

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2011.06.013

玉符河生态修复目标及方案研究

倪红珍, 贾金生, 王 芳, 殷峻暹, 傅小城

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要 :分析济南市玉符河存在的主要生态环境问题,采取样点调查方法,寻找玉符河生态水文规律,提出玉符河生态修复的目标和方案,建议在玉符河生态恢复过程中进行长期的水文与生物监测,注重本底资料的完善与积累,以便为我国河流生态修复提供借鉴。

关键词 :玉符河;生态修复;底栖生物完整性指数;生态水文规律

中图分类号 :X171.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-6933(2011)06-0053-06

Ecological restoration target and plan analysis for Yufuhe River

NI Hong-zhen, JIA Jin-sheng, WANG Fang, YIN Jun-xian, FU Xiao-cheng

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract :This paper analyzes the main problems of the ecological environment in the Yufuhe River Basin in Jinan City. The ecological restoration target and plan for the Yufuhe River are proposed based on the eco-hydrological law for the river, using the point investigation method. The study suggests long-term hydrological and biologic monitoring during the ecological restoration process of the Yufuhe River, and the accumulation and improvement of the background information about the river, which can provide references for river restoration in China.

Key words :Yufuhe River; ecological restoration; benthic index of biotic integrity (B-IBI); eco-hydrological law

长期以来,由于人类不合理地开发利用水资源,使河流受到污染,生态环境问题日益严峻。随着生活水平的提高,人类开始关注与自己生存环境密切相关的河流生态问题,努力追求与自然的和谐统一。当前,最大限度地避免或减少水利工程开发带来的负面生态环境影响,把生态调度和生态修复纳入了水利开发利用工作中,追求水利工程开发与生态保护的平衡,实现经济效益与生态效益的双赢,这已成为世界各国关注的热点问题。本文以山东省济南市玉符河为例,探讨受损河流的生态修复目标和对策。

1 玉符河主要生态环境问题

玉符河位于济南市西南部,为 5 级河流,其干支流上,有卧虎山水库等大中小型水库 20 座。三川汇合处的卧虎山水库距济南市 25 km,是济南市唯一一座大型水库,也是济南市重要水源地之一,水库多年

平均净来水量 6 638 万 m^3 ,2002 年完成了水库增容工程后,兴利库容由 3 890 万 m^3 提高至 6 200 万 m^3 ,年均向济南市供水 2 600 万 m^3 ,提供农业灌溉用水量 900 万 m^3 。玉符河卧虎山水库以下有近 2/3 的河段位于出山口冲积扇地带,河流底质为粒径 5~20 cm 的卵石,渗漏强烈,是济南市地下水的重要补给源之一,也是维护济南市泉水自流的主要水源。

受自然降水条件及上游水资源开发利用等多方面的影响,近年来玉符河生态环境问题突出,表现在:

a. 河道萎缩,岸滩破坏严重,河流地貌发生了较大的变化,河流功能退化,河道行洪能力降低。

b. 生态系统衰退。河流来水减少,下游河道断流天数年均达 240 d,河道连通性遭破坏,加之沿河水质被污染,动植物生境受损,生物多样性日益降低。以 20 世纪 40 年代河流的生物物种和数量为生态本底值^[1],现状调查结果显示,目前河流生物物种

和数量只为本底值的 40%。

c. 自然景观严重受损。玉符河流域对涵养泉城地下水源、节水保泉有着重要作用,同时也是济南主城区与西部城区之间的重要生态隔离带。由于受人类活动的严重干扰,河道断流,沿岸植被枯变,河流流经的环城高速、104 国道以及京沪高速等重要路段的自然秀丽景观原貌消失。

d. 湿地萎缩。玉符河从下游溢出段到入黄河口的河段距济南市区较近,一方面由于经济发展占用土地,另一方面因过去河道挖沙使下游成为大小不等的串珠状水塘,从而使原有湿地面积大幅萎缩,自然生态环境受损。

随着济南市区“东拓西进”战略的实施,玉符河的生态环境状况已难以满足城市整体发展需要,玉符河河道整治和生态修复工作被纳入济南市城市规划工作中,因此,需要针对玉符河生态环境问题,结合玉符河水资源情况,研究玉符河生态修复的可行性目标与方案,为玉符河生态修复建设提供技术支撑。

2 玉符河生态水文规律

2.1 生物调查与样点选取

河流是否健康通常采用河流的水文学、水化学、水生态以及河流廊道栖息地等 4 类主要指标评价^[2-10]。河流生态指标是河流健康评价的最高级别指标,而水文学、水化学及河流廊道栖息地指标是河流健康评价的基础指标。

国际上普遍采用生物完整性指标来表征河流生态健康^[4-24]。在河流生物评价中,大型底栖动物完整性指数一直是使用率最高的指标^[4-10, 25-29]。大型底栖生物完整性指数通常包括 5 个指标属性:底栖生物类群组成、物种丰富度、物种耐污性、摄食类群和多样性因子。对每一个指标分 3 个级别赋分,各指标赋分后相加就是 B-IBI 指数^[4-10]。每一个指标属性下面具体指标的选取随地理单元、河流特性的不同而不同。Kar^[4]指出,没有任何一项指标完全适用于所有地区,因此,使用适应于某一地区的河流生态健康评价指标,需要对本地区河流中的大型底栖动物进行全面的了解和详细的数据分析。按照河流的分级标准,3~5 级的山区河流是底栖生物丰富的河段,因此建议 3~5 级的山区河流生态健康评价指标用大型底栖无脊椎动物的评价指标(B-IBI)。小支沟直接入湖或入海的原平区河流,由于水域环境的转换,河流中通常有洄游鱼类,因此,建议 3~5 级的平原区河流用鱼类评价指标。

玉符河属于 5 级小河流,此次主要调查了玉符河河流大型底栖动物的群落组成状况,以研究玉符

河生态水文规律,判定玉符河生态健康状态。

为了全面了解玉符河大型底栖动物与水文要素之间的内在关系与规律,采样点设置原则为:①样点布设的全面性原则。在玉符河流域的各主要支流和干流上、中、下游分别设置采样点;②减少人为干扰的原则。在玉符河上游人为干扰较少的区域布设的样点较多;③水文监测断面要覆盖所有生物监测样点的原则。在玉符河全河段主要渗漏处以及河流生态恢复应考虑的特征断面上进行水量、流速、水深以及水质监测,水文监测断面覆盖所有生物监测样点。

2007 年 9 月、2008 年 3 月以及 2009 年 9 月先后 3 次实地调查了玉符河河流大型底栖动物的群落组成状况,样点分布见图 1。

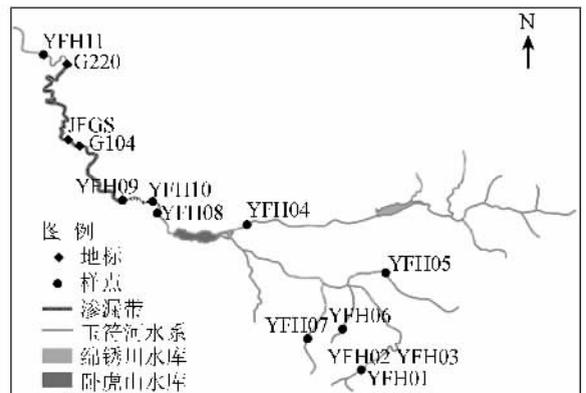


图 1 玉符河底栖生物样点分布图

2008 年 3 月 23—31 日,采用高精度 GPS 定位仪 TRINBLE5800(两点之间高程误差在毫米级),对玉符河卧虎山水库下游河段进行了地形测量,对得到的大量数据进行分析整理,获得了 54 个过流断面的剖面图,见图 2。同时监测了河流流速,调查了河床组成物质、区间来水以及地下水溢出带,摸清了河道两岸的水利工程。调查结果见表 1 与表 2。

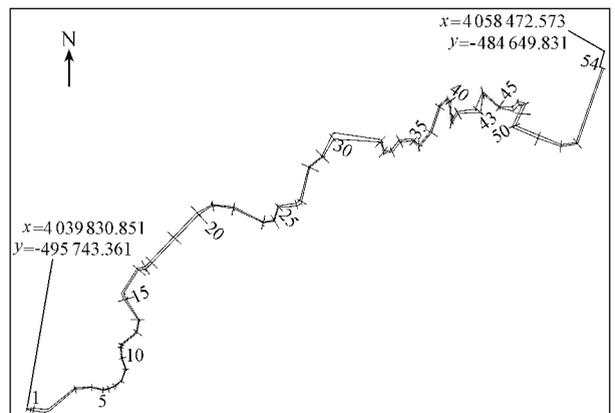


图 2 河道走势及测量断面分布图

调查结果表明,石块底质的底栖动物多样性较高(如样点 1、6),底泥底质的底栖动物多样性较低(如样点 10、11),这说明底栖动物更适合在石块底质

表 1 各样点生物多样性指数、密度及生物量

样点	香浓维纳指数	马加利夫指数	均匀度	辛普森指数	丰富度	密度/ (个·m ⁻²)	生物量/ (mg·m ⁻²)
YFH01	2.30	2.85	0.77	5.59	20	1133.3	1524.4
YFH02	1.79	2.17	0.66	3.00	15	966.7	532.2
YFH03	1.79	2.03	0.62	3.97	18	3688.9	24775.6
YFH04	1.10	1.21	0.43	2.39	13	10522.2	15425.6
YFH05	1.51	1.25	0.77	3.50	7	311.1	678.3
YFH06	1.94	2.16	0.65	4.25	20	4877.8	9416.7
YFH07	1.45	1.63	0.55	2.36	14	2844.4	2837.8
YFH08	1.69	1.91	0.63	3.37	15	1811.1	6497.8
YFH09	1.02	1.60	0.38	1.71	14	3055.6	9501.1
YFH10	1.77	1.35	0.91	5.26	7	244.4	2602.2
YFH11	1.10	1.37	0.48	2.09	10	1055.6	4671.1
均值			0.67	3.78	15.67	2303.70	
本底值			1.68	9.45	39.17	5759	

注:对照文献²,实测值均值为本底值的40%。

的生境下生存,这种底质使底栖动物有更为多样的栖息地。生境描述中最为自然的样点7,其生物多样性并不太高,原因可能是样点7的生境过于稳定,生物演化趋于一种稳定的格局,那些占优势的物种逐渐取代或排挤非优势物种,使它们消失或变少。这符合中度干扰条件下物种丰富度最高的理论。由于玉符河上下游河段的污染状况、两岸植被状况、土地利用方式及人为干扰状况大致相似,因此,可以得出结论:河流水量的大小和水文节律是影响河流底栖动物群落分布的主要因素,也是控制和恢复玉符河下段生态状况的基本要素。

2.2 玉符河生态水文规律

根据在玉符河所得的数据资料(表2)可知,各样点中河水理化指标相对较为稳定,不是引起底栖动物群落组成发生变化的主要因素,而变化明显的河流水文特征,如河流流速、水深,以及底质是影响河流底栖动物群落分布的主要影响因子。因此,选择底栖动物与流速、水深等相关关系来表征玉符河生态与水文要素的关系。

由表2可看出,样点8~11是污染较为严重的

表 2 各样点河流生境指标

样点	pH	水温/°C	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	ρ(DO)/ (mg·L ⁻¹)	盐度	氧化还原 电位/mV	溶氧 百分比/%	流速/ (m·s ⁻¹)	水深/ cm	底质组成/%
YFH01	9.15	10.5	316	10.32	0	-127	96.5	0.28	13.0	C 20 P 30 S 50
YFH02	9.18	7.7	313	10.48	0	-130	101.1	0.00	28.0	C 80 P 15 S 5
YFH03	9.16	10.7	317	10.11	0	-128	95.8	0.46	7.0	C 60 G 25 S 15
YFH04	8.08	14.7	890	10.74	0.2	-69	106.5	0.97	16.0	C 80 S 20
YFH05	8.30	13.2	597	9.85	0	-82	95.3	0.07	12.0	C 90 S 5 Silt 5
YFH06	8.92	12.8	491	9.75	0	-116	105.2	0.33	13.0	C 80 G+S 20
YFH07	8.30	14.3	551	9.88	1	-81	99.4	0.15	9.5	C 40 S 50 Silt 10
YFH08	8.61	13.2	626	10.99	0	-96	103.7	0.37	55.0	B 80 G 10
YFH09	8.61	13.2	626	10.99	0	-96	103.7	0.00	21.0	B 80 G 10
YFH10	8.61	13.2	626	10.99	0	-96	103.7	0.04	74.0	Silt 100
YFH11	7.94	10.7	602	6.11	0	-56	54.0	0.44	57.0	Silt 100

注: B 大石块; C 石块、大卵石; P 小卵石; G 砾石; S 粗砂; Silt 淤泥。

河段,其底栖生物状态不具有代表性,不能反映原生态与水文要素的自然规律,因此,选取天然状况相对较好的河段样点1~7来分析底栖生物与水文条件的关系。河流的水深与流速可概化为单宽流量的一个变量或指标表示。一个变量或指标表征的河流水文条件可简化计算。

以各样点关键的多样性指数指标实测值除以本底值计算底栖生物完整性指数(B-IBI),计算结果见表3。

表 3 底栖生物不相关指标通量值

样点	辛普森指数	均匀度	丰富度	密度/ (个·m ⁻²)	B-IBI 相似 指数
YFH01	0.59	0.46	0.51	0.20	1.76
YFH02	0.32	0.39	0.38	0.17	1.26
YFH03	0.42	0.37	0.46	0.64	1.89
YFH05	0.37	0.46	0.18	0.05	1.06
YFH06	0.45	0.39	0.51	0.85	2.19
YFH07	0.25	0.33	0.36	0.49	1.43

注:略去离散点。

通过分析发现,玉符河底栖生物完整性相似指数与单宽流量呈现出相对较好的相关关系,见图3,表明玉符河生态水文规律比较稳定。

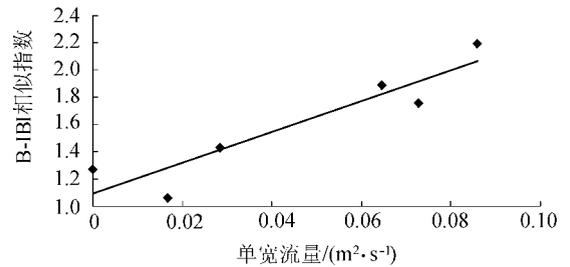


图 3 底栖生物完整性相似指数与单宽流量关系

玉符河底栖生物完整性相似指数与单宽流量的相关关系可用式(1)表示:

$$y = 11.428x + 1.0876 \quad (1)$$

$$R^2 = 0.861$$

式中: y 为底栖生物完整性相似指数; x 为 2 m 宽的单宽流量。

由式(1)表示的玉符河生态水文规律,可以分析计算不同生态修复目标和方案对应的水文条件,从而为制定合理的生态调度目标和生态修复规划奠定基础。

3 生态修复目标与方案

3.1 总体目标与基础性工作

一般来说,河流生态修复的目标可分为4个方面,即水质、水文条件的改善,河流地貌特征的改善,生物物种的修复,景观休闲功能的增强。针对玉符河的生态环境问题与生态规划需求,玉符河生态修复的总目标是,在满足防洪安全的基础上,通过利用水库的优化调度来改善大坝下游河道的水文条件,配之以水源涵养、库区水质保护、生态护坡与河岸缓冲带延展、河口湿地营建及景观建设等技术措施,来达到河流环境改善和整体功能提高的目的。

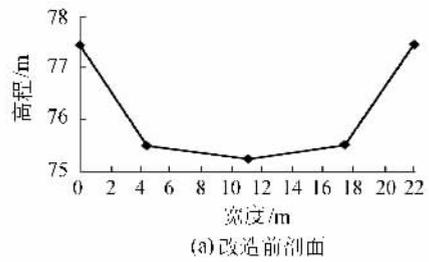
根据玉符河生态环境修复几个关键河段的情况,结合济南城市规划对环境的要求,确定现阶段的玉符河生态修复目标是:上游,在保持现有良好水生态环境基础上,进一步实施水土保持及水源涵养工程建设,提高其保土蓄水功能,并通过实施水质动态监测,进一步改善水质条件;中游,紧紧围绕卧虎山水库的功能定位,开展水资源优化调度,实现大坝以下河道干流常年流水,对河流形态进行修复,通过改善水文条件来提高河流生物的多样性;下游,开展河口人工湿地规划,增强湿地净化水质和景观休闲的功能。

玉符河现状水资源紧缺,河道多年无水,104国道断面以下的河床由于挖沙采石而破坏严重:几次放水试验中,即使流量达到 $5\text{ m}^3/\text{s}$,水都不能到达104国道下游不远处的一大采石坑,所以,在运用生态水文规律分析玉符河生态需水量之前,首先应对河流生态修复的基础性工作——河流地貌形态和生境进行合理的处理和修复,保证用有限的水资源最大限度地达到生态修复的目标。根据实地调查研究,玉符河地貌形态和生境修复应主要做好以下工作:

a. 渠道式河段天然化。渠道式河段主要在5~7号过水断面(图4),长1424m,河段左侧是利用河滩地发展的灌溉农田,渠道上有防洪堤,主要用来防止小型洪水对农田的影响。

将5~7号过水断面形状进行适当的调整,可增加滩地面积,如右侧断面到76.2m高程后,就成为宽50~100m比较平缓的滩地。生态恢复后的断面效果见图5。

b. 18~23号河段岸滩的恢复。该河段全长5582m,是玉符河上唯一一处近天然的河段,河流岸滩没有建筑和农田,岸滩宽50~300m,现状岸滩破



(a)改造前剖面



(b)实际现状

图4 5号过水断面剖面与现状

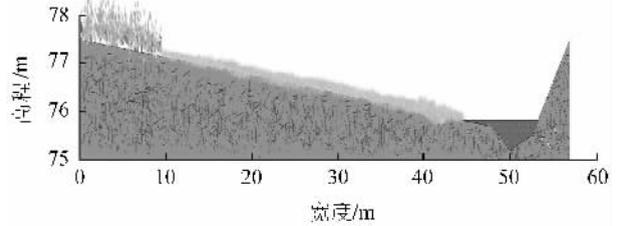


图5 5号断面恢复效果

坏严重。对该河流沿岸地形滩稍加修正,并进行生态岸滩的建设,在高阶地上绿化。

c. 现衬砌段湿地恢复。公路桥与铁路桥之间的河段,其河流两侧都建有防洪堤,并有堤岸公路。为了满足城市景观的需求,可对该河段进行衬砌并用橡胶坝拦水,形成一定的水面,使之随季节变化而丰枯波动;在河流两侧防洪堤之间人工栽植水生和湿生植被,使上游段滩地形成面积达 11.2 hm^2 的湿地。

d. 公路桥到地下水溢出段(28~43号断面)。在该段进行河道窄缩,以恢复河流连续性。该河段长约9.6km,从卧虎山水库建立以来,枯季断流,且因其河段底质为砾石,渗漏强烈。考虑到河流地貌的变化小、下游地下水渗出等因素,可以借助工程重塑河道主槽,平整滩地,在河道的中心位置开挖深约2.0m、底宽3m、边坡系数为2.5的梯形主河槽,常年小流量运行,使其生态系统的恢复水平基本上接近本次调查的低山区小河流的水平,保证43号断面以下有地下水溢出,整体上实现全河段连通(图6)。

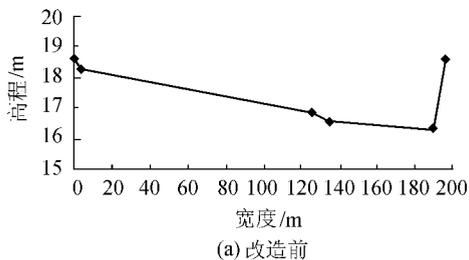
e. 恢复地下水溢出段到入黄口段的湿地。可在下游溢出段到入黄河口河段的两侧筑防洪堤。下游溢出段到入黄河口的河道因为过去挖沙而使下游成为大小不等的串珠状水塘。该处的生态恢复目标

表 4 玉符河干流上段恢复的生态水文指标预测值

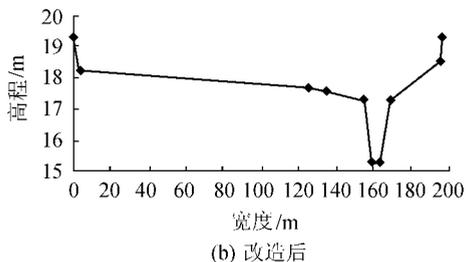
断面编号	水位/m	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	水面 宽/m	单宽流量/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	底栖生物 完整性指数	恢复状 态指数
1	100.784	2.000	20.845	0.19	3.28	0.82
3	79.854	1.716	8.979	0.38	5.45	1
5	75.735	1.646	8.829	0.37	5.34	1
10	71.384	1.533	18.414	0.17	2.99	0.75
13	67.479	1.425	11.807	0.24	3.84	0.96
15	62.955	1.072	5.655	0.38	5.42	1
19	52.191	0.424	5.016	0.17	3.01	0.75
23	41.012	0.139	6.453	0.04	1.57	0.39
27	36.700	0.137	58.138	0.00	1.14	0.28

表 5 玉符河全河段恢复生态水文指标预测值

断面编号	水位/m	流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	水面 宽/m	单宽流量/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	底栖生物 完整性指数	恢复状 态指数
1	100.820	4.000	23.088	0.35	5.1	1
3	80.035	3.615	14.000	0.52	7.0	1
5	75.910	3.523	11.085	0.64	8.4	1
10	71.427	3.330	18.833	0.35	5.1	1
13	67.700	3.119	18.002	0.35	5.1	1
15	63.256	2.963	10.717	0.55	7.4	1
19	52.380	2.546	9.184	0.55	7.5	1
23	41.277	2.273	27.541	0.17	3.0	0.75
27	36.722	2.090	70.333	0.06	1.8	0.45
30	26.095	1.711	4.079	0.84	10.7	1
34	21.644	1.255	4.938	0.51	6.9	1
40	17.415	1.175	5.513	0.43	6.0	1
43	15.650	1.148	4.750	0.48	6.6	1



(a) 改造前



(b) 改造后

图 6 改造前后 43 号过水断面剖面图

是建设湿地景观。现状的湿地面积大约 3 km^2 ,将来河流连通后水量增加 ,水流经过湿地入黄河。

3.2 阶段目标与方案

根据当前城市规划对生态环境的需求 ,现阶段最迫切需要达到的目标是满足城市景观和回补地下水的要求 ,104 国道以上河段的生态恢复已成为当务之急。南水北调工程实施后 ,可减少玉符河对城市供水的任务 ,在对地下水生态补源的同时 ,采取适当的水文调控措施 ,恢复河流的连通性 ,实现玉符河全河段的生态修复。

3.2.1 104国道以上河段生态修复目标与需水方案分析

因河道较窄而忽略蒸发 ,采用只考虑渗漏的一维河道模型对 104 国道以上河段(27 号断面)不断流所需的水库放水量进行了计算。计算结果表明 ,要保证 104 国道以上河段不断流 ,全年生态恢复需水约 6300 万 m^3 。考虑汛期区间径流量补给的 1558 万 m^3 ,则需要卧虎山水库下泄的生态流量为 $2 \text{ m}^3/\text{s}$,下泄总水量为 $4742 \text{ 万 m}^3/\text{a}$,占全年生态恢复需水总量的 32%。

结合生态水文模型 ,计算玉符河的水文生态指标 ,计算结果见表 4。从表 4 中可以看出 ,32%的天然径流使 45%断面的底栖生物完整性指数达到了最佳状态的 75% ,设定的河流生态恢复目标都能实现。

3.2.2 全部河段连通的生态修复目标与需水方案分析

玉符河属于季节性山区河流 ,具有典型小河流的特点 ,其 104 国道以下的河段天然断流。本次研究的河流生态恢复方案为缩窄河道 ,减少渗漏 ,连通整个河段。运用考虑渗漏的一维河道模型 ,对 43 号以上断面不断流所需的水库放水量进行估算 ,同时进行生态水文计算 ,计算结果见表 5。

计算结果表明 ,要保证全河段贯通 ,全年生态恢复需水约 11000 万 m^3 ,汛期 7~9 月约需 2750 万 m^3 ,考虑汛期区间径流量补给的水量 3510 万 m^3 ,以及总体上考虑区间来水等因素 ,则全年河段贯通需要卧虎山水库下泄的生态流量为 $4 \text{ m}^3/\text{s}$,下泄总水量为 8250 万 m^3 ,占流域水资源总量的 43%。该方案是恢复河流到地下水溢出带 ,全部水量都下泄 ,在忽略蒸发的情况下 ,卧虎山水库下泄水量基本都补给地下水。

从计算结果可以看出 ,河道缩窄后 ,河道底栖生物完整性指数基本达到最佳状态的 95% 以上 ,也就是说 ,用全流域 43%的天然径流就可以基本恢复玉符河的生态状况。

4 结 语

针对玉符河现阶段生态环境问题 ,统筹考虑经济社会和生态修复用水需求以及水资源条件 ,笔者认为 ,玉符河现阶段生态修复的目标可设定为两个阶段 :

a. 在天然水源条件下 ,卧虎山水库保证常年下泄流量 $2 \text{ m}^3/\text{s}$,下泄总水量 4742 万 m^3 ,即以年径流的 32%可恢复 45%的河流 ,达到补泉、关键河段不断流以及湿地建设的基本需求。

b. 南水北调工程实施后,可减少卧虎山水库向城市的供水量,在利用地下水生态补源的同时,可采取适当的水文调控措施,恢复河流的连通性,实现全河段生态修复,使全河段底栖生物完整性达到最佳状态的95%以上。

河流生态恢复是一个连续的过程,需要长系列系统与完整的资料才能作出正确的判断并制定合理的生态修复规划。此次研究只是基于近几年的调查资料,研究成果也只是基于宏观判断的初步结论,还需要进行长期的验证和校核。建议在玉符河恢复过程中应进行长期的水文与生物监测,注重本底资料的完善与积累,使玉符河成为具有区域代表性的河流生态修复示范河流,为我国河流生态修复提供借鉴。

参考文献:

[1] 川合侦次,谷田一三.日本产水生昆虫[M].东京:东海大学出版社,2005.

[2] 唐涛,蔡庆华,刘建康.河流生态系统健康及其评价[J].生态学报,2002,13(9):1191-1194.

[3] 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(4):602-608.

[4] KARR J R. Measuring biological integrity: lessons from streams [C]//Ecological Integrity and the Management of Ecosystems. London: St. Lucie Press, 1993: 83-104.

[5] KARR J R. Defining and measuring river health[J]. Freshwater Biology, 1999, 41: 221-234.

[6] KARR J R, CHU E W. Sustaining living rivers[J]. Hydrobiologia, 2000, 422/423: 1-14.

[7] KARR J R, ROSSANO E R. Applying public health lessons to protect river health[J]. Ecol Civil Eng, 2001, 1(1): 3-18.

[8] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, 6(6): 21-27.

[9] KARR J R. Defining and assessing ecological integrity: beyond water quality [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1993, 12: 1521-1531.

[10] KARR J R. Ecological integrity and ecological health are not the same [C]//SCHULZE P. Engineering within ecological constraints. Washington D C: National Academy Press, 1995: 97-109.

[11] KERANS B L, KARR J R. A benthic index of biotic integrity (B-IBI) for rivers of the Tennessee Valley [J]. Ecol Appl, 1994, 4: 768-785.

[12] LYDY M J, SIMON T P, STRONG A J. Development of an index of biotic integrity of the little Arkansas River Basin, Kansas [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, 39(4): 523-530.

[13] MAXTED J R, BARBOUR M T, GERRITSEN J. Assessment

framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2000, 19(1): 128-144.

[14] MEBANE C A, MARET T R, HUGHES R M. An index of biological integrity (IBI) for Pacific Northwest rivers [J]. Trans Am Fish Soc, 2003, 132: 239-261.

[15] MEYER J L. Stream health: Incorporating the human dimension to advance stream ecology [J]. Journal of the North American Benthological Society, 1997, 16(2): 439-447.

[16] MORLEY S A, KARR J R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin [J]. Conservation Biology, 2002, 16(6): 1498-1509.

[17] NERBONNE B A, VONDRACEK B. Effects of local land use on physical habitat, benthic macroinvertebrates, and fish in the Whitewater River, Minnesota, USA [J]. Environ Manage, 2001, 28(1): 87-99.

[18] NIEMI G J, MCDONALD M E. Application of ecological indicators [J]. Annu Rev Ecol Evol Syst, 2004, 35: 89-111.

[19] ODE P R, REHN A C, MAY J T. A quantitative tool for assessing the integrity of southern coastal California streams [J]. Environ Manage, 2005, 35(4): 493-504.

[20] REYNOLDS T B, NORRIS R H, RESH V H, et al. The reference condition: a comparison of multimetric and multivariate approaches to assess water-quality impairment using benthic macroinvertebrates [J]. J N Benthol Soc, 1997, 16(4): 833-852.

[21] SILVEIRA M P, BAPTISTA D F, BUSS D F, et al. Application of biological measures for stream integrity assessment in south-east Brazil [J]. Environ Monit Assess, 2005, 101: 117-128.

[22] SIMON T P. Assessing the sustainability and biological integrity of water resources using fish communities [M]. New York: CRC Press, 1999.

[23] 王备新, 杨莲芳, 刘正文. 生物完整性指数与水生态系统健康评价 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 707-710.

[24] 李玉凤, 刘红玉. 生物完整性指数法和水文地貌评价法在湿地生态系统评价中的综合研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(34): 11188-11191.

[25] 周晓蔚, 王丽萍, 郑丙辉, 等. 基于底栖动物完整性指数的河口健康评价 [J]. 环境科学, 2009, 30(1): 242-247.

[26] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 等. 应用底栖动物完整性指数数 B-IBI 评价溪流健康 [J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1481-1490.

[27] 王备新, 杨莲芳. 底栖动物水质快速生物评价研究进展 [J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(4): 107-111.

[28] 戴纪翠, 倪晋仁. 底栖动物在水生生态系统健康评价中的作用分析 [J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2107-2111.

[29] 曹艳霞, 张杰, 蔡德所, 等. 应用底栖无脊椎动物完整性指数评价漓江水系健康状况 [J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 13-23.

(收稿日期: 2010-09-18 编辑: 彭桃英)