

网络出版时间:2015-09-09 15:41

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2015.10.029

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150909.1541.058.html

改进 RVA 法在河流水文情势评价中的应用

黎云云, 畅建霞, 雷江群

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

[摘要] **【目的】**研究改进变化范围法(Range of Variability Approach, RVA)中各水文指标对生态环境的响应程度,以有效避免 RVA 在评价河流整体水文情势时容易忽略低度、中度改变指标的不足,为河流生态系统的管理决策提供参考。**【方法】**基于改进的 RVA 算法充分考虑了 5 类 33 个水文指标与生态系统之间的响应程度,并将层次分析法(主观赋权法)与熵权法(客观赋权法)相结合赋予各指标生态权重,集结并累加各指标综合生态权重与单个水文指标改变度,综合评价河流水文情势的整体改变度。以渭河关中段为例,依据林家村、咸阳、华县水文站 1960—2010 年的日径流资料,借助 Mann-Kendall 非参数检验方法诊断径流序列突变点,采用 RVA 法计算单个水文指标的改变度,利用改进的 RVA 法对渭河关中段水文情势的整体改变度进行评价。**【结果】**利用未改进的 RVA 方法计算得到渭河关中段林家村、咸阳、华县控制断面的整体改变度分别为 75%, 69%, 67%, 均属于高度改变;而用改进 RVA 算法计算得到的林家村、咸阳控制断面的整体改变度分别为 51%, 40%, 属于中度改变,华县控制断面的整体改变度为 29%, 属于低度改变。对比两种不同评价结果并进行合理性分析可知,基于改进 RVA 方法的评价结果更加贴近河道所提供的整体信息和指标改变度的分布特征,符合客观实际。**【结论】**通过赋予各水文指标生态权重,综合考虑各水文指标与生态系统之间的响应程度,能有效融合 33 个水文指标在评价河流整体改变度时的内涵,研究成果更加客观且符合实际。

[关键词] 河流;径流序列突变;改进 RVA 法;水文情势评价;渭河关中段

[中图分类号] P333.9

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)10-0211-08

Application of improved RVA method in assessment of river hydrological regime

LI Yun-yun, CHANG Jian-xia, LEI Jiang-qun

(Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: **【Objective】**This paper proposed a more accurate reference on the basis of RVA to diagnose the influence degree by analyzing the response relationship between hydrological index and river ecosystem. This would help to avoid the problem caused by ignoring low and middle changing indicators in range of variability approach (RVA) when evaluating the overall changing degree of river hydrological alteration. **【Method】**The improved RVA took the response between hydrologic index and ecological system into consideration, endowed each index with ecologic weight by binging analytic hierarchy process (subjective weighting method) and entropy method (objective weighting method), and integrated and cumulated the hydrological weight with each index to access the overall changing degree of river hydrological alteration. Then taking the Weihe Guangzhong section as example, the daily flow data from 1960 to 2010 at Linjiacun,

[收稿日期] 2014-03-20

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51179149);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0933);教育厅重点实验室科学研究项目(13JS069);陕西省科技创新团队项目(2012KCT-10)

[作者简介] 黎云云(1990—),女,四川达州人,在读博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:liyunnyun19900627@163.com

[通信作者] 畅建霞(1974—),女,山西祁县人,教授,博士生导师,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:chxiang@xaut.edu.cn

Xianyang, and Huaxian hydrological stations were analyzed. The Mann-Kendall non-parametric test method was also used to diagnose the abrupt changing points, based on which the runoff series was divided into two periods representing the pre-impact and post-impact periods, respectively. The changing degree of each index was analyzed by RVA and the overall changing degree of hydrologic regime was evaluated by the improved RVA. 【Result】 The overall changing degrees calculated by original method at Linjiacun, Xianyang, and Huaxian were 75%, 69%, and 67%, belonging to high change. While the changing degrees calculated by improved RVA at Linjiacun, Xianyang, and Huaxian were 51% (medium change), 40% (medium change), and 29% (low change). The improved evaluation results were closer to the overall information provided by the river and the distribution characteristics of index changing degree through rationality analysis. 【Conclusion】 The 33 hydrological indexes can accurately and objectively evaluate the river hydrological regime by giving each index weight to consider the response degree between index and ecological system.

Key words: river; runoff series mutation; improve RVA method; hydrological regime evaluation; Weihe Guanzhong section

河流作为人类经济社会发展的重要支撑和保障,其生态功能和健康现状的评价成为水文界的热点和难点问题。尤其是近年来,在全球气候变化和人类活动的双重影响下,河流的天然流态、泥沙冲刷及生物多样性均受到了不同程度的影响,致使河流生态系统严重退化。水文情势是河道水流状态健康与否的主要标志,它决定着河流物质和能量的交换过程,影响着水生物之间的相互关系及栖息地状况,维持着河流生态系统的完整性^[1]。因此,定量评价河流水文情势,对变化环境下河流健康的良性维持及生态功能的恢复都具有重要的现实意义。

自 20 世纪 70 年代开始,一些国家便陆续开展了河流生态系统的健康评价,提出了许多河流健康评价的指标体系,如南非的河口健康指数(Estuarine Health Index, EHI)、澳大利亚的溪流状态指数(Index of Stream Condition, ISC)、英国的河流保护评价系统(System for Evaluating Rivers for Conservation, SERCON)、美国环保署的生境适宜性指数(Habitat Suitability Index, HSI)和河流地貌指数(Index of Stream Geomorphology)等^[2]。这些评价指标从不同角度评价了河流生态系统的完整性,但对数据的搜集比较难、要求比较高,且涉及河流地貌、生物栖息地及其物种等大量信息。为此,美国学者 Richter 等^[3]于 1996 年提出了水文变异指标(Index of Hydrologic Alteration, IHA),包括各月流量、年极端流量、极端流量发生时间、高低流量的频率及延时、流量变化改变率及频率共 5 类 33 个水文指标。随后, Richter 等^[4]在 IHA 的基础上提出了变化范围法(Range of Variability Approach, RVA),主要通过对比不同时段河流水文情势的改

变程度,定量分析受环境影响后河道水文特征的变化情况。RVA 方法自提出以来,得到了学术界的大力认可和广泛应用,张洪波等^[5]应用 RVA 研究了宝鸡峡引水对渭河水文规律及生态系统的影响,结果表明宝鸡峡引水工程对渭河水文规律及生态系统的影响较大,严重阻碍了河流生态功能的实现。于茜等^[6]采用 RVA 分析刘家峡、龙羊峡两库联合调度对黄河上游兰州站生态水文特征变异的影响,表明刘、龙两库联合运行对黄河水生生物的生存环境影响较大。Yang 等^[7]采用 RVA 方法研究了小浪底和三门峡水库对黄河中下游水文情势的影响程度,结果表明小浪底水库对黄河下游水文情势的影响大于三门峡水库。Shiau 等^[8]应用 RVA 方法分析导流堰的水文影响,通过在水文指标的变化和人类需求之间建立平衡,以保持天然水流的多变性并促进生物群的生长。

上述研究在将 RVA 用于分析河流受影响后生态水文特征的改变情况,以及识别改变度较大指标等方面取得了很大成就,但在评价河流的整体改变度时,存在过于依赖高度变化的水文指标的不足,如当指标值中有一个属于高度改变,那么整体的改变度必将被定义为高度改变,从而忽略了大多数中度、低度改变指标的影响,导致评价结果与实际存在差异。鉴于此,本研究将 RVA 法进行改进,以渭河关中段为评价对象,依据林家村、咸阳、华县断面 1960—2010 年的日径流资料,对渭河关中段受人类活动和气候变化影响后的整体水文情势改变度进行客观、全面的综合评价,并与未改进 RVA 法的评价结果进行比较,以期对河流水文情势改变度的准备评价提供支持,并为深入了解渭河关中段水文情势

的改变现状以及流域生态目标的进一步确定和水资源的统一管理提供科学依据。

1 评价方法

1.1 Mann-Kendall 非参数检验法

目前,用于水文序列突变点诊断的方法很多,如有序聚类分析法、Pettitt 非参数检验法、贝叶斯变点分析法、Mann-Kendall 非参数检验法、R/S 分析法等^[9-13]。Mann-Kendall 非参数突变检验方法理论基础扎实且应用实例较多^[14-16],样本无需遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰,具有受人为干扰小、检验范围宽、定量化程度高等诸多优点,因此本研究选用 Mann-Kendall 非参数检验方法^[17]对径流序列突变点进行诊断。

1.2 单个指标改变度

水文变异指标(IHA)是由 Richter 等^[3]于 1996 年提出的,共有各月流量、年极端流量、极端流量发生时间、高低流量的频率及延时、流量变化改变率及频率 5 类 33 个指标,涵盖的指标因子能够较全面地反映河流的水文情势。为了定量描述单个水文指标受影响后的改变程度,Richter 等^[4]在 IHA 的基础上提出了变化范围法(RVA),其通常将受影响前各指标发生频率的 75%及 25%作为能够满足河流生态需求的变动范围,即 RVA 阈值。各指标的具体水文改变度由下面公式量化得到:

$$D_i = \frac{N_i - N_e}{N_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_i 为各个指标的改变度; N_i 为第 i 个指标受影响后仍落于 RVA 阈值范围内的实际观测年数; N_e 为指标受影响后预期落于 RVA 阈值范围内的年数, $N_e = rN_T$,其中 r 为受影响前指标落于 RVA 阈值范围内的比例, N_T 为指标受影响后的总年数。

当 $0\% \leq |D_i| < 33\%$ 为无改变或低度改变; $33\% \leq |D_i| < 67\%$ 为中度改变; $67\% \leq |D_i| < 100\%$ 为高度改变。

1.3 整体改变度

1.3.1 RVA 法 Shiau 等^[8]提出了整体水文改变度 D_0 ,即利用各指标的水文改变度以三等级法的方式来计算河流水文情势综合改变度,具体分为以下 3 种情况:

(1)如果各指标的改变值均小于 33%,则整体改变度为 33 个 D_i 值的平均值,即:

$$D_0 = \frac{1}{33} \sum_{i=1}^{33} D_i \quad (2)$$

式中: D_0 为整体改变度。

(2)如果 33 个指标的改变度均小于 67%,且至少有 1 个指标的改变度大于或等于 33%,则水文整体改变度的计算公式为:

$$D_0 = 33\% + \frac{1}{33} \sum_{i=1}^{N_m} (D_i - 33\%) \quad (3)$$

式中: N_m 为 D_i 属于中度改变的个数。

(3)如果 33 个指标的改变值中至少有 1 个指标的改变度大于或等于 67%,则水文整体改变度的计算公式为:

$$D_0 = 67\% + \frac{1}{33} \sum_{i=1}^{N_h} (D_i - 67\%) \quad (4)$$

式中: N_h 为 D_i 属于高度改变的个数。

该方法考虑了 33 个指标变化值之间的差异,但过于重视变化度较大的水文指标而忽略了大多数水文指标与生态系统之间的响应程度,因为改变度最大的指标不一定对生态系统的响应程度也最大。显然,这种以三等级法的方式来量化河流的整体改变度有失偏颇。

1.3.2 改进的 RVA 法 为了更加客观地融合 33 个水文指标来表述河流的整体改变情况,笔者将赋予各指标生态权重,综合考虑各指标与生态系统之间的响应程度。在此基础上,计算各控制断面水文情势的综合改变度。具体方法如下:

1)确定各指标权重。指标权重的确定方法有主观赋权法和客观赋权法,但 2 种赋权方法各具其优势和局限性。为了能更客观全面地反映指标相对于河流水文情势的重要性,本研究将主观层次分析法与客观赋权法结合起来以确定各指标的综合权重。

层次分析法通过两两比较及计算判断矩阵最大特征值和特征向量,以确定指标相对于最高层的排序权向量,具体方法及思路见文献^[18]。熵权法^[19-20]是用信息熵来反映系统中信息的无序化程度,若信息熵越高,则所含信息的无序化程度越高,该信息所提供的价值就越小,即其在系统中所占的权重就越小,反之亦然。具体步骤如下:

①设有 m 个样本(采样点),每个样本(采样点)有 n 项指标,构建原始数据矩阵 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_{ij})_{m \times n}$;然后对 $\mathbf{X}$ 进行归一化处理得到矩阵 $\mathbf{f}_{ij}$:

$$f_{ij} = \frac{\mathbf{X}_{ij}}{\sum_{i=1}^m \mathbf{X}_{ij}} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{f}_{ij}$ 为归一化得到的矩阵, $\mathbf{x}_{ij}$ 为原始数据矩阵, i 为采样点, j 为每个采样点的具体指标。

②确定第 j 项指标的熵值 H_j 。计算公式为:

$$H_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln (f_{ij}). \tag{6}$$

③确定评价指标的熵权 ω_j^0 。计算公式为：

$$\omega_j^0 = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{i=1}^n H_j}. \tag{7}$$

式中： $j=1,2,\cdots,n$ ，且满足 $\sum_{j=1}^n \omega_j^0 = 1$ 。

2)确定各指标的综合权重 θ_i 。计算公式为：

$$\theta_i = \frac{\omega_i \omega_i^0}{\sum_{i=1}^n \omega_i \omega_i^0}. \tag{8}$$

式中： ω_i 为主观赋值的权重， ω_i^0 为客观赋值的权重，且满足 $\sum_{i=1}^n \theta_i = 1$ 。

3)确定水文情势的整体改变度 D_0^* 。计算公式为：

$$D_0^* = \sum_{i=1}^n \theta_i D_i. \tag{9}$$

式中： θ_i 为各指标的综合权重， D_i 为各指标的改变度。

同样，若 $0\% \leq |D_0^*| < 33\%$ 为无改变或低度改变； $33\% \leq |D_0^*| < 67\%$ 为中度改变； $67\% \leq |D_0^*| \leq 100\%$ 为高度改变。

1.4 改进评价步骤

1)采用 Mann-Kendall 对日径流系列进行突变点诊断，突变点之前的年份代表天然径流序列，突变点之后的年份代表受影响后的径流序列。

2)在 IHA 的基础上，采用变异范围法(RVA)计算单个水文指标受影响后的改变度。

3)分别采用主观层次分析法和客观熵权法赋予各指标权重，然后将主观权数与客观权数进行综合集结，最终确定各指标响应于生态环境的综合权重。

4)采用式(9)计算各控制断面改进后的整体水文改变度，综合评价河流在人类活动和气候影响下水文情势的变化情况。

2 实例研究

2.1 渭河关中段概况

渭河关中段位于陕西省的中部，地处渭河中下游以渭河平原(亦称关中平原)为主体，大致以秦岭主脊与陕南地区为界，以子午岭、黄龙山与陕北地区相邻(图 1)。由西向东横贯宝鸡、咸阳、西安、渭南等市(区)后，于潼关的港口注入黄河，面积约为 5.5 万 km^2 ，约占全省总面积的 26.9%。关中多年平均水资源总量为 82.03 亿 m^3 ，仅占全省地表水资源总量的 17.7%。林家村、咸阳水文站分别是渭河关中段中游和下游的分界点，华县站是渭河流出陕西省境的控制点。近 50 年来，由于气候和人类活动的双重影响，渭河关中段的水文情势发生了重大改变，致使流域生态环境不断恶化，诸如流量不断减少、水质达标低、洪涝灾害频繁以及河流含沙量大等。



图 1 渭河关中段及其主要水文站点的分布

Fig.1 Location of Weihe Guanzhong basin and the distribution of main hydrological stations

2.2 日径流突变点诊断

采用 Mann-Kendall 非参数检验法对渭河关中段上、中、下游水文控制站点林家村、咸阳、华县水文站 1960—2010 年的日径流系列进行了突变点诊断，

结果如表 1 所示。3 个站点中，突变年份除华县站为 1970 和 1990 年外，其余 2 个站点均为 1970 和 1985 年。这些年份发生突变的原因可能与气候变化引起的降雨量有一定关系，但主要还是由水库运

行、灌区引水等人类密集活动导致的,如 1970 年羊毛湾水库建成,1972 年宝鸡峡灌区开始引水,1982 年冯家山水库投入运行,1989 年石头河水库竣工等。

表 1 基于 Mann-Kendall 非参数检验法的
渭河关中段日径流突变点诊断结果

Table 1 Abrupt points of runoff in the Weihe Guanzhong section by Mann-Kendalll non-parametric test method	
站点 Station	突变点 Abrupt point
林家村 Linjiacun	1970,1985
咸阳 Xianyang	1970,1985
华县 Huaxian	1970,1990

初步判断突变点为 1970,1985 和 1990 年。结合以往的研究成果^[21-22]来看,渭河关中段径流发生

表 2 渭河关中段 3 个水文站点各评价指标的水文改变度及其权重

Table 2 Hydrological changing degree and weight of each evaluation index at three stations in the Weihe Guanzhong section							
水文指标分组 Group of hydrological index		改变度/% Change degree			权重 Weight		
IHA 指标 IHA parameter		林家村 Linjiacun	咸阳 Xianyang	华县 Huaxia	主观 Subjective	客观 Objective	综合 Synthetic
各月流量 Monthly flow	1 月流量平均值 Average flow in January	97.6(H)	4.0(L)	4.0(L)	0.030	0.029	0.030
	2 月流量平均值 Average flow in February	97.6(H)	6.4(L)	6.4(L)	0.030	0.029	0.030
	3 月流量平均值 Average flow in March	35.2(M)	14.4(L)	35.2(M)	0.030	0.029	0.030
	4 月流量平均值 Average flow in April	27.2(L)	68.8(H)	58.4(M)	0.030	0.015	0.015
	5 月流量平均值 Average flow in May	27.2(L)	16.8(L)	14.4(L)	0.030	0.015	0.015
	6 月流量平均值 Average flow in June	45.6(M)	45.6(M)	35.2(M)	0.030	0.015	0.045
	7 月流量平均值 Average flow in July	6.4(L)	58.4(M)	16.8(L)	0.030	0.004	0.004
	8 月流量平均值 Average flow in August	68.8(H)	33.8(M)	6.4(L)	0.030	0.004	0.004
	9 月流量平均值 Average flow in September	68.8(H)	37.6(M)	27.2(L)	0.030	0.004	0.004
	10 月流量平均值 Average flow in October	58.4(M)	58.4(M)	48.0(M)	0.029	0.095	0.030
	11 月流量平均值 Average flow in November	58.4(M)	68.8(H)	37.6(M)	0.030	0.015	0.015
	12 月流量平均值 Average flow in December	45.6(M)	16.8(L)	14.4(L)	0.031	0.029	0.031
年极端流量 Annual extreme flow	年最小 1 日流量均值 Annual 1-day minimum flow	100(H)	6.4(L)	14.4(L)	0.034	0.003	0.003
	年最小 3 日流量均值 Annual 3-day minimum flow	100(H)	16.8(L)	14.4(L)	0.034	0.008	0.009
	年最小 7 日流量均值 Annual 7-day minimum flow	100(H)	6.4(L)	4.0(L)	0.033	0.013	0.015
	年最小 30 日流量均值 Annual 30-day minimum flow	97.6(H)	16.8(L)	14.4(L)	0.033	0.019	0.021
	年最小 90 日流量均值 Annual 90-day minimum flow	45.6(M)	6.4(L)	6.4(L)	0.030	0.024	0.024
	年最大 1 日流量均值 Annual 1-day maximum flow	37.6(M)	27.2(L)	48.0(M)	0.030	0.003	0.003
	年最大 3 日流量均值 Annual 3-day maximum flow	37.6(M)	48.0(M)	27.2(L)	0.030	0.008	0.008
	年最大 7 日流量均值 Annual 7-day maximum flow	37.6(M)	48.0(M)	37.6(M)	0.030	0.013	0.014

突变的年份并不一致,但主要都集中在 20 世纪 80 年代中期到 90 年代初。综合考虑,选取 1985 年作为径流突变年份与过去研究结果基本保持一致,较为客观合理。

2.3 单个水文指标的改变度及其权重

根据突变点诊断结果可知,1985 年为水文情势变化的起始年份,即将 1960—1985 年作为径流影响前的水文系列,1986—2010 年为影响后的水文系列。由式(1)可以计算得到 3 个水文站点各水文指标的改变度。分别采用主观层次分析法和客观熵权法赋予各指标权重,然后由式(8)得到了各指标的生态综合权重,计算结果见表 2。

续表 2 Continued table 2

水文指标分组 Group of hydrological index	IHA 指标 IHA parameter	改变度/% Change degree			权重 Weight		
		林家村 Linjiacun	咸阳 Xianyang	华县 Huaxia	主观 Subjective	客观 Objective	综合 Synthetic
年极端流量 Annual extreme flow	年最大 30 日流量均值 Annual 30-day maximum flow	58.4(M)	79.2(H)	58.4(M)	0.030	0.019	0.019
	年最大 90 日流量均值 Annual 90-day maximum flow	79.2(H)	79.2(H)	48.0(M)	0.030	0.022	0.023
	断流天数 Number of zero-flow days	4.0(L)	0(L)	0(L)	0.029	0.084	0.082
	基流量 Base flow	100(H)	79.2(H)	37.6(M)	0.033	0.025	0.028
极端流量 发生时间 Timing of annual extreme flow	年最小 1 日流量发生时间 Timing of annual minimum flow	14.4(L)	6.4(L)	6.4(L)	0.030	0.004	0.004
	年最大 1 日流量发生时间 Timing of annual maximum flow	4.0(L)	58.4(M)	22.9(L)	0.029	0.095	0.098
高低流量的 频率及延时 Frequency and duration of high and low purses	年发生低流量的次数 Low pulse count	19.11(L)	33.3(M)	14.4(L)	0.029	0.042	0.043
	低流量平均延时 Low pulse duration	33.7(M)	34.0(M)	15.5(L)	0.029	0.061	0.063
	年发生高流量的次数 High pulse count	68.8(H)	58.4(M)	14.9(L)	0.029	0.034	0.036
	高流量的平均延时 High pulse duration	44.0(M)	37.8(M)	13.3(L)	0.029	0.053	0.055
流量变化改 变率及频率 Change rate and frequency of flow	流量平均减少率 Fall rates of average flow	81.1(H)	79.2(H)	58.4(M)	0.030	0.074	0.079
	流量平均增加率 Rise rates of average flow	68.8(H)	58.4(M)	58.4(M)	0.029	0.069	0.072
	每年流量逆转次数 Number of hydrologic reversals	58.4(M)	30.6(L)	71.6(H)	0.029	0.047	0.048

注：“L”代表低度改变，“M”代表中度改变，“H”代表高度改变。下同。
Note: “L” represents low change, “M” represents medium change and “H” represents high change. The same below.

由表 2 可知:3 个控制站点的月流量均发生了不同程度的改变,其中林家村站 1、2 月水文流量变化程度剧烈,华县和咸阳站月流量改变程度不大。极端流量指标改变程度较小,年最大 1 日流量发生时间除咸阳站为中度改变外,其余 2 站均为低度改变,但其综合权重为 0.098,对生态环境影响很大,即便微小的变化也可能导致严重的生态危害。林家村、咸阳站年发生高流量的次数为高、中度改变,华县站为低度改变;但每年流量逆转次数以华县站的改变最为显著,改变度为 71.6%,呈高度变化,这主要是受渭河关中段中下游水利发电的影响所致,如

频繁的引水、放水导致河流流量发生频繁波动,造成流量上升率、下降率增大,水文转折点次数增多。但总体来说,林家村、咸阳、华县站流量频率及逆转次数的改变度较为相似,都呈现高流量次数总体减少、低流量次数和逆转次数总体增大的趋势。

2.4 水文情势整体改变度分析

在表 2 计算结果的基础上,根据 Shiau 等^[8]提出的整体水文改变度 D_0 的评价公式,可以得到林家村、咸阳、华县站控制断面的整体水文改变度,由式(9)可以得到改进后的整体水文情势改变度 D_0^* 。用不同方法得到渭河关中段水文情势的评价结果见表 3。

表 3 用不同评价方法得到的渭河关中段水文情势整体改变度的比较

Table 3 Comparison of overall changing degrees by different methods in the Weihe Guanzhong section				%
评价方法 Evaluation methods	林家村 Linjiacun	咸阳 Xianyang	华县 Huaxian	
RVA 法(D_0) RVA method	75(H)	69(H)	67(H)	
改进 RVA 法(D_0^*) Improved RVA method	51(M)	40(M)	29(L)	

由表 3 可以看出,用 RVA 方法计算得到 3 个水文站的整体改变度均 $\geq 67\%$,均属于高度改变,这是由于 RVA 法虽然考虑到了 33 个指标变化值的差异,但是过于重视变化度较大的水文指标,如华县断面水文指标改变度中有且仅有 1 个参数(逆转次数)属于高度改变,经 RVA 法(式(4))计算得其整

体改变度为 67%,也属于高度改变。由此可见,该参数是决定华县断面整体受影响程度呈高度改变的惟一因子,该结果忽略了其他大多数中、低度改变的指标以及这些指标因子与生态系统之间的响应程度,这必然会给河流的管理带来盲目性和误导性。采用改进 RVA 方法计算后,林家村站水文情势的整体改

变度为 51%，咸阳站为 40%，两者均属于中度改变，而华县站的整体改变度为 29%，属于低度改变。

2.5 评价结果的合理性分析

使用改进的 RVA 法进行评价,可以综合考虑各个水文指标对河流水文情势的影响程度,得到林家村、咸阳断面的改变度为中度改度,华县断面为低度改度。该评价结果的合理性可以从以下角度进行分析:

1)从各个站点水文指标改变度的分布特征及与生态系统之间响应程度的分析结果(图 2)可知,林家村站 33 个 IHA 指标中,低度改变的指标有 7 个,中度改变和高度改变的指标均为 13 个;中度改变指标所占权重为 0.39,均大于低度和高度改变指标所占权重,即林家村站 33 个指标中,虽然高度、中度改变的指标个数相同且最多,但是中度改变指标对生

态系统的响应程度高于高度改变指标,因此林家村断面的整体水文情势改变度为中度改变是合理的。咸阳站 33 个 IHA 指标中,低度、中度和高度改变的指标个数分别为 14,13 和 6,其中中度改变指标所占权重为 0.48,均大于低度和高度改变指标所占权重,即咸阳站 33 个指标中,虽然低度改变的指标个数最多,但是中度改变指标对生态系统的响应程度最高,因此咸阳断面的整体水文情势改变度为中度改变是合理的。同理,华县站 33 个 IHA 指标中,低度、中度和高度改变指标个数分别为 20,12 和 1,其中低度改变指标所占权重为 0.58,均大于中度和高度改变指标所占权重,即华县站 33 个指标中,低度改变的指标个数最多且对生态系统的响应程度最高,因此华县断面的整体水文情势改变度为低度改变是合理的。

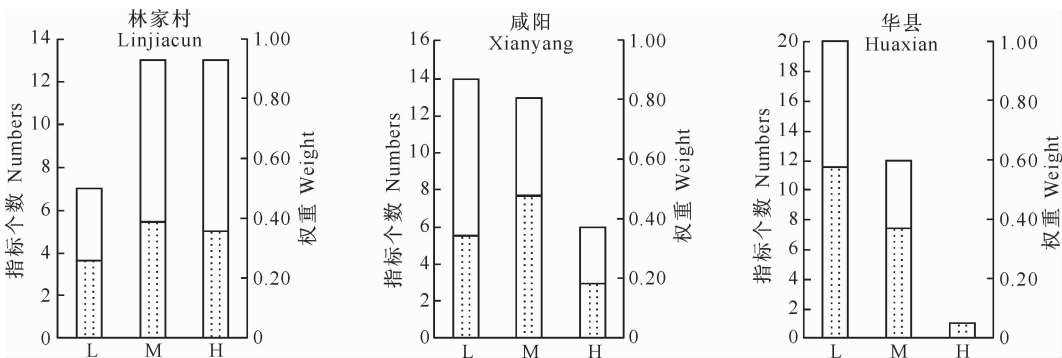


图 2 3 个水文站水文指标改变度的分布特征及与生态系统之间的响应程度
□ 指标个数;□ 权重

Fig. 2 Distribution characteristics of index changing degree and the hydrological responses to ecological system at three hydrological stations
□ Number of indexes; . Weight

2)从河道水资源整体开发利用状况分析,渭河关中地区建有八大灌区,农业灌溉取水较多,特别是宝鸡峡引水工程对咸阳断面以上的河流造成了不可忽视的影响^[23],而华县断面多以城市生活、工业用水为主,取用水量小于农业用水,对河道水文情势的影响相对较小,即人类活动对林家村、咸阳断面整体水文情势改变度的影响大于华县断面。因此,沿着河流的流向,水文改变度逐渐降低的趋势是合理的。此外,武玮等^[24]采用 *t* 检验对渭河关中段整体水文情势进行了评价,结果表明咸阳断面以上的差异为显著水平,咸阳断面以下为较显著水平。这与本研究分析的水文变化趋势类似。

综上分析,基于改进 RVA 方法的渭河水文情势改变度评价结果更加贴近河道所提供的整体信息,且符合客观实际。

3 结 语

变化范围法(Range of Variability Approach, RVA)作为一种多指标评价法,在评价单个水文指标改变度方面取得了较大成就,并得到了国内外学术界的一致认可,但在评价河流整体水文情势改变度时,RVA 法只重视个别改变度大的指标,忽略了评价指标对环境的影响程度,即其所占的生态权重,容易给河流的规划和管理带来盲目性和误导性。本研究提出的改进 RVA 算法,将层次分析法和熵权法相结合,赋予了各指标响应生态环境的综合权重,有效地避免了中度、低度改变指标被忽视的现象,能更加客观、全面地评价河流在人类活动和气候变化双重影响下的水文改变情况,可为流域生态目标的进一步确定和水资源的统一管理提供更加可靠、合理的科学依据。

[参考文献]

- [1] 熊 明,许全喜,袁 晶,等. 三峡水库初期运用对长江中下游水文河道情势影响分析 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):120-125.
Xiong M, Xu Q X, Yuan J, et al. Study of the influences of Three Gores Project's in initial operation on river regime of the middle and lower Yangze River [J]. Journal of Hydrologic Electric Engineering, 2010, 29(1):120-125. (in Chinese)
- [2] 杨 娜,梅亚东,尹志伟. 建坝对下游河道水文情势影响 RVA 评价方法的改进 [J]. 长江流域资源与环境,2010, 19(5):560-565.
Yang N, Mei Y D, Yin Z W. Impact assessment of dams on the flow regime of lower river by improved RVA [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(5):560-565. (in Chinese)
- [3] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10:1163-1174.
- [4] Richter B D, Baumgartner J V, Wigington R, et al. How much water does a river need [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1):231-249.
- [5] 张洪波,辛 琛,王义民,等. 宝鸡峡引水对渭河水文规律及生态系统的影响 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(4):226-233.
Zhang H B, Xin C, Wang Y M, et al. Influence of drawing water to Baojixia irrigation area on hydrologic regularity and ecosystem of Weihe River [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38(4):226-233. (in Chinese)
- [6] 于 茜,黄 强,张洪波. 不同水库运行模式对黄河兰州站生态水文特征变异的影响 [J]. 干旱区地理,2010, 33(5):747-755.
Yu Q, Huang Q, Zhang H B. Influence of different reservoir operations on the eco-hydrological characteristics variability of Lanzhou gauge of the Yellow River [J]. Aird Land Geography, 2010, 33(5):747-755. (in Chinese)
- [7] Yang T, Zhang Q, David Y Q, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China [J]. Hydrological Processes, 2008, 22:3829-3843.
- [8] Shiau J T, Wu F C. Feasible diversion and in stream flow release using range of variability approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(5):395-404.
- [9] Zhang Z X, Dehoff A D, Robert D, et al. Detection of stream-flow change in the Susquehanna River basin [J]. Water Resources Management, 2010, 24:1947-1964.
- [10] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应 [J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158.
Zhang J Y, Wang G Q, He R M, et al. Variation trends of run-offs in the middle Yellow River basin and its response to climate change [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2):153-158. (in Chinese)
- [11] 徐东霞,章光新,尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析 [J]. 水科学进展,2009,20(3):416-421.
Xu D X, Zhang G X, Yin X R. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956—2006 [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3):416-421. (in Chinese)
- [12] 张文纲,李述训,庞强强. 青藏高原 40 年来降水量时空变化趋势 [J]. 水科学进展,2009,20(2):168-176.
Zhang W G, Li S X, Pang Q Q. Changes of precipitation spatial-temporal over the Qinghai-Tibet Plateau during last 40 years [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2):168-176. (in Chinese)
- [13] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1979, 28(2):126-135.
- [14] 张建云,章四龙,王金星,等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究 [J]. 水科学进展,2007,18(2):230-234.
Zhang J Y, Zhang S L, Wang J X, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2):230-234. (in Chinese)
- [15] 宋小燕,穆兴民,高 鹏,等. 松花江哈尔滨站近 100 年来径流量变化趋势 [J]. 自然资源学报,2009,24(10):1803-1809.
Song X Y, Mu X M, Gao P, et al. Trends of runoff variation from 1900 to 2005 at Harbin Station of Songhua River [J]. Journal of Natural Sources, 2009, 24(10):1803-1809. (in Chinese)
- [16] 范利杰,穆兴明,赵广举. 近 50 年嘉陵江流域径流变化特征及影响因素 [J]. 水土保持通报,2013,23(1):12-17.
Fan L J, Mu X M, Zhao G J. Runoff variation and its impacting factor during 1960—2009 in Jiangling River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 23(1):12-17. (in Chinese)
- [17] 赵丽娜,宋松柏,郝 博,等. 年径流序列趋势识别研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(3):194-198.
Zhao L N, Song S B, Hao B, et al. Identification of annual runoff series trend [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38(3):194-198. (in Chinese)
- [18] 邓 雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究 [J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
Deng X, Li J M, Zeng H J, et al. Research on computation methods of AHP Weight Vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7):93-100. (in Chinese)
- [19] 邱苑华. 管理决策与应用熵学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
Qiu Y H. Management decision and application entropy [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [20] 罗军刚,解建仓,阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用 [J]. 水利学报,2008,39(9):1092-1097.
Luo J G, Xie J C, Ruan B Q. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9):1092-1097. (in Chinese)

研究中的适用性分析 [J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1827-1829.

Chu J T, Xia J, Xu C Y. Suitability analysis of SDSM model in the Haihe River Basin [J]. Resources Science, 2008, 30(12): 1827-1829. (in Chinese)

[19] 徐宗学, 刘 浏. 太湖流域气候变化检测与未来气候变化情景预估 [J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 1-6.

Xu Z X, Liu L. Detection of climate change and projection of future climate change scenaaaios in Taihu Lake basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2012, 32(1): 1-6. (in Chinese)

[20] 郝振纯, 时芳欣, 王加虎. 统计降尺度法在黄河源区未来降水变化分析中的应用 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(3): 2-4.

Hao Z C, Shi F X, Wang J H. Research and analysis of change precipitation in headstream region of Yellow River by using statistical downscaling model [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(3): 2-4. (in Chinese)

[21] 王晓燕, 杨 涛, 郝振纯. 基于统计降尺度的黄河源区气象极值预测 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 1-5.

Wang X Y, Yang T, Hao Z C. Climate extreme forecasting in headwater catchment of Yellow River based on statistical downscaling method [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(4): 1-5. (in Chinese)

[22] 黄俊雄, 徐宗学, 刘兆飞, 等. 统计降尺度法分析太湖流域未来气候变化情景 [J]. 资源科学, 2008, 30(12): 1811-1817.

Huang J X, Xu Z X, Liu Z F, et al. Analysis of future climate change in the Taihu basin using statistical downscaling [J]. Resources Science, 2008, 30(12): 1811-1817. (in Chinese)

[23] 刘晓春. 河西地区生态环境可持续发展研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2003.

Liu X C. Study on sustainable development of eco-environment in Hexi region [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2003. (in Chinese)

[24] Tavaol D H, Nasser M, Zahraie B. Improved statistical downscaling of daily precipitation using SDSM platform and data-mining methods [J]. International Journal of Climatology, 2013, 33: 2561-2578.

[25] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 近 50 年来河西走廊平原区气候变化的区域特征及突变分析 [J]. 地理科学, 2008, 28(4): 525-531.

Jia W X, He Y Q, Li Z S, et al. Regional characteristics of climate change trend and break during last 50 years in Hexi Corridor [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(4): 525-531. (in Chinese)

[26] 任朝霞, 杨达源. 近 40a 西北干旱区极端气候变化趋势研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 10-13.

Ren Z X, Yang D Y. Study on trends of extreme climate change in the arid region of northwest China in recent 40 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(4): 10-13. (in Chinese)

[27] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰. 中国气候与环境演变评估: I. 中国气候与环境变化及未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4-9.

Qin D H, Ding Y H, Su J L. Assessment of climate and environment changes in China: I. Climate and environment change in China and their projection [J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2005, 1(1): 4-9. (in Chinese)

[28] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.

Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climate shift from warm-dry to warm-humid in northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226. (in Chinese)

[29] 刘洪兰, 白虎志, 张俊国. 河西走廊中部近 53a 降水变化及未来趋势预测 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 146-150.

Liu H L, Bai H Z, Zhang J G. Change and trend prediction of precipitation in the central Hexi Corridor in Gansu province in recent 53 years [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 146-150. (in Chinese)

[30] 张 强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响 [J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1-7.

Zhang Q, Zhang C J, Bai H Z, et al. New development of climate change in northwest China and its impact on arid environment [J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(1): 1-7. (in Chinese)

(上接第 218 页)

[21] 拜存有, 张升堂. 渭河关中段年径流过程变异点的诊断 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 215-220.

Bai C Y, Zhang S T. Detection of the variation points of Weihe River watershed runoff process based on rank sum [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2009, 37(10): 215-220. (in Chinese)

[22] 马晓超, 栗晓玲, 薄永占. 渭河生态水文特征变化研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(1): 16-21.

Ma X C, Su X L, Bo Y Z. Research on eco-hydrological alteration of Weihe River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(1): 16-21. (in Chinese)

[23] Wu W, Xu Z X, Liu X C. Impact of Baoji water diversion works on the hydrologic regime in the Wei River Basin [J]. Procedia Environment Sciences, 2012, 13: 1653-1662.

[24] 武 玮, 徐宗学, 李发鹏. 渭河关中段水文情势改变程度分析 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1124-1137.

Wu W, Xu Z X, Li F P. Hydrologic alteration analysis in the Guanzhong reach of the Weihe River [J]. Journal of Natural Sources, 2012, 27(7): 1124-1137. (in Chinese)