对分析法与传统方法的分类结果进行对比。结果表明,集对分析法更能准确的反映年径流丰枯的实际情况,但基于集对分析的年径流丰枯分类一般只考虑径流的时程分配信息^[11],未考虑不同时段径流大小对年径流丰枯贡献的比重,不利于探讨河川径流丰枯变化的研究机理。因此,本文基于集对分析方法和投影寻踪法的耦合互补性,提出了与投影寻踪法耦合互补的加权集对分析法,并结合径流年内分配赋予的权重因子,利用投影寻踪法推求加权联系数,应用集对分析方法确定年径流的丰枯等级,有效实施径流丰枯等级的科学分类。

1 基本理论

1.1 集对分析原理

集对分析将一个不确定系统中两个有关联的集合组合成一个集对 $H(X, Y)$, 是对集对中两个集合的确定性与不确定性及其相互作用所进行的一种系统和数学分析,从而得到两个集合之间的同一性、差异性和对立性关系^[13-14]。

1.2 投影寻踪理论

投影寻踪法将高维数据投影到低维空间上并通过分析低维空间上的数据变化规律来反映高维数据的特征。具体运用中,采用投影指标函数来描述投影暴露原系统某种分类排序结构的可能性大小,并寻找出使投影指标函数达到最优的投影值,最后通过投影值来分析高维数据的分类结构特征^[15-16]。

2 投影寻踪与集对分析互补融合的径流丰枯分类

由于不同时段径流大小对年径流丰枯贡献不同,可以使用投影寻踪与集对分析融合的方法来实现年径流丰枯分类:首先利用投影寻踪法求出的最优投影方向作为年径流各个时段所占权重,然后应用集对分析构建加权联系度方程,最后通过综合评价指标判

收稿日期:2018-11-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51469009)

作者简介:郑威(1996-),男,湖北秭归人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:18401679718@163.com

通讯作者:于国荣(1979-),女,黑龙江庆安人,副教授,主要从事水文水资源研究。E-mail:yuguorong77@163.com

断各年径流的分类。

具体来说,设 $x_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$) 为第 i 个样本的第 j 个指标值,其中 n 为总年数, m 为指标总数,这里指一年中的总时段数。步骤如下:

(1)确定分类数。本文将其分为特丰、丰、平、枯、特枯 5 类。

(2)确定各个时段的径流分类标准。本文采用均值标准差法来划分 5 类分类之间的标准,分别对应区间为 $[0, \bar{x}_j + k_1 s_j)$ 、 $[\bar{x}_j + k_1 s_j, \bar{x}_j + k_2 s_j)$ 、 $[\bar{x}_j + k_2 s_j, \bar{x}_j + k_3 s_j)$ 、 $[\bar{x}_j + k_3 s_j, \bar{x}_j + k_4 s_j)$ 、 $[\bar{x}_j + k_4 s_j, +\infty)$,其中 \bar{x}_j, s_j 分别为各水文站的相同时段不同年份的径流的均值与均方差; k_1, k_2, k_3, k_4 为经验系数,经验系数采用平均取值法取值,其中 $k_1 = -0.9, k_2 = -0.3, k_3 = 0.3, k_4 = 0.9$ ^[17]。

(3)线性投影。设 $\hat{a} = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 为将 m 维指标的单位投影方向向量,并将其投影到一维线性空间,综合成某一投影方向的投影指标值 z_i 。

$$z_i = \sum_{j=1}^m a_j x_{i,j} \quad (2)$$

式中: z_i 为第 i 个样本的投影特征值; a_j 为方向向量 \hat{a} 的第 j 个变量值; $x_{i,j}$ 为第 i 个样本的第 j 个指标值。

(4)构造投影指标。通过式(2)的转换,样本间的区别变成了 $\{z_i\}$ 大小的差别。当类与类之间有显著差异时,即类间距离 $s(\hat{a})$ 较大,类内距离 $d(\hat{a})$ 较小时,获得的投影方向向量最优^[18]。基于此构造投影指标函数 $I(\hat{a})$:

$$I(\hat{a}) = s(\hat{a}) \times d(\hat{a}) \quad (3)$$

其中类间距离 $s(\hat{a})$ 用样本序列的投影特征值方差来计算:

$$s(\hat{a}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_a)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: \bar{z}_a 为在投影方向 \hat{a} 上的投影值的均值。

类内密度 $d(\hat{a})$ 用投影特征值之间的距离 $r_{i,k} = |z_i - z_k|$ 来表示:

$$d(\hat{a}) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_{i,k}) H(R - r_{i,k}) \quad (5)$$

式中: $H(R - r_{i,k})$ 为 Head 函数,当 $R > r_{i,k}$ 时, $H(R - r_{i,k}) = 1$; 当 $R < r_{i,k}$ 时, $H(R - r_{i,k}) = 0$; R 为密度窗宽,一般取 $(0.1 \sim 0.3)$ $s(\hat{a})$ ^[19]。

(5)优化投影方向。要寻求最佳的投影方向,必使投影指标函数值 $I(\hat{a})$ 最大,且同时满足 $\|\hat{a}\| = 1$ 。

(6)构建加权与理想分级的集对。将最佳投影方向

\hat{a} 中的各项除以各变量总和得到 \vec{b} :

$$\vec{b} = \left(\frac{a_1}{\sum_{j=1}^m a_j}, \frac{a_2}{\sum_{j=1}^m a_j}, \dots, \frac{a_m}{\sum_{j=1}^m a_j} \right) = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (6)$$

\vec{b} 中的第 j 个变量 b_j 作为一年中第 j 个时段的权重,将各时段数据按照步骤(2)中各时段的分类标准进行划分,得到五个集合特丰、丰、平、枯、特枯,再将每个集合中的时段的权重相加,得到加权五元集合 $A_i = (\alpha_1(x_i), \alpha_2(x_i), \alpha_3(x_i), \alpha_4(x_i), \alpha_5(x_i))$ 。理想条件下的集合记为集合 B ,根据特丰、丰、平、枯、特枯五个等级可以构建:

$$B_1 = (1, 0, 0, 0, 0), B_2 = (0, 1, 0, 0, 0), B_3 = (0, 0, 1, 0, 0), B_4 = (0, 0, 0, 1, 0), B_5 = (0, 0, 0, 0, 1)$$

(7)构建联系度方程。将集合 $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ 与集合 $B_k (k=1, 2, 3, 4, 5)$ 构成集对,距离为 1~3 的差异度标识符记为 d_1, d_2, d_3 。距离为 4 的差异度标识符记为 j ,得到联系度方程:

$$\mu_{A_i-B_k} = a + b_1 d_1 + b_2 d_2 + b_3 d_3 + c j \quad (7)$$

式中: $\mu_{A_i-B_k}$ 为集对 $H(A_i, B_k)$ 的联系度, a, b_1, b_2, b_3, c 由 A_i 中的元素决定。

(8)计算联系度方程,判断第 i 年的丰枯需要计算集合 $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ 与五种理想条件下的集合 $B_k (k=1, 2, 3, 4, 5)$ 的联系数:

$$\begin{cases} \mu_{A_i-B_1} = \alpha_1(x_i) + \alpha_2(x_i)d_1 + \alpha_3(x_i)d_2 + \alpha_4(x_i)d_3 + \alpha_5(x_i)j \\ \mu_{A_i-B_2} = \alpha_1(x_i)d_1 + \alpha_2(x_i) + \alpha_3(x_i)d_1 + \alpha_4(x_i)d_2 + \alpha_5(x_i)d_3 \\ \mu_{A_i-B_3} = \alpha_1(x_i)d_2 + \alpha_2(x_i)d_1 + \alpha_3(x_i) + \alpha_4(x_i)d_1 + \alpha_5(x_i)d_2 \\ \mu_{A_i-B_4} = \alpha_1(x_i)d_3 + \alpha_2(x_i)d_2 + \alpha_3(x_i)d_1 + \alpha_4(x_i) + \alpha_5(x_i)d_1 \\ \mu_{A_i-B_5} = \alpha_1(x_i)j + \alpha_2(x_i)d_3 + \alpha_3(x_i)d_2 + \alpha_4(x_i)d_1 + \alpha_5(x_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中: d_1, d_2, d_3 可采用均分原则取值^[17]、统计试验序列法^[20]、顺势取值法、逆势取值法、计算取值法、随机取值法^[12],本文采用均分原则取值,则 $d_1 = 0.5, d_2 = 0, d_3 = -0.5, j = -1$ 。根据集对分析方法原理,采用联系数最大准则来判断集合 $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的性质。

3 实例分析

本文以宜昌水文站为案例,选取该站 1950~2015 年共 66 年的逐月流量资料,应用常规法、单一的集对分析方法、投影寻踪和集对分析的互补融合方法分析其径流的丰枯分类。

3.1 常规法

以年平均径流量进行分类。径流分类分为 5 级,

分别对应区间 $[0, x+k_1s)$ 、 $[x+k_1s, x+k_2s)$ 、 $[x+k_2s, x+k_3s)$ 、 $[x+k_3s, x+k_4s)$ 、 $[x+k_4s, +\infty)$, 其中 x, s 分别为各水文站的年径流的均值与均方差; k_1, k_2, k_3, k_4 为经验系数, 其中 $k_1=-0.9, k_2=-0.3, k_3=0.3, k_4=0.9^{[17]}$ 。分类标准如表 1 所示。

表1 宜昌水文站年径流分类标准
Table1 The classification criteria of the annual runoff at the Yichang hydrometry station

类别	特枯	枯	平	丰	特丰
年平均 径流量 /m ³ ·s ⁻¹	≤12 249	<13 159.5	<14 069.9	<14 980.3	≥14 980.3

3.2 单一的集对分析法

根据均值标准差法确定各个时段的径流分类标准如表 2 所示。

并对样本中的指标进行分类, 最后将权重 $\vec{\beta}$ 与分类结果代入式(8)得到分类结果。

以 1998 年为例, 根据表 1 可将 12 月划分至集合特丰、丰、平、枯、特枯中, 划分结果如表 3 所示。

集对分析法将各个月份的权重视为相同, 则可以得到五元集合 $A_{1,1998}=(2/12, 1/12, 1/12, 6/12, 2/12)$, 再将 $A_{1,1998}$ 与理想条件下的集合 $B_k(k=1, 2, 3, 4, 5)$ 构成集对, 求得五种理想条件的联系数: $\mu_{A_{1,1998}-B_1}=-0.028333$,

表2 宜昌水文站各月径流分类(m³·s⁻¹)
Table2 The classification of the monthly runoff at the Yichang hydrometry station

类别	均值	均方差	特枯	枯	平	丰	特丰
1 月	4 558	828.97	≤3 812	<4 309	<4 807	<5 304	≥5 304
2 月	4 232	900.56	≤3 422	<3 962	<4 503	<5 043	≥5 043
3 月	4 729	1 122.86	≤3 719	<4 392	<5 066	<5 740	≥5 740
4 月	6 980	1 866.36	≤5 301	<6 421	<7 541	<8 661	≥8 661
5 月	11 923	2 676.93	≤9 514	<11 121	<12 727	<14 333	≥14 333
6 月	18 082	3 234.20	≤15 171	<17 112	<19 052	<20 993	≥20 993
7 月	29 801	6 094.41	≤24 316	<27 973	<31 630	<35 287	≥35 287
8 月	26 925	7 389.47	≤20 275	<24 709	<29 142	<33 576	≥33 576
9 月	24 803	6 853.56	≤18 635	<22 747	<26 859	<30 971	≥30 971
10 月	17 053	4 137.15	≤13 330	<15 813	<18 295	<20 777	≥20 777
11 月	9 961	1 771.57	≤8 368	<9 430	<10 493	<11 556	≥11 556
12 月	5 997	733.06	≤5 338	<5 778	<6 218	<6 657	≥6 657

表3 1998年各月丰枯集合分类
Table3 The monthly runoff set classification in 1998

集合名	包含月份
特丰	7 月、8 月
丰	9 月
平	5 月
枯	1 月、3 月、4 月、6 月、10 月、12 月
特枯	2 月、11 月

$\mu_{A_{1,1998}-B_2}=0.125000, \mu_{A_{1,1998}-B_3}=0.375000, \mu_{A_{1,1998}-B_4}=0.541667, \mu_{A_{1,1998}-B_5}=0.208333$ 。则通过单一的集对分析方法 1998 年被划分为枯水年。其他年份以此方法计算结果如表 4 所示。

3.3 投影寻踪和集对分析的互补融合方法

以设 $x_{i,j}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, 12)$ 为第 i 年 j 月径流量, n 为年数, 建立投影寻踪模型, 其中 $n=66, m=12$, 计算的最优投影方向为:

$\hat{a}=(0.12998, 0.14911, 0.21542, 0.20508, 0.20421, 0.18993, 0.44959, 0.45667, 0.36022, 0.42022, 0.14937, 0.23515)$

将最优投影方向代入式(5)得到各月的权重 $\vec{\beta}$:
 $\vec{\beta}=(0.04107, 0.04711, 0.06806, 0.06480, 0.06452, 0.06001, 0.14205, 0.14429, 0.11382, 0.13277, 0.04720, 0.07430)$

将集合中的各个月份的权重相加, 得到加权五元集合 $A_{2,1998}=(0.28634, 0.11382, 0.06452, 0.44101, 0.09431)$ 。再将 $A_{2,1998}$ 与理想条件下的集合 $B_k(k=1, 2, 3, 4, 5)$ 构成集对, 求得五种理想条件的联系数: $\mu_{A_{2,1998}-B_1}=0.028436, \mu_{A_{2,1998}-B_2}=0.242094, \mu_{A_{2,1998}-B_3}=0.341936, \mu_{A_{2,1998}-B_4}=0.377256, \mu_{A_{2,1998}-B_5}=-0.028436$ 。则利用投影-集对法 1998 年被划分为枯水年。其他年份的分类情况如表 4 所示。

从表 4 中可以看出, 三种分类结果具有一定程度的差异, 差异程度如表 5 所示。

从表 5 中可以看出投影-集对法与常规法分类结果虽然相异的年份较多, 但是差异度相差却很小, 投影-集对法与集对法的分类结果差异度相差较大, 因为长江地区径流量季节变化大, 汛期的来水远远高于非汛期, 因此在进行加权计算后与集对法结果在差异度上较大。

对 2002 年径流过程进行分析, 集对法、投影-集对法的分类结果分别为: 丰水年、特枯水年。2002 年的月丰枯情况如图 1 所示:

采用单一的集对分析法得到的丰枯五元集合为

表4 径流丰枯分类成果
Table4 The results of the runoff classification

年份	年均流量/m ³ ·s ⁻¹	投影-集对法	集对法	常规法	年份	年均流量/m ³ ·s ⁻¹	投影-集对法	集对法	常规法
1950	14 415	平	平	丰	1983	15 091	丰	平	特丰
1951	14 025	平	平	平	1984	14 315	平	平	丰
1952	14 934	丰	特枯	丰	1985	14 125	平	平	丰
1953	12 748	平	平	枯	1986	12 095	枯	枯	特枯
1954	18 240	特丰	特丰	特丰	1987	13 662	平	枯	平
1955	14 503	平	平	丰	1988	13 378	枯	枯	平
1956	13 159	枯	枯	枯	1989	15 148	丰	平	特丰
1957	13 631	平	平	平	1990	14 174	平	平	丰
1958	13 141	平	枯	枯	1991	13 764	平	平	平
1959	11 625	枯	枯	特枯	1992	13 007	平	平	枯
1960	12 781	平	枯	枯	1993	14 572	平	平	丰
1961	13 956	丰	丰	平	1994	11 017	枯	枯	特枯
1962	14 733	平	平	丰	1995	13 397	平	平	平
1963	14 337	平	平	丰	1996	13 369	平	平	平
1964	16 489	丰	丰	特丰	1997	11 518	枯	枯	特枯
1965	15 606	丰	丰	特丰	1998	16 583	枯	枯	特丰
1966	13 622	枯	枯	平	1999	15 287	平	平	特丰
1967	14 269	平	平	丰	2000	14 923	丰	平	丰
1968	16 339	特丰	丰	特丰	2001	13 169	平	丰	平
1969	11 566	枯	枯	特枯	2002	12 447	特枯	丰	枯
1970	13 319	枯	枯	平	2003	12 991	枯	枯	枯
1971	12 345	枯	枯	枯	2004	13 114	平	平	枯
1972	11 313	枯	枯	特枯	2005	14 565	平	平	丰
1973	13 571	枯	枯	平	2006	9 035	特枯	特枯	特枯
1974	15 886	丰	平	特丰	2007	12 701	枯	平	枯
1975	13 653	平	平	平	2008	13 262	平	平	平
1976	12 948	枯	枯	枯	2009	12 124	枯	丰	特枯
1977	13 409	枯	枯	平	2010	12 828	平	平	枯
1978	12 371	枯	枯	枯	2011	10 757	特枯	平	特枯
1979	12 609	特枯	特枯	枯	2012	14 739	平	平	丰
1980	14 670	平	枯	丰	2013	11 912	平	平	特枯
1981	14 022	枯	枯	平	2014	14 540	平	特丰	丰
1982	14 206	丰	平	丰	2015	12 521	枯	丰	枯

表5 各月径流分类差异程度
Table5 The difference of the monthly runoff classification

比方法		相应差异度的年数 / a		
方法 A	方法 B	差异度为 3	差异度为 2	差异度为 1
投影-集对法	集对法	2	4	12
投影-集对法	常规法	1	2	40
集对法	常规法	3	9	38

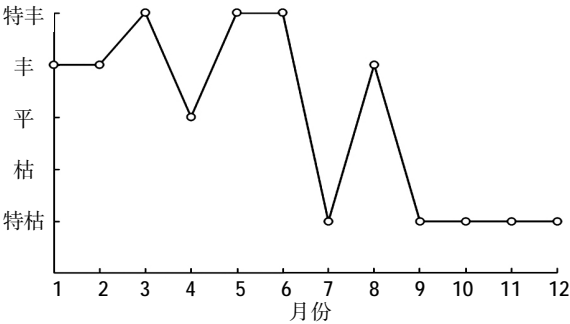


图 1 2002 年各月丰枯情况图
Fig.1 The monthly runoff classification in 2002

$A_{1,2002}=(4/12, 4/12, 1/12, 0, 5/12)$, 利用集对-投影法得到的加权五元集合为 $A_{2,2002}=(0.19260, 0.23247, 0.06480, 0, 0.51013)$, 而 7、9、10 月的多年月平均径流量较大, 对年径流丰枯贡献更多, 影响更大, 单一的集对分析方法对每个月份赋予相同的权重, 扩大了非汛期对年径流丰枯贡献的影响, 因此投影-集对分析法较单一的集对分析方法更能准确的反映年径流的丰枯情况。

再以 2013 年径流过程为例, 常规法、投影-集对法的分类结果分别为: 特枯水年、平水年。2013 年平均径流量为 $11\ 912\text{m}^3/\text{s}$, 根据表 1 利用常规法应该划分为特枯水年, 2013 年每月丰枯情况如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 2013 年 8 月径流量为枯, 9~12 月为特枯, 其余 8 个月径流量均为平或以上, 利用投影寻踪法得到的加权五元集合为 $A_{2,2013}=(0.15625, 0.06452, 0.34116, 0.14429, 0.29378)$, 汛期中某个月过大或过小的径流量会直接影响到年径流量的大小, 9 月仅有 $14\ 800\text{m}^3/\text{s}$, 10 月仅有 $8\ 290\text{m}^3/\text{s}$, 从而导致了年径流量偏低, 常规法扩大了汛期中极端数据对年径流丰枯的影响, 也没有考虑径流量的时程分配问题, 投影-集对法较常规法能更加准确地反映年径流的丰枯情况。

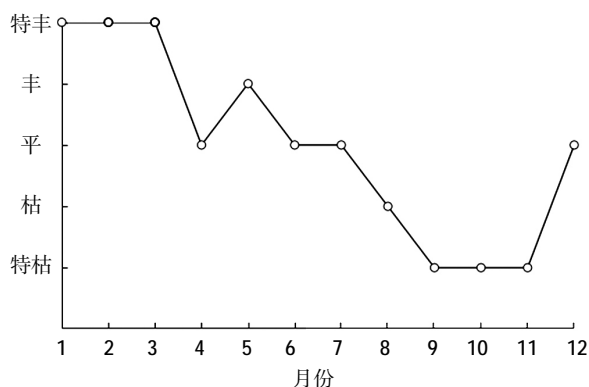


图 2 2013 年各月丰枯情况图

Fig.2 The monthly runoff classification in 2013

4 结语

年径流丰枯分类的集对分析法没有考虑各月流量对径流丰枯贡献的区别, 在流量季节变化大的河流丰枯分类上, 放大了枯水期对年径流等级的影响。投影寻踪-集对分析法全面考虑了年径流在不同时段对年径流丰枯等级的贡献权重。研究结果表明: 年径流丰枯分类的投影寻踪-集对分析法较单一的集对分析法和传

统分类法更能反应年径流丰枯变化的实际情况, 分类更为客观、合理和有效。

参考文献:

- [1] 李继清, 朱一鸣, 李建昌, 等. 变化环境对潮河下游径流一致性的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 5-12. (LI Jiqing, ZHU Yiming, LI Jianchang, et al. Impacts of changing environment on runoff consistency in the lower reaches of Chao River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 5-12. (in Chinese))
- [2] 周淑瑾. 湟水上游河川径流丰枯分析[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(3): 29-32. (ZHOU Shujin. Analysis on ample flow and low water for upper reaches in Huangshui River [J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2003, 14(3): 29-32. (in Chinese))
- [3] 赵雪花. 河川径流演变规律的挖掘与识别技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (ZHAO Xuehua. Mining and Identifying Technology of River Runoff Change Law [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [4] 丁小玲, 周建中, 陈璐, 等. 基于模糊集合理论和集对原理的径流丰枯分类方法[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 4-9. (DING Xiaoling, ZHOU Jianzhong, CHEN Lu, et al. Approach to annual runoff classification based on fuzzy set theory and set pair analysis [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(5): 4-9. (in Chinese))
- [5] 赵太想, 王文圣, 周秀平. 一种径流丰枯分类的新方法研究[J]. 人民黄河, 2006, 40(7): 12-13. (ZHAO Taixiang, WANG Wensheng, ZHOU Xiuping. New method of runoff classification [J]. Yellow River, 2006, 40(7): 12-13. (in Chinese))
- [6] 崔东文. 鸡群优化算法-投影寻踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 16-23+41. (CUI Dongwen. Projection pursuit model for evaluation of flood and drought disasters based on chicken swarm optimization algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 16-23+41. (in Chinese))
- [7] 付强. 投影寻踪模型及其在水文水资源系统分析中的应用[J]. 黑龙江水专学报, 2008, 35(4): 80-85. (FU Qiang. Projection pursuit model and its application in hydrology and water resources system analysis [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering, 2008, 35(4): 80-85. (in Chinese))
- [8] 白桦, 鲁向晖, 杨筱筱. 基于集对分析的赣江中上游流域汛、枯水期分期研究[J]. 水文, 2014, 34(3): 43-47. (BAI Hua, LU Xianghui, YANG Xiaoxiao. Flood and drought season division based on set pair analysis for middle and upper reaches of Ganjiang River [J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3): 43-47. (in Chinese))
- [9] 王文圣, 向红莲, 李跃清, 等. 基于集对分析的年径流丰枯分类新方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(5): 1-6. (WANG Wensheng, XIANG Honglian, LI Yueqing, et al. A new approach to annual runoff classification based on set pair analysis [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(5): 1-6. (in Chinese))
- [10] 孟彩侠, 王平义, 张晓伟, 等. 基于集对分析的径流丰枯分类探讨[J].

- 人民长江, 2015,46(13):21-24+38. (MENG Caixia, WANG Pingyi, ZHANG Xiaowei, et al. Discussion of annual runoff dry-wet classification based on set pair analysis [J]. Yangtze River, 2015,46(13):21-24+38. (in Chinese))
- [11] 谢云霞,王文圣,曾尚春. 基于分形模糊集对分析方法的洪水分类[J]. 水电能源科学, 2012,30(11):31-34. (XIE Yunxia, WANG Wensheng, ZENG Shangchun. Study on flood classification based on fractal fuzzy set pair analysis method [J]. Water Resources and Power, 2012,30(11):31-34. (in Chinese))
- [12] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000. (ZHAO Keqin. Set Pair Analysis and Its Preliminary Application [M]. Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [13] 莫崇勋,莫桂燕,阮俞理,等. 五元集对分析在澄碧河流域径流分类中的应用[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2007,42(1):379-385. (MO Chongxun, MO Guiyan, RUAN Yuli, et al. Application of five-element set pair analysis in annual runoff classification in Chengbi River basin [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2007,42(1):379-385. (in Chinese))
- [14] 朱兵,王红芳,王文圣,等. 基于集对原理的峰和量关系分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007,39(3):29-33. (ZHU Bing, WANG Hongfang, WANG Wensheng, et al. Analysis of relation between flood peak and volume based on set pair [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007,39(3):29-33. (in Chinese))
- [15] 陈曜,丁晶,赵永红. 基于投影寻踪原理的四川省洪灾评估[J]. 水利学报, 2010,41(2):220-225. (CHEN Yao, DING Jing, ZHAO Yonghong. Assessment on flood disaster in Sichuan province based on the principle of projection pursuit method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(2):220-225. (in Chinese))
- [16] 廖力,李蕊,邹强,等. 基于模糊聚类迭代模型的洪灾智能评估方法[J]. 人民长江, 2014,45(4):1-4. (LIAO Li, LI Rui, ZOU Qiang, et al. Intelligent assessment of flood disaster based on fuzzy clustering iterative model [J]. Yangtze River, 2014,45(4):1-4. (in Chinese))
- [17] 潘争伟,吴成国,金菊良. 水资源系统评价与预测的集对分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (PAN Zhengwei, WU Chengguo, JIN Juliang. Set Pair Analysis Method for Evaluating and Forecasting Water Resources Systems [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [18] 廖力,邹强,何耀耀,等. 基于模糊投影寻踪聚类的洪灾评估模型[J]. 系统工程理论与实践, 2015,35(9):2422-2432. (LIAO Li, ZOU Qiang, HE Yaoyao, et al. A fuzzy projection pursuit clustering algorithm based flood disaster assessment model [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2015,35(9):2422-2432. (in Chinese))
- [19] 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (FU Qiang, ZHAO Xiaoyong. Principle and Application of Projection Pursuit Model [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [20] 朱兵,王文圣,王红芳,等. 集对分析中差异不确定系数 i 的探讨[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008,40(1):5-9. (ZHU Bing, WANG Wensheng, WANG Hongfang, et al. Probe on variation uncertainty coefficient i in set pair analysis [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008,40(1):5-9. (in Chinese))

Annual Runoff Classification Based on Projection Pursuit and Set Pair Analysis Coupling Method

ZHENG Wei, YU Guorong, ZHANG Daiqing

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: As the annual runoff classification method for set pair analysis does not consider the different contribution of runoff in different time periods, this paper applied the projection pursuit and set pair analysis coupling method to discuss the runoff classification. Firstly, the projection pursuit method was used to acquire the weighted connection number according to the weighting factors that obtained from the annual runoff distribution. Then, the set pair analysis method was used to judge the high-flow level of the annual runoff. Finally, the case study was conducted by using the annual runoff in Yichang Region as the data. The results show that the projection pursuit and set pair analysis coupling method are more objective and accurate when compared with the set pair analysis method of runoff classification.

Key words: projection pursuit; set pair analysis; weighted connection number; runoff classification; runoff