

半干旱地区河流生态健康评价指标体系研究

侯思琰¹ 石 维¹ 高 红²

1. 水利部海河水利委员会水资源保护科研所 天津 300170

2. 天津现代职业技术学院 天津 300222

摘 要 在充分调查研究和总结吸收国内外典型经验的基础上, 针对半干旱地区——海河流域平原河流“有河皆干, 有水皆污”的生态环境状况, 从水质、水量、生物状况 3 个要素选取河流生态健康的评价指标, 确定评价标准与方法, 最终建立河流健康评价指标体系。并选取典型河流北运河、永定河、卫运河、滦河, 评价其生态健康状况。

关键词 河流健康 指标体系 海河流域

一、国内外的研究进展

随着国际上对河流健康状况研究的日趋重视, 近 10 年来, 河流健康状况评价已在很多国家先后开展, 并分别提出了不同的河流健康状况评价内容及评价指标。澳大利亚政府于 1992 年开展了“国家河流健康计划”, 其中用于评价澳大利亚河流健康状况的主要工具是澳大利亚河流评价体系^[1]; 除此之外, 近年来澳大利亚的溪流状况指数^[2,3]研究将河流健康状况评价用于指导河流管理, 拓展了河流健康评价的使用范围。美国环境署于 1999 年推出的《快速生物评价协议》(简称 RBP_s) 是一种综合评价方法^[4], 经过 10 年的发展与完善, 于 1999 年推出了新版 RBP_s, 提供了河流藻类、大型无脊椎动物、栖息地、鱼类的监测及评价方法标准。英国 1998 年提出的“英国河流保护评价系统”^[5], 该评价系统通过调查评价由 35 个属性数据构成的六大恢复标准来确定英国河流的保护价值, 该评价系统已经成为一种被广泛运用于英国河流健康状况评价的技术方法。

我国多年前就引入了河流生态系统健康概念, 但近几年才开始将河流健康评价作为审视河流生态系统的有效手段^[6-8]。近年来, 在对城市河流水环境的整治中, 开始考虑水质指标之外的其他影响因素。1999 年, 上海市环境监测中心建立的适用于黄浦江水环境状态评价的指标体系中^[9], 就包括了理化指标、生物指标、营养状况指标、景观指标 4 部分内容。吴阿娜^[10]在对我国城市河流健康状况进行评价时, 选取河流水文、河流形态、河岸带、理化指标、河流生物物理指标对上海市城市河流进行了评价。刘晓燕^[11]根据黄河的具体情况, 认为“连续的河川径流、通畅安全的水沙通道、良好水质、良好的河流生态和一定的供水能力”是健康黄河的主要标志。长江水利委员会提出“维护健康长江、促进人水和谐”的治江新思路, 并根据这一思路建立科学的指标体系和评价标准^[12]。

二、选取生态健康评价指标

根据国内外的研究成果, 一般认为^[3,13,14]河流生态系统可以用水质、水量、河岸带、物理结构与生物体 5 个要素来表达, 这 5 个要素相互依存, 相互影响, 相互辅助完成不同的河流生态过程, 发挥不同的功能, 有机组成完整的河流生态系统。总结归纳河流的生态健康评价要素如下, 见表 1。

表1 河流生态系统健康评价要素

评价要素	类 别	详细指标
水 量	水文状况	修正后的年平均流量偏差
		因流域渗透能力变化引起的日流量变化
		因水电站建设引起的日流量变化
	水 量	水资源开发利用率
		河干长度
		干涸天数
		断流天数
水 质	流 体	水质平均污染指数
	底 质	底泥平均污染指数
水生生物	浮游生物	浮游植物多样性指数
	底栖生物	底栖动物群落多样性指数
河岸带状况	水土流失控制	防护带宽度
		河岸植被带的宽度
		河岸植被的纵向连续性
		结构的完整性
		外来植被的覆盖
		本土植被重建的状况
		河岸湿地和洼地的状况
	景观建设	亲水景观建设面积、效果、可达性
	防 洪	防洪标准
	交换能力	河岸与河道固化强度
物理结构	物理稳固性	河岸稳定性
		河床退化和侵蚀
	连通性	与周围自然生态斑块连通性
		河流廊道连续性
	栖息与洄游	鱼类栖息地状况
		鱼道状况

由于海河流域具有特殊的生态修复布局和水资源配置状况，国内外对河流健康的评价方法并不适用于海河流域，并且数据不易得、计算方法烦琐，故不能采用传统“5要素”组成的指标体系，而应根据海河流域平原河道生态环境现状建立生态系统评价指标体系。

河岸带中的景观建设及防洪指标侧重于河流的社会功能方面，而海河流域正是由于过分强调社会效益，过度开发河流，削弱了河流的自然功能，从而引起了一系列的生态问题。因此将生态恢复作为核心问题，依此为依据选取指标体系。经研究分析认为，海河流域目前最突出的问题是水质恶化、水量减少、生物多样性衰退，考虑指标的独立性、简明以及数据的可得性^[15]，从水质、水量、生物状况三个要素选取河流生态健康的评价指标。其中生物指数已经涵盖了水生生物

及河岸带植被覆盖情况,并且可以反映物理结构中鱼类栖息地状况。海河流域几乎不存在珍稀的洄游性鱼类,河流物理结构中的连通性、鱼道状况可以不予考虑。同样物理结构中的物理稳固性也非造成海河流域生态问题的主因,故将河岸带、物理结构这两方面的因素弱化。

水是生态之源,而水之魂在于质,生物状况则是对水量、水质现状的集中反映,根据海河流域的具体特征可选用以下的详细指标,见图1。

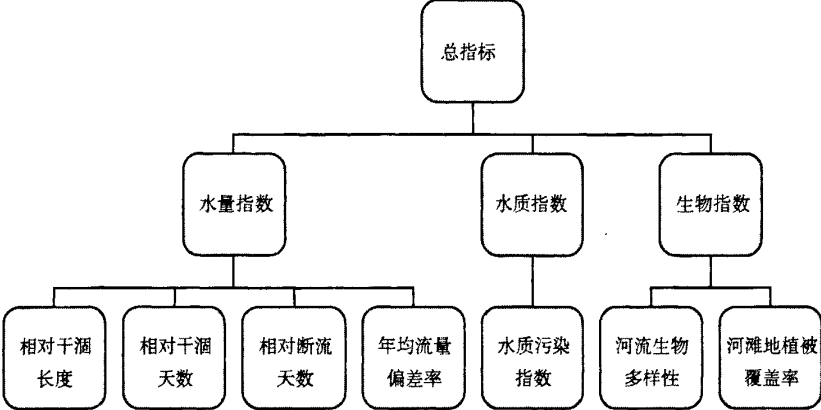


图1 海河流域平原河流生态系统健康评价指标

三、评价标准的建立

(一) 总评价标准

评价标准的建立是为了更好地对流域河流的健康进行诊断,正确评价河流的健康现状。指标体系的总评价标准见表2。对难以准确定量表达的定性指标,以分值阈“0~20、20~40、40~60、60~80、80~100”代表5个级别的标准,各具体指标评分在公众参与的基础上由专家评判完成。对定量指标的标准,则借鉴有关历史资料、相关研究成果与国家适用标准,通过多区域对比分析确定。

表2 总评价标准

总指标	评价标准	分指标					
		水量指数	评价标准	水质指数	评价标准	生物指数	评价标准
濒于崩溃	0~20	常年干涸	0~20	严重污染	0~20	生物绝迹	0~20
病态	20~40	季节性有水	20~40	中度污染	20~40	生物物种单一	20~40
亚健康	40~60	水量一般,季节性干涸	40~60	轻微污染	40~60	生物多样性一般	40~60
基本健康	60~80	水量尚可,间歇性断流	60~80	水质尚可	60~80	生物多样性较丰富	60~80
健康	80~100	水量充沛,常年流动	80~100	水质清洁	80~100	生物多样性丰富	80~100

(二) 水量评价标准

王薇等^[16]认为与评价人的健康相类似,评价河流的健康状态需要一个河流的基准状态作为参照点。例如,澳大利亚“维多利亚河流健康战略”把欧洲移民前的河流作为基本状态。通过对卫运河、北运河、永定河三条典型河流历史(60年代)及现状(2000-2005年)水量状况对

比分析可以看出(见表3):在基本上未受水利工程影响的60年代,三条平原河流均出现断流、干涸情况,永定河在60年代平均干涸天数高达198天,而卫运河在60年代平均断流天数竟然高于现状年。故而只单纯根据现状断流、干涸天数计算河流健康指标中的水量指数,并不客观,而且不能反映水利工程建设以后,人类活动影响平原河流,使其断流、干涸情况发生的变化。所以,本研究提出相对于干涸长度、相对于干涸天数以及相对断流长度指标的概念,是指现状年(2000-2005年均值)与未受人类活动影响的历史(60年代均值)断流、干涸情况下相比较来计算水量指数。

表3 历史及现状水量状况对比分析

河流名称	水文测站名称	现状(2000-2005年)断流天数	历史(60年代)断流天数	现状(2000-2005年)干涸天数	历史(60年代)干涸天数	现状(2000-2005年)干涸长度	历史(60年代)干涸长度	60年代最枯年份	最枯年径流量(万吨/年)	60年代最丰年份	最丰年径流量(万吨/年)	60年代最枯年比最丰年(%)	现状年(2000-2005年)与多年平均相比%
卫运河	临清	81.0	114.0	55.0	12.0	17.8	39.0	1963年	64964.16	1966年	1021766.4	-93.6	-68.7
北运河	北关闸	245.0	99.0	58.3	8.0	27.3	18.0	1968年	34058.88	1969年	87039.36	-60.9	-2.7
永定河	固安	365.0	198.0	365.0	198.0	146.8	96.0	1966年	15168.82	1960年	99653.76	-84.8	-100.0

从上表还可以看出,60年代水量的波动就比较,卫运河、北运河及永定河在60年代最枯年比最丰年水量减少分别为93.6%、60.9%和84.8%。可见一定范围的水量减少并不影响河流的生态系统。且参考特纳法^[17],认为各水期流量平均值占多年平均流量的100%~60%为最佳范围,60%~40%为较好状态,40%~20%为尚可状态,20%~10%为较差状态,10%和5%为可忍受的最小流量和极端最小流量。与本研究设定的年平均流量偏差率各等级相符合。水量指数的具体评价标准见表4。

表4 水量指数的具体评价标准

指数	评价标准	详细指标			
		相对干涸长度	相对干涸天数	相对断流天数	年平均流量偏差率(%)
常年干涸	0~20	40~100	40~100	60~100	-100~-90
季节性有水	20~40	20~40	20~40	40~60	-90~-80
水量一般,季节性干涸	40~60	0~20	0~20	20~40	-80~-60
水量尚可,间歇性断流	60~80	≤0	≤0	0~20	-60~-40
水量充沛,常年流动	80~100			≤0	-40~0
	100				≥0

不同水量及过水情况下,在评价中起决定性因素的是某一种或某几种详细指标,故水量指数(用 $I_{\text{水量}}$ 表示)的计算方法有别于生物及水质指数,具体方法如下。

根据分值阈,采用差值法计算相对于干涸长度、相对于干涸天数、相对断流天数、年平均流量偏差率对应的评价标准,分别用 $I_{\text{相对干涸长度}}$ 、 $I_{\text{相对干涸天数}}$ 、 $I_{\text{相对断流天数}}$ 及 $I_{\text{年偏差}}$ 表示。

当相对断流天数函数=0,年平均流量偏差率≥0时, $I_{\text{水量}}=100$;

当相对断流天数函数=0, $I_{\text{年偏差}} \in (0, -90)$ 时, $I_{\text{水量}} = I_{\text{年偏差}}$;

当相对干涸长度函数=0, 相对干涸天数函数=0, 相对断流天数函数 $\neq 0$ 时, $I_{\text{水量}} = (I_{\text{年偏差}} + I_{\text{相对断流天数}}) / 2$, 当计算所得 $I_{\text{水量}} < 60$ 时, 取 $I_{\text{水量}} = 60$;

当相对干涸长度函数 $\neq 0$ 或相对干涸天数函数 $\neq 0$, $I_{\text{水量}} = (I_{\text{相对干涸长度}} + I_{\text{相对干涸天数}}) / 2$ 。

(三) 水质评价标准

水质指数的具体评价标准见表5。

表5 水质指数的具体评价标准

指 数	评价标准	详细指标
		水质污染指数
严重污染	0 ~ 20	0 ~ 20
中度污染	20 ~ 40	20 ~ 40
轻微污染	40 ~ 60	40 ~ 60
水质尚可	60 ~ 80	60 ~ 80
水质清洁	80 ~ 100	80 ~ 100

(四) 生物评价标准

生物指数的具体评价标准见图2。

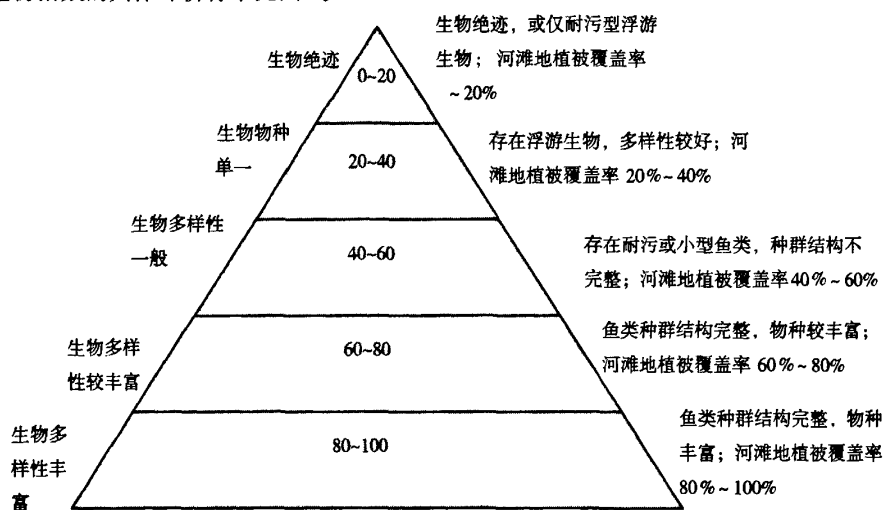


图2 生物指数具体评价标准

四、指标的计算

河滩地植被覆盖率及年平均流量偏差率采用传统方法计算。

河流及河岸带水生物: 通过是否有鱼类、浮游生物及其多样性判别。

相对干涸长度: 干涸是指河床没有水体覆盖, 相对干涸是指现状年(2000~2005 年均值)与未受人类活动影响的历史(60 年代均值)情况下相比较, 评价函数取值不应大于100, 即按下式计算。

$$F(L) = 100 \times \frac{L_2 - L_1}{L_0 - L_1}, \text{ 当 } L_1, L_2 > 0$$

其中: $F(L)$ ——评价函数;

L_1 ——历史上的干涸长度;

L_2 ——现状的干涸长度;

L_0 ——评价河长。

相对干涸天数: 与河道相对干涸长度的评价函数类似, 按下式建立。

$$F(t) = 100 \times \frac{t_2 - t_1}{365 - t_1}, \text{ 当 } t_1, t_2 > 0$$

其中: $F(t)$ ——评价函数;

t_1 ——历史上的干涸时间, 以日计;

t_2 ——现状的干涸时间, 以日计。

相对断流天数: 断流是指河段内没有水量流入或流出, 水体处于静止状态; 河道断流现象说明河道生态环境质量是差的, 体现人为活动、水利设施对河流流速以至生态的影响; 相对断流天数也是与历史水量情况相比得到, 计算方法参考相对干涸天数。

河流水质污染指数: 参考相关国家标准^[18,19]确定各水质项目的浓度阈值, 见表6, 具体计算方法采用内插法。

水质V类及优于V类的河流采用单因子指数法。

依据各指标对生态的贡献率, 砷、汞、镉、铬(六价)、铅等毒性大、自净力差且在生物体内容易累计, 化学需氧量、五日生化需氧量会造成溶解氧降低, 而溶解氧过低可以导致水生生物窒息死亡, 故将以上这些指标定为对生态影响很大的水质指标, 记为 $I_{\text{很大}}$; 其余定为生态影响一般的水质指标, 记为 $I_{\text{一般}}$ 。

对于水质劣V类的河流, 当 $I_{\text{很大}} \leq I_{\text{一般}}$ 时, $I = I_{\text{很大}}$;

当 $I_{\text{很大}} > I_{\text{一般}}$ 时,

最后计算结果 $I > 60$ 时, 取 $I = 60$ 。

表6 河流水质污染指数计算浓度阈值对照表

单位: mg/L

指数值		100	90	80	70	60	50	40	30	20	0
项 目											
生态 影响 很大	溶解氧	≥饱和率 90% (或 7.5)	6	5	3	2	1.5	1	1	0.4	<0.4
	化学需氧量 (COD)	≤15	15	20	30	40	50	60	100	120	>150
	五日生化需氧量 (BOD ₅)	≤3	3	4	6	10	10	20	30	60	>60
	砷	≤0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	>0.1
	汞	≤0.00005	0.00005	0.0001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	>0.001
	镉	≤0.001	0.005	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	>0.01
	铬(六价)	≤0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	>0.1
	铅	≤0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	>0.1
	氰化物	≤0.005	0.05	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5	>0.5

指数值		100	90	80	70	60	50	40	30	20	0
项 目	氨 氮	≤0.15	0.5	1	1.5	2	5	8	25	25	>25
	总磷 (以 P 计)	≤0.02	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	3	5	>5
	总 氮	≤0.2	0.5	1	1.5	2	15	20	20	20	>20
	铜	≤0.01	1	1	1	1	1	1	1	1	>1
	锌	≤0.05	1	1	2	2	2	2	2	2	>2
	氟化物 (以 F-计)	≤1	1	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	>1.5
	硒	≤0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.1	0.1	0.1	0.1	>0.1
	挥发酚	≤0.002	0.002	0.005	0.01	0.1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	石油类	0.05	0.05	0.05	0.5	1	1	3	5	15	>15
	阴离子表面活性剂	≤0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	1	2	5	>5
	硫化物	≤0.05	0.1	0.2	0.5	1	1	1	1	1	>1
	粪大肠菌群 (个/L)	≤200	2000	10000	20000	40000	40000	40000	40000	40000	>40000

五、权重及评价方法

(一) 权重的确定

参考国内外文献中水质、水量及生物状况权重的比例关系, 然后采用专家咨询法对分指标的权重进行分配研究, 对详细指标的权重采用层次分析法^[20]来确定权重。各详细指标总权重记为 w_i 。各详细指标所占分指标的权重记为 c_i 。

当水量指标中的年平均流量偏差率小于 -90% 时, 认为水量低于可忍受的最小流量 (参考特纳法), 会对生态产生很大影响。水量指数成为生态系统的主导指数, 权重增加为 0.539, 水质指数的权重相应减小为 0.297, 见图 3。

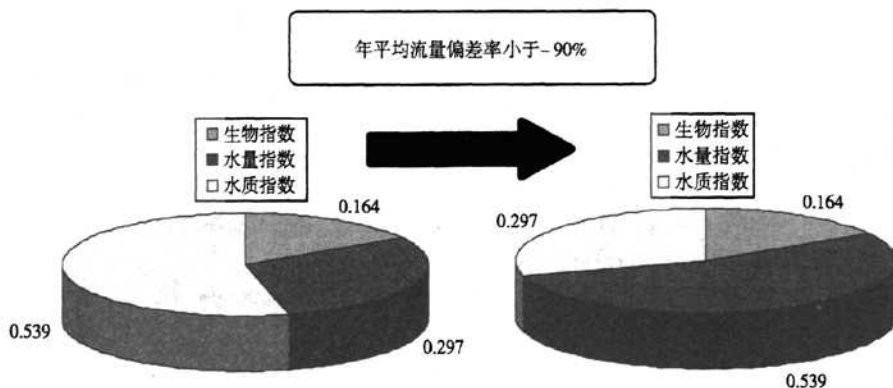


图3 指标权重

(二) 评价方法

分指标的评价。

$$P_i = \sum_{i=1}^n r_i \times c_i$$

可以得到河流生态指数、干涸指数及污染指数的评价。
综合评价：根据综合评价指数权值与量化值，可计算出河流生态系统健康评价的综合指数。

$$P_i = \sum_{i=1}^n r_i \times w_i$$

六、典型河流评价举例

以北运河干流为例，根据已建立的评价指标体系评价其河流生态健康情况。通过综合规划修编汇总及现场查勘，得到水量、水质及生物方面的数据。北运河干流水质全部劣V类，最大超标项目为氨氮，超标倍数在8.35~14.8之间。
北运河现状平均断流天数为245天，干涸天数58天，干涸长度27.3km。根据历史资料得知60年代土门楼—屈家店平均断流99天，河干8天，干涸长度18.0km，其他河段无断流干涸情况。与20世纪60年代相比较得到现状相对干涸长度、相对干涸天数及相对断流天数指数。
北运河河滩地植被覆盖率在90%~100%之间，水中有鲢鱼、草鱼、鲫鱼、鲤鱼等鱼种。综合水质、水量、生物三方面的数据，得到北运河生态健康状况评价结果，见表7。

表7 北运河生态健康状况评价结果

河 段	总指标		分指标					
			生物指数		水量指数		水质指数	
	数值	评价	数值	评 价	数值	评 价	数值	评 价
北关闸 - 牛牧屯	41.8	亚健康	73.3	生物多样性较丰富	48.6	水量一般， 季节性干涸	28.6	中度污染
牛牧屯 - 土门楼	48.5	亚健康	80.0	生物多样性丰富			38.9	中度污染
土门楼 - 筐儿港	49.8	亚健康	86.7	生物多样性丰富			39.2	中度污染
筐儿港 - 屈家店	52.8	亚健康					44.8	轻微污染

以上河流健康指标的分值是分河段描述的，不能明确反映每条河流整体的健康水平。故根据各河段分值、河段长度加权平均的方法得到北运河整体健康状况为亚健康。

参考文献

[1] RAPPORT D J, COSTANZA R, MCMICHAEL A J. Assessing ecosystem health, TREE, 1998, 13 (10): 397 - 402.

[2] LADSON A R, WHITE L J. An index of stream condition: Reference manual (second edition), Melbourn: Department of Nature Resource and Enviroment, 1999: 1 - 65.

[3] LADSON A R, WHITE L J, DOOLAN J A, et al. Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia. Freshwater Biology, 1999, 41: 453 - 468.

[4] RAPPORT D J, BOHM G, BUCKINGHAM D, et al. 1999. Ecosystem health: the concept, the ISEH, and the important tasks ahead. Ecosystem Health, 5 (2): 82 - 90.

[5] COSTANZA R Special section : Forum on valuation of ecosystem services The value of ecosystem services Ecological Economics 25, 1998: 1 - 2.

[6] 董哲仁. 河流健康的内涵 [J]. 中国水利, 2005, (4): 15 - 18.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 徐祖信. 河流污染治理规划理论与实践 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.

[10] 吴阿娜. 河流健康状况评价及其在河流管理中的应用 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005, 5.

- [11] 刘晓燕. 构建黄河健康生命的指标体系 [J]. 中国水利, 2005 (21): 28 - 32.
- [12] 杨淳, 陈进. 维护健康长江涉及的关键科学问题 [J]. 水利水电快报, 2005, 26 (14): 1 - 4.
- [13] 殷会娟, 冯耀龙. 河流生态环境健康评价方法研究 [J]. 中国农村水利水电, 2006, (4).
- [14] 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, 2006, 16 (3).
- [15] 耿雷华, 刘恒, 钟华平, 等. 健康河流的评价指标和评价标准 [J]. 2006, 37 (3): 253 - 258.
- [16] 王薇, 李传奇. 维持河流健康生命研究 [J]. 人民黄河, 2005, 27 (7).
- [17] 王占兴. 田纳特法在确定寒区中、小河流生态环境需水量中的修正 [J]. 2005, 32 (4).
- [18] GB 3838 - 2002. 地表水环境质量标准 [S].
- [19] GB 18918 - 2002. 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S].
- [20] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.