

# 内陆河流健康评价探讨

刘宗平<sup>1,3</sup>, 刘进琪<sup>2,3</sup>

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省水文水资源勘测局, 甘肃 兰州 730000)

**摘要** 基于内陆河流水量遵循增长—顶峰—衰退—消失过程的演变规律和延时变化关系, 结合内陆河流域水土资源开发利用程度和因水量变化引起的生态环境变化, 提出了评价河流健康状态的水量演变指标判别标准。结果表明: 石羊河、黑河、疏勒河分别处于病态、不健康和亚健康状态。

**关键词** 河流健康; 土地利用; 水文循环; 内陆河

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)03-0024-03

## Assessment on inland river health

LIU Zong-ping<sup>1,3</sup>, LIU Jin-qi<sup>2,3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Provincial Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** Based on the relations between the evolution law that water quantity of inland rivers obeyed (increase-peak-decline-vanish) and the time-delay variation of water quality, the primary indicators and distinguishing method of water evolution for the assessment of river health were brought forward according to the utilization level of water and soil and the change of eco-environment resulted from the development and utilization of soil and water resources and water quantity variation inland river basins. The results show that the status of Shiyang River, Heihe River and Shule River are morbidity, ill health and weak health respectively.

**Key words** river health; land utilization; hydrologic circle; inland river

河流健康问题越来越多地受到国际国内专家和社会的关注, 人们日益认识到维持河流健康就是维护人类健康, 就是经济社会可持续发展和资源环境社会价值的进步<sup>[1-2]</sup>。目前国内外对河流健康的研究多侧重于河流的演变、资源状况、环境状况和生态状况的诊断<sup>[3-7]</sup>。Scho-field 和 Davies 把河流健康定义为自然性<sup>[8]</sup>“河流健康就是指与相同类型的未受干扰的(原始的)河流的相似程度, 尤其是在生物完整性和生态功能方面”。赵彦伟等<sup>[9-10]</sup>提出了“很健康、健康、亚健康、不健康、病态”5 级评价标准。对于不同自然地理和人文、气候环境条件下的河流有其特殊性<sup>[11]</sup>, 因此河流健康的评价应当与具体河流的特性相结合。

## 1 研究方法

我国西北河西内陆河流域的疏勒河、黑河、石羊河, 水量沿程变化遵循着增长—顶峰—衰退—消失的过程, 且河流多以支流汇集—干流延伸—尾间终结构成。许多关于内陆河流生态环境、绿洲格局、土地利用与水循环关系的研究<sup>[12]</sup>, 都得出了与水量变化存在良好相关关系的结论, 由此认为, 用容易准确度量的水量变化反映难以量测的生态环境等健康指标的变化更加简便准确。对于内陆河流健康的评价, 水量成为河流生命体系中核心决定要素, 内陆河水量在空间和时间尺度上的变化应当成为评判河流健康状况的重要标志。

## 1.1 河流演变分析指标及量化方法

基于内陆河水量沿程变化的特性,选择用流量的总流长( $L$ )、流量在河流中达到的理论上的稳定峰值( $Q_p$ )、河源至流量峰值出现点的河流长度(峰现流长 $L_p$ )、流量峰值以下衰减的流程总长度(衰减流长 $L_D$ )等指标因子来刻画河流流量在空间尺度上演变特征。选取1956~1970年、1971~1985年、1986~2000年3个15a时间段,分别研究各项指标在不同时间段的变化,确定不同时期流量在不同天然来水和人类干扰条件下的变化程度,依此重新认识内陆河水量在河流坐标上的变化规律。

在水量的时间尺度变化研究中,采用延时曲线法分析流量衰减段相应断面之间的流量时间变化关系。也就是对每个时间段(15a)180个月的流量,按照不同等级的流量级别统计发生的月数,对比相应河段同级流量下的时间延迟变化,来表述各时间段内流量在受天然来水和人类干扰条件下的时间变化关系。某流量等级以上月数出现的频率 $R_m = \text{流量等级以上月数} / \text{总月数} \times 100\%$ 。

## 1.2 河流健康评价方法

流量变化指标的河流健康度确定,是将每个流量指标的单项因子相对值变化范围划分为4个健康判别区间 $h_1$ (健康)、 $h_2$ (亚健康)、 $h_3$ (不健康)、 $h_4$ (病态),根据单项因子变化相对值所处的健康区间确定单项因子的健康度

$$P_i \in \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$$

采用集合方法计算出各单项因子的并集

$$\{P_Q\} = \{P_L\} \cup \{P_{Q_p}\} \cup \{P_{L_p}\} \cup \{P_{L_D}\}$$

从 $\{P_Q\}$ 中选取最大值作为流量指标的健康度 $P_Q$ 。延时指标只有1个因子,将其变化范围同样划分为4个健康判别区间,根据所在区间确定 $P_T \in \{h_1, h_2, h_3, h_4\}$ 作为健康度。

流量指标和延时指标是反映河水量时间变化和空间变化的两种不同属性,对于河流健康状况的贡献不同,因此采用AHP方法根据一定的比率标度定量化判断,确定比率标度系数 $a_1$ 和 $a_2$ ,得到综合评价

$$P = a_1 P_Q + a_2 P_T$$

为保证结果客观可靠,采用水土资源开发利用程度和专家群决策来标定比率标度系数。

## 2 结果及讨论

### 2.1 $Q_p$ 的变化

疏勒河1956~1970年、1971~1985年、1986~2000年 $Q_p$ 均为 $27.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,具有较好的稳定性。黑

河与疏勒河相似,3个时段的 $Q_p$ 为 $49.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,基本稳定。石羊河与疏勒河、黑河有着显著的不同,各时间段的 $Q_p$ 分别为 $24.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $22.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $21.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,稳定性较差,后两个时间段与第一个时间段相比,分别减小了 $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 。这种各时段减小的趋势是因上游土地利用等人类活动影响所致。

### 2.2 $L_D$ 受人类活动影响显著

3条河流中石羊河水资源开发利用程度达176%为最高,衰减率 $R_D$ 也是最高,达到-39.6%,疏勒河水资源开发利用程度最低为66.8%,衰减率 $R_D$ 也是最低仅-12.1%。分析黑河3个时间段的 $L_D$ 见图1,1986~2000年来水量比前两个时间段都大,而流量沿程加速减小,衰减流长也快速缩短,这个结果印证了黑河中游水土资源大量开发利用的实际。这种情况同样在疏勒河流域得到印证(图2)。石羊河不同时间段 $L_D$ 的缩短(图3),不仅与中游地区的水资源开发利用有关,而且与上游地区水资源的开发利用有关。

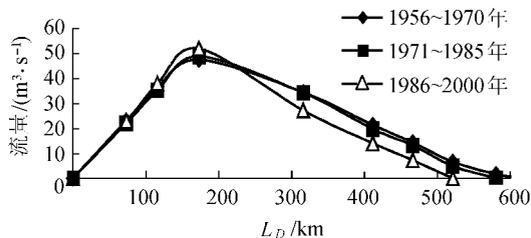


图1 黑河衰减流长

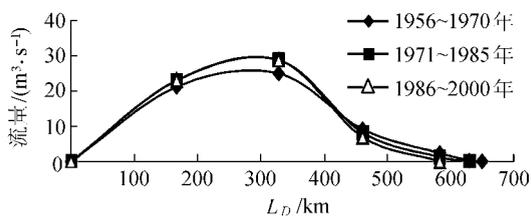


图2 疏勒河衰减流长

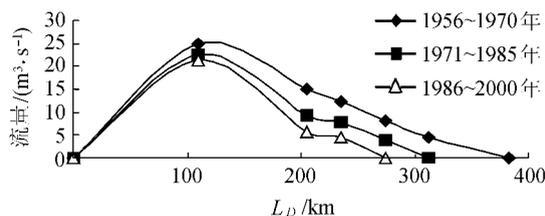


图3 石羊河衰减流长

### 2.3 流量年内分配产生变异

$Q_p$ 的年内分配过程与大多数北方河流类似,汛期流量远大于非汛期流量,黑河莺落峡水文站汛期流量占全年流量的81.5%,非汛期流量仅占18.5%。但是 $Q_p$ 以下主要河段的水量年内分配产生了较大的变异,黑河中下游正义峡水文站汛期(6~10月份)平均流量 $32.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ,占年平均流量的

52.3% ;非汛期 7 个月平均流量  $29.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ,占年平均流量的 47.7% ,与汛期流量十分接近 ,已经没有汛期与非汛期之别。疏勒河潘家庄、石羊河的蔡旗等各主要河段均属这种类型 ,形成了水量年内分配的均化现象。

## 2.4 流量延时指数

衰减河段内同级流量 ,在河流上断面出现的月次要大于下断面出现的月次 ,这种出现时间次数的延时现象成为内陆河流衰减段的基本规律 ,反映了内陆河水量在散失区消耗变化的普遍特征。各河流主要河段部分流量等级出现的月数频率  $R_m$  计算结果见表 1。

表 1 月数频率 %

断面	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	1956~1970 年	1971~1985 年	1986~2000 年	
疏勒河	5	97.2	100	99.4	
	昌马堡	10	67.2	77.8	78.9
	25	26.7	35.6	31.1	
	5	87.2	71.1	57.2	
	潘家庄	10	30.6	22.2	17.2
	25	1.7	1.7	1.7	
黑河	10	98.89	98.89	100.00	
	莺落峡	40	40.00	38.89	41.67
	120	6.67	9.44	10.56	
	10	85.00	83.89	75.56	
	正义峡	40	38.33	40.56	22.78
	120	1.11	1.67	0.56	
石羊河	2	100.0	98.3	100.0	
	上游	10	61.1	58.9	55.0
	30	33.9	37.8	33.3	
	2	97.2	83.9	63.3	
	红崖山	10	53.9	28.3	10.0
	30	0.6	1.1	0.0	

从黑河莺落峡与正义峡两断面的分析中发现 ,1956~1970 年平均流量为  $12 \sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$  发生的月份 ,下断面正义峡要早于上断面莺落峡 ,1971~1985 年平均流量为  $15 \sim 40 \text{ m}^3/\text{s}$  ,此种现象同样存在。同时 ,疏勒河、石羊河的上下游流量与黑河的基本相似 ,没有出现下游大于上游的现象。黑河这种现象的成因主要是区间内水量运动规律发生变化 ,引起年内分配变化和不同时间段水量消耗变化剧烈的结果。

## 3 河流健康评价

水土资源的开发利用促使内陆河流域中下游水量发生了显著变化 ,疏勒河、黑河和石羊河的衰减流长与河流总长度相比 ,分别缩短了 67 km、289 km 和 118 km ,河流的健康状况不断恶化。以河流水量变化的主要指标  $L_p$ 、 $Q_p$ 、 $L_D$  和  $R_L$  ,按照健康、亚健康、不健康和病态 4 种类型分别进行判别。

a. 内陆河流上游山区是径流形成区 ,水量的变化对于全流域生态环境及河流沿程变化十分敏感 ,从 3 条河流的总体情况可以确定 ,健康河流应当保持  $L_p$  和  $Q_p$  相对不变。当  $L_p$  和  $Q_p$  变化相对值小于 3% ,河流属亚健康 ;在 3%~5% ,河流属不健康 ;大于 5% 河流成为病态。

b. 中下游是径流散失区 ,也是人类生产生活主要活动区。疏勒河衰减流长  $L_D$  相对河流总长度的缩短率  $R_L$  为 10.3% ,水土资源的开发利用没有对中下游地区的生态环境产生明显的影响。黑河和石羊河缩短率  $R_L$  分别为 35.7% 和 31.2% 都超过了 30% ,下游的额济纳旗和民勤都发生了严重的生态环境问题。因此 ,当  $L_D$  缩短率  $R_L$  小于 10% 时 ,河流属健康 ; $R_L$  为 10%~20% 河流属亚健康 ; $R_L$  为 20%~30% 河流属不健康 ; $R_L$  大于 30% 河流属病态。

c. 内陆河水量延时变化随河段长度变化而不同。研究 3 条河流 100~140 km 河段 ,径流散失区的人类主要活动区  $Q_p$  以下重点河段 , $R_m$  为 100% 内的流量等级极值比(最小值与最大值比率)

$$R_T = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} \times 100\%$$

$R_T$  小于 5% 河流属健康 ,大于 10% 河流属病态 ,在 5%~10% 河流属亚健康和亚健康。

## 4 结 论

河西内陆河流受到人类活动的影响普遍存在健康问题 ,突出表现在中游地区水土资源开发利用过度 ,导致中下游地区河流衰减流长缩短、流量减小、年内月分配均化、流量延时增大。石羊河健康问题最为严重呈现出病态 ,黑河次之呈现出亚健康状态 ,疏勒河较轻呈亚健康状态。

### 参考文献 :

- [1] 王薇 ,李传奇. 维持河流健康生命研究[J]. 人民黄河 , 2005 27(7):1-4.
- [2] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利 , 2005(4):15-19.
- [3] 赵彦伟 ,杨志峰. 河流健康 :概念、评价方法与方向[J]. 地理科学 , 2005 25(1):119-124.
- [4] MOOG O ,CHOVANEK A. Assessing the ecological integrity of rivers : walking the line among ecological , political and administrative interests[J]. Hydrobiologia , 2000 422/423 :99-109.
- [5] COLIN R T ,GAIL T ,LAUEL D T. Development of a tool to facilitate participation of maori in the management of stream and river health[J]. Eco-Health 2004(1):184-195.

(下转第 35 页)

表 3 模型拟合及误差计算

年份	$k$	$X^{(1)}$	$\hat{X}^{(1)}$	$X^{(0)}$	$\hat{X}^{(0)}$	$\Delta(k)$	$\epsilon(k)/\%$
1997	0	1.8513	1.8513	1.8513	1.8513	0.00	0.00
1998	1	3.8608	3.9393	2.0095	2.0881	-0.0785	-3.91
1999	2	5.7922	5.8816	1.9314	1.9421	-0.0107	-0.55
2000	3	7.6499	7.6878	1.8577	1.8063	0.0514	2.76
2001	4	9.4684	9.3679	1.8185	1.6801	0.1384	7.61
2002	5	11.1037	10.9305	1.6353	1.5626	0.0727	4.44
2003	6	12.4233	12.3839	1.3196	1.4534	-0.1338	-10.14
2004	7	13.7332	13.7357	1.3099	1.3518	-0.0419	-3.20

-10.14% ~ 7.61% (表 3), 其残差平均值  $\epsilon_{avg} = 4.66\% < 10\%$ , 平均精度  $p = 95.34 > 95\%$ , 模型拟合精度较高, 模型判为优。

b. 后验差检验。经计算, 后验差比值  $C = 0.32 < 0.35$ , 模型判为好。

并计算得

$$\max |\Delta(k) - \bar{\Delta}| = 0.1387 < 0.17$$

则小误差概率:  $P = \{|\Delta(k) - \bar{\Delta}| < 0.6745S_1 = 0.17\} = 1$ , 模型级别为好。

c. 关联度检验。求得关联系数分别为:  $r(1) = 1.0000$ ,  $r(2) = 0.5140$ ,  $r(3) = 0.8859$ ,  $r(4) = 0.6179$ ,  $r(5) = 0.3750$ ,  $r(6) = 0.5334$ ,  $r(7) = 0.3830$ ,  $r(8) = 0.6647$ 。

关联度  $r = 0.62 > 0.60$ , 根据经验, 当  $\rho = 0.6$ , 关联度大于等于 0.60 时, 模型预测精度是可信的, 模型拟合程度见图 1。

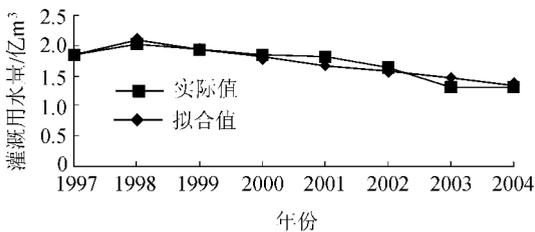


图 1 模型计算值与实际值拟合

### 2.3 需水量预测

经过检验的模型符合精度要求后, 可用于外推预测。2005 ~ 2012 年长治市农田灌溉需水量预测结果见表 4。

表 4 长治市农田灌溉需水量预测结果

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
预测需水量/亿 m³	1.2573	1.1694	1.0877	1.0116	0.9409	0.8752	0.8140	0.7571

### 3 结 语

根据灰色预测原理建立的农田灌溉需水量 GM(1,1) 预测模型, 经检验, 平均精度达到 95% 以上。由预测结果看, 农田灌溉需水量呈缓慢回落趋

势, 与实际较吻合。随着经济发展, 正在走向产业化的农业用水量逐步减少, 另外耕地面积被挤占, 水资源趋于紧缺, 水价的经济杠杆作用、用水效率的提高以及节水措施都使得现有的大水漫灌向高产节水农业模式转化。

### 参考文献:

[1] 冯丹, 姬长生. 基于等维新息 GM(1,1) 模型的能源需求量预测 [EB/OL]. [2006-09]. <http://www.paper.edu.cn>.

[2] 邓聚龙. 灰色系统理论教程 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 175-264.

[3] 邓聚龙. 灰色预测与决策 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988: 59-135.

[4] 王开章, 刘福胜, 孙鸣. 灰色模型在大武水源地水质预测中的应用 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2002, 33(1): 67-70.

[5] 郝永红, 黄登宇, 张文忠, 等. 山西神头泉流量的灰色预测模型研究 [J]. 水利学报, 2004(2): 112.

(收稿日期 2006-11-24 编辑 舒建)

(上接第 26 页)

[6] KOSSENKO M M, OSTROUMOVA E, GRANATH F, et al. Studies on the Techa river offspring cohort: health effects [J]. Radiat Environ Biophys, 2002, 41: 49-52.

[7] RICHARD H N, CHARLES P H. Monitoring river health [J]. Hydrobiologia, 2000, 435: 5-17.

[8] SCHOFIELD N J, DAVIES P E. Measuring the health of our rivers [J]. Water, 1996, 2(6): 316-321.

[9] 赵彦伟, 杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探 [J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 349-356.

[10] 吴阿娜, 杨凯, 车越, 等. 河流健康状况的表征及其评价 [J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 602-608.

[11] 张学成, 贾新平, 畅俊杰. 维持黄河生命低限流量研究 [J]. 人民黄河, 2005, 27(10): 43-48.

[12] 高前兆, 仵彦卿. 河西内陆河流域的水循环分析 [J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 391-397.

(收稿日期 2006-09-26 编辑 舒建)