

水利工程对汉江中下游水文生态的影响

胡安焱^{1,2}, 张自英¹, 王菊翠¹

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054 ; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要 主要采用 1980 年以前的数据资料, 分析丹江口水库建成后对汉江中下游径流量、泥沙、水温、水质、鱼类等的影响。结果表明: 水库运行使汉江中下游水量减少, 流量过程均化, 防洪能力提高, 泥沙大量减少, 汛期水温降低, 鱼类资源减少, 水质没有明显的变化。汉江中下游水质恶化和发生水华的主要原因是污染增加。南水北调中线工程建成运行后, 汉江中下游江段流量将比现状大幅度减少, 流速变缓, 对水污染的稀释自净能力降低, 生态环境可供水量不足, 使水文生态朝着不利的方向发展。

关键词 水利工程; 汉江; 丹江口水库; 水文生态

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2010)02-0005-05

Impact of hydraulic engineering on hydro-ecology in middle and lower reaches of Hanjiang River

HU An-yan^{1, 2}, ZHANG Zi-ying¹, WANG Ju-cui¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang 'an University, Xi 'an 710054, China ; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : According to observed data before 1980, the impacts of the operation of Danjiangkou Reservoir on runoff, sediment, water temperature, water quality, and fish were studied. The results showed that the operation of the reservoir had reduced water quantity and homogenized annual runoff distribution, improved the flood control level, reduced sediment and water temperature during the flooding period, and reduced fish resources, and had no apparent influence on water quality. The reason for worsening water quality and algal blooms in the middle and lower reaches of the Hanjiang River was increasing water pollution. After the South-to-North Water Transfer Project is built and in operation, runoff will be reduced much more, as will the water flow velocity. These will reduce the dilution and self-purification ability of water and the eco-environmental water supply, and lead the hydro-ecology in a negative direction.

Key words : hydraulic engineering; Hanjiang River; Danjiangkou Reservoir; hydro-ecology

水文生态把水在生态系统中的存在、分布与循环运动作为主体,来研究它在生态系统中的作用与功能,研究水与生态系统中生命要素和其他环境要素之间的相互作用、相互依存、相互联系的关系。汉江中下游人口密集、经济发达。武汉市和十堰汽车工业走廊沿江分布,配套形成了汽车、电子、化工、纺织等产业基地^[1]。南水北调中线工程一期工程年均调水 95 亿 m³,后期调水 120 亿 ~ 140 亿 m³,后期调水占丹江口水库多年平均入库径流量的 1/3^[2]。研

究丹江口水库建设和加高对汉江流域中下游水文生态的影响,对于合理配置水资源、满足受水区和调水区的需水,尽量减少水利工程对中下游社会经济发展和生态环境的影响具有现实意义。

1 丹江口水库概况

丹江口水利枢纽的建设地点在湖北省均县,控制流域面积 95 217 km²,多年平均流量 1 230 m³/s,设计洪水流量 64 900 m³/s,设计灌溉面积 23.3 万 hm²,

装机容量 90.0 万 kW。主坝坝型为混凝土宽缝重力坝,最大坝高 97.0 m,坝顶长度 2 461 m(混凝土坝 1 141 m)坝基岩石为闪长岩,主要泄洪方式为坝顶溢流。工程由拦河大坝、水力发电厂、升船机及湖北、河南两座灌溉引水渠等 4 个部分组成。工程于 1958 年 9 月 1 日破土动工,1968 年 10 月 1 日第 1 台机组发电,1973 年竣工。这是一座具有防洪、发电、灌溉、航运、养殖等综合效益的大型水利工程。水库正常蓄水位 157 m,正常蓄水库容 174.5 亿 m³。电厂装机总容量 90 万 kW。单机 6 台,年均发电量 38 万 kW·h,湖北清泉沟灌渠和河南陶岔灌渠,年灌溉引水总量共 15 亿 m³。

2 丹江口水库初期工程的影响

2.1 对径流量的影响

丹江口水库建成前后对径流量的影响见表 1。表 1 中的统计数据均选自 20 世纪 80 年代以前受人类活动影响较小的年份,下文的数据分析资料也主要选在 20 世纪 80 年代以前。从表 1 中可以看出,丹江口水库建成后,入库的年水量、汛期(5~10 月)水量和非汛期(11 至次年 4 月)水量减少,汛期水量占 76%、非汛期水量占 24%的比例不变。出库的年水量和汛期水量减少,但非汛期水量增加,汛期水量所占比例由 77%减少至 64%,非汛期水量由 23%增加至 36%。水库建成后,在入库和出库水量均减少时,非汛期水量增加,表明水库的调节作用使非汛期水量和所占比例增加。

表 1 丹江口水库对径流量的影响

水库 状态	入库水量					出库水量				
	年/ 亿 m ³	汛期/ 亿 m ³	比例/ %	非汛期/ 亿 m ³	比例/ %	年/ 亿 m ³	汛期/ 亿 m ³	比例/ %	非汛期/ 亿 m ³	比例/ %
建成前	429	326	76	103	24	413	316	77	97	23
建成后	354	267	76	87	24	330	211	64	119	36

丹江口水库建成后,受出库水量变化的影响,汉江碾盘山站非汛期径流明显增加,由建库前的 117 亿 m³增加到建库后的 148 亿 m³;汛期径流明显减少,由建库前 416 亿 m³减少到建库后 341 亿 m³。非汛期径流占年内百分比由建库前的 21.9%增加到建库后的 30.0%,汛期径流百分比由 78.1%下降到建库后的 70%^[3]。

2.2 对防洪的影响

汉江中下游洪水主要来自丹江口上游,汉江中下游河道受堤防约束,愈向下游愈狭窄,泄洪能力上大下小,泄洪矛盾十分突出。历史上,汉江中下游洪灾频繁且严重,下游呈三年两溃的局面。1956 年兴建杜家台分洪工程后,下游防洪标准提高到 5 年一

遇。丹江口水利枢纽建成以后,初步形成了以丹江口水库蓄洪为主,两岸干堤、杜家台分洪工程及中下游临时分蓄洪民垸为辅的防洪体系。丹江口水库建成前后对洪水的影响见表 2。水库建成前入库和出库最大洪峰流量相差不大,建成后入库和出库最大洪峰流量相差较大。水库建成后入库洪峰流量多年平均增加 3%,出库则减少 42%。可以看出水库使下游最大洪峰流量大幅减少。但目前防洪标准仍不够高,能防 20 年一遇的洪水,当遇超过 20 年一遇的洪水,就需新城以上民垸分洪蓄水,遇 100 年一遇的洪水时,中游 14 个民垸几乎需要全部用于分洪,才能保证中游河道流量不超过允许安全泄量。中游 14 个民垸现共有 5.87 万 hm²耕地,人口 83 万,固定资产 65 亿元,其中有钟祥、宜城两座县以上中等城市,由于分蓄洪区建设滞后,安全转移极困难,运用民垸分洪损失很大,并且很难做到适时适量分洪^[4]。

表 2 丹江口水库对洪水的影响

水库状态	入库最大洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	出库最大洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)
建成前	13 430	13 281
建成后	13 838	7 707
变化率/%	+3	-42

2.3 对泥沙的影响

丹江口水库建成运用前后,汉江中下游的输沙过程、泥沙来源、水流含沙量及粒径组成等有较大的差异。表 3 为丹江口水库对泥沙的影响情况分析。丹江口水库建成后,年入库沙量、汛期和非汛期量分别减少 33%、32%、43%;主要是由于泥沙输移比偏小和上游干支流水库层层拦截,使进入丹江口水库的泥沙量减小。但丹江口水库蓄水后,拦沙率达 98%,远远大于入库沙量的减少比例,表明水库对汉江出库沙量有重要的拦蓄作用。而水库下游黄家港、襄阳、皇庄、沙洋和仙桃站的多年平均含沙量分别为 0.03kg/m³、0.19kg/m³、0.56kg/m³、0.60kg/m³和 0.75kg/m³,分别占建库前的 0.96%、7.1%、22.6%、29.3%和 39.5%。由于长期下泄清水,下游河道发生同流量时水位下降,水深增加。坝下游河道由堆积性转变为侵蚀性,冲槽淤滩,洲滩兼并,支汉淤塞、主汉发育以及切滩撇弯。建库前,来沙集中程度很大,年内分配极不均匀,主汛期 7~9 月的来

表 3 丹江口水库对泥沙的影响

水库 状态	入库沙量					出库沙量				
	年/ 万 t	汛期/ 万 t	比例/ %	非汛期/ 万 t	比例/ %	年/ 万 t	汛期/ 万 t	比例/ %	非汛期/ 万 t	比例/ %
建成前	7 652	7 146	93	506	7	7 266	6 652	92	614	8
建成后	5 137	4 851	94	286	6	120	108	90	12	10
变化率/%	-33	-32	1	-43	-14	-98	-98	-2	-98	2

沙量占全年来沙量的 80% 以上。水库蓄水运用后 , 沙峰削减程度很大 ,在输沙率大大减少的同时 ,输沙过程也变得较为均匀。

由于丹江口水库的拦蓄淤积 ,汉江中下游的泥沙来源发生了变化。建库前 ,汉江中下游的泥沙主要来自丹江口以上及中下游区间汇流 ;建库后 ,汉江中下游河床发生严重冲刷 ,中下游的泥沙主要来自河床的冲刷补给和区间支流汇入。例如皇庄站的全年来沙仅有约 4.6% 来自丹江口水库上游区域 ,区间汇流占 33.0% ,河床冲刷补给占 62.4%。由于泥沙主要来自河床补给 ,建库后泥沙组成发生了变化 ,悬移质泥沙粒径增大 ,黄庄站中值粒径由建库前的 0.024 mm 增加到 0.049 mm。建库后下游河道的冲刷是由上往下发展的 ,因此 ,距坝愈近粒径愈粗。悬移质含沙量的变化也与距坝的远近有关。建库前 ,从坝址往下游平均含沙量沿程递减 ,建库后 ,坝址处平均含沙量最小 ,随着距坝距离的增加 ,含沙量增大。将来随着河床逐渐粗化 ,沿程水流含沙量的变化将逐渐减少 ,河床粗化完成以后 ,沿程水流含沙量将较为接近^[3]。

2.4 对大坝下水水温的影响

水温是生态系统中一个重要的物理因子。在天然河流中 ,水体相对较小 ,紊流掺混作用强 ,单位水体自由表面大 ,河水水温随气温变化而变化。在河道上修建水库 ,特别是修建大型水库以后 ,水深增加 ,流速锐减 ,流态改变 ,水库形成一个热容量极大的水体 ,水库的水温结构也发生显著变化 ,不论在时间分布 ,还是空间分布方面 ,均不同于天然河道^[5]。丹江口水库建库前后汉江干流水温变化见表 4。从表 4 可见 ,建库前后水库一年中的水温变化主要是 :①3 ~ 8 月水温降低 ,下游各测站的水温比建库前低 ;②9 月至次年 1 月水温升高 ,各测站的水温比建库前高。这种变化离坝址越近 ,变化越大 ,离坝址越

远 ,变化越小。在仙桃站 ,仅 12 月至次年 1 月比建库前水温高 ,其他月份基本恢复到天然状况。

2.5 对水质的影响

丹江口水库建成对水质的影响见表 5。根据表 5 对照 GB3838—2002《地表水环境质量标准》可知 ,水库建成后 ,主要指标因子 DO、COD、NH₃-N 在汉江主要入库站白河站没有明显变化 ,均为Ⅰ类 ;在出库站黄家港站除了 NH₃-N 在汛期为Ⅱ类外 ,其余均为Ⅰ类。说明水库建成对汉江中下游水质没有太大的影响。

表 5 丹江口水库对水质的影响 mg/L

水质因子	水库状态	白河站			黄家港站		
		年均	汛期	非汛期	年均	汛期	非汛期
ρ(DO)	建成前	9.10	8.88	9.33	3.20	4.09	2.32
	建成后	9.95	10.36	9.53	9.95	10.45	9.88
ρ(COD)	建成前	1.62	2.03	1.20	2.19	2.99	1.39
	建成后	1.25	1.16	1.38	1.15	1.00	1.25
ρ(NH ₃ -N)	建成前	0.09	0.07	0.12	0.14	0.16	0.10
	建成后	0.09	0.07	0.10	0.09	0.08	0.11

丹江口水库 2000 年和 2002 年水质类别见表 6。2000 年时入库站白河站和出库站黄家港站 ,主要污染因子 DO、COD、NH₃-N ,年均、非汛期均为Ⅰ类 ,汛期主要是Ⅱ类。2002 年时入库站白河站和出库站黄家港站 ,主要污染因子 DO、COD、NH₃-N ,年均、非汛期均以Ⅰ类为主 ,汛期主要是Ⅱ类。丹江口水库入库站和出库站水质类别基本一致 ,表明水库运行对汉江中下游水质没有太大的影响。但 2000 年和 2002 年汉江下游均发生了“水华”现象。水体中营养盐含量过高是水体富营养化、“水华”发生的根本条件 ,水文情势则是影响污染物扩散的重要因子^[6]。随着沿江两岸社会经济的迅速发展和人口密度的增加 ,汉江接纳了大量的工农业废水和生活污水 ,这些污染物在汉江干流上形成了大小不等的污染带 20 多条 ,长达 10 多 km。尽管 20 世纪 70 年代丹江口水

表 4 丹江口水库对水温的影响 ℃

月份	白河站		龙王庙站(坝前)		黄家港站(坝下)		碾盘山站		仙桃站	
	建库前	建库后	建库前	建库后	建库前	建库后	建库前	建库后	建库前	建库后
1	5.2	5.1	5.3	9.0	4.7	8.2	4.6	5.7	4.4	6.8
2	7.2	6.4	6.2	7.5	6.6	6.6	6.5	5.3	6.2	6.5
3	11.4	10.5	10.4	8.5	11.1	7.5	10.8	9.9	10.6	10.0
4	15.7	15.8	15.5	13.9	15.8	11.3	15.7	15.0	15.6	15.5
5	20.1	20.3	20.4	19.2	20.4	16.2	20.7	19.8	20.7	20.0
6	24.6	23.9	25.2	24.3	25.0	20.1	25.4	24.9	25.5	24.3
7	25.9	26.0	27.0	28.0	26.6	23.2	27.7	26.9	27.8	28.0
8	27.1	26.9	28.0	29.0	27.7	25.0	28.2	27.4	27.6	26.8
9	21.9	21.6	22.9	25.5	22.0	23.1	22.8	23.2	23.2	23.0
10	17.2	17.5	18.2	20.9	17.6	19.3	17.8	18.8	17.9	16.5
11	12.5	12.5	13.6	16.9	12.5	16.1	12.3	13.7	12.6	12.1
12	7.1	7.4	8.2	12.5	6.7	10.9	6.3	8.8	6.1	8.6
年均	16.3	16.2	16.7	18	16.4	15.7	16.6	16.6	16.5	16.6

库建成改变了汉江中下游水文情势,但由于汉江水流量大,江水的自净作用使水质恶变速度不是很大^[7],水质恶化和藻类“水华”是近十几年发生的,由此可见汉江水质恶化的最根本原因是沿江两岸污染大量增加所致。水环境容量降低,生态系统已相当脆弱,很难再超负荷运转下去,尤其是在枯水季节,有关水质参数远远高于富营养化指标^[8]。

表 6 丹江口水库现状水质类别

年份	水质参数	白河站			黄家港站		
		年均	汛期	非汛期	年均	汛期	非汛期
2000	DO	I	II	I	I	II	I
	COD	I	II	I	I	II	I
	NH ₃ -N	I	I	I	I	II	I
2002	DO	I	II	I	I	I	I
	COD	II	II	I	II	II	I
	NH ₃ -N	I	I	II	I	I	II

2.6 对鱼类资源的影响

每年 4~8 月丹江口水库水体呈明显分层现象,在水深 5~30 m 之间出现急变的温跃层,库表与库底温差达 16℃。9~10 月,上下层温差减少,分层现象减弱。下泄水温的变化,对丹江口坝下至襄樊江段沿程水温及年内变幅都有影响。一方面,水温的变化对坝下至襄樊江段的鱼类繁殖带来一定影响,满足产卵最低温度 18℃的要求向后推迟约 20 d。另一方面,由于下游比中游水温降低小,鱼类产卵场下迁,襄樊一带唐白河口附近,产卵场相对扩大。建库后河水夏季变凉,冬季变暖,加上中下游水流变清和透明度变大,使部分水生植物数量增大,例如着生丝状藻类及淡水壳菜形成优势种群。摄食这些水生物 的鱼类种群不断增加;冬季水库下泄流量增加,对鱼类越冬和催肥有利^[9]。

四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼)和铜鱼产卵主要发生在水位上涨的过程中,当流速降低、流量减少、水流动能不能形成漩滚,鱼卵下沉,则无法孵化成幼鱼。由于丹江口水库对径流的调节作用,洪峰削弱,特别是谷城以上江段,由于王甫洲大坝的兴建和没有大流量的支流补给,水位变化幅度很小,水文条件很难满足四大家鱼和铜鱼产卵的需求,造成汉江中游四大家鱼中草鱼、鲢鱼减少,青鱼、鳙鱼消失;铜鱼消失。四大家鱼产卵现主要依靠支流南河、唐白河、蛮河发水和局部地区强降雨引起,因而产卵江汛短促、规模小并且零散。泥沙中的有机物和无机物是部分鱼类食物的重要来源,丹江口水库建成后,中下游泥沙量锐减导致鱼类资源减少。而流速降低、流量减少也使喜急流的鱼类栖息环境变化,导致数量减少。

3 丹江口水库加高后的影响

南水北调工程中线调水方案实施后,丹江口水库加高,丹江口水库大坝将由 162 m 加高到 176.6 m,调水量增大,下泄总水量减少。从流量过程看,调水后干流的枯水流量加大,中水流量历时减少,干流流量过程趋于均化。水库正常蓄水位由 157 m 提高到 170 m,相应库容由 174.5 亿 m³ 增加到 290.5 亿 m³,其中防洪库容由 55 亿~77.2 亿 m³ 提高到 81 亿~110 亿 m³,可从根本上提高汉江中下游地区的防洪标准。例如遇 100 年一遇的洪水时,经丹江口水库调蓄削减洪峰,可控制黄庄-新城河段的洪峰流量不超过允许安全泄量,基本上不需要中游民垸分洪,杜家台分洪几率由 5~10 年一次提高到 20 年一次。

丹江口大坝加高调水后,坝下缺乏表层浮游生物的补充,襄樊以上河段浮游藻类及水库占绝对优势的浮游动物枝角类、桡足类等种类和数量将急剧减少;夏季下泄低温水,加之沿途城镇污水的排入,使河水中有机营养物质增加,使硅藻和绿藻等数量增加。挺水植物分布面积增大,生物多样性下降,底栖动物将维持稳定并有上升趋势,适应冷水生活的钩虾等将增加。襄樊以下河段,由于流量减少,水流变缓,水位稳定,河水透明度度高,硅藻和绿藻等浮游植物仍将占优势,其生物量将大大提高。如遇春季气温偏高,河水污染重,水文情势合适,浮游藻类可能爆发性生长繁殖而形成“水华”^[10]。

丹江口大坝加高后,水库由年调节水库成为多年调节水库,下泄水主要通过发电机组,一般离水面 25 m,该水层通常无浮游生物,常年水温将在 10~15℃。襄樊以上江段鱼类将以摄食流水生物和底栖生物的小型鱼类黄颡鱼等为主;大型摄食浮游生物的鲢鱼等将锐减或消失。襄樊以下中游河段摄食丝状藻类的草鱼、赤眼鲮等减少数量不大;下游鱼类变化不大。大坝加高后中游河段水位变幅较小,5~6 月鱼类繁殖所需涨水过程消失,加之低温影响,产卵所需的水文条件很难满足,使皇家港至襄樊段产漂性卵的鱼类产卵场大多消失;襄樊以下产卵期推迟并缩短,而下游鱼类资源因主要靠长江鱼苗补充而影响不大。此外,调水后中下游水质变差,也会使鱼类种群数量减少。

4 结 语

丹江口水库初期规模运行的实践表明:水库建成运行使汉江中下游水量减少和流量过程均化;防洪能力提高,泥沙由主要由丹江口水库以上和区间入流补给变为主要由河床冲刷和区间入流补给;水

温 3~8 月降低、9 月至次年 1 月升高 ;丹江口水库建成后出库水质没有明显的变化 ,汉江中下游水质恶化和发生“ 水华 ”的主要原因是污染增加 ,次要原因是水量减少 ;丹江口水库建成后中下游泥沙量锐减导致鱼类资源减少 ,而流速降低、流量减少也使喜急流的鱼类栖息环境变化 ,导致数量减少。南水北调中线工程建成运行后必将对汉江中下游水文生态产生新的影响 ,汉江中下游江段流量将比现状减少 ,流速变缓 ,对沿岸点源、面源污染的稀释自净能力降低 ,生态环境供水量不足 ,从而导致水质恶化 ;“ 水华 ”现象有可能进一步加重 ,鱼类资源进一步减少。随着汉江流域经济的持续增长和人口的增加 ,从长远来看 ,只有引江济汉工程和汉江流域水污染控制工程的建成才能从根本上提高汉江的水环境容量 ,改善水质 ,减少“ 水华 ”的发生概率 ,满足工农业发展对水资源的需求。

参考文献：

[1] 谢平 ,夏军 ,窦明 ,等 .南水北调中线工程对汉江中下游水华的影响及对策研究 [J]. 自然资源学报 ,2004 ,19(4) : 418-422.

(上接第 4 页)

参考文献：

[1] 阮本清 ,魏传江 .首都圈水资源安全保障体系建设 [M]. 北京 :科学出版社 ,2004 :50-52.

[2] 樊彦芳 ,刘凌 ,陈星 ,等 .层次分析法在水环境安全综合评价中的应用 [J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2004 ,32(5) :512-514.

[3] 何焰 ,由文辉 ,吴健 .上海市水环境生态安全评价 [J]. 水资源保护 ,2006 ,22(6) :18-20 ,27.

[4] 张龙云 ,曹升乐 ,杨尚阳 .属性识别理论在水安全评价中的应用研究 [J]. 山东大学学报 :工学版 ,2006 ,36(5) :70-72.

[5] WANG Wen-sheng ,JIN Ju-liang ,DING Jing ,et al . A new approach to water resources system assessment 'set pair analysis method [J]. Science in China Series E :Technological Sciences , 2009 ,32(10) :3004-3016.

[6] MUKHERJEE S ,OSUMA E ,GIROSI F .Nonlinear prediction of chaotic time series using support vector machines [C] /Proc of the IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing . Ameliz Island ,1997 :511-520.

[7] XU P ,CHAN A K . An efficient algorithm on multi-class support vector machine model selection [C] /Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 2003 . Portland ,2003 :3229-3232.

[8] 熊建秋 ,邹长武 ,李祚泳 .基于免疫进化支持向量机的年

[2] 窦明 ,谢平 ,夏军 ,等 .汉江水华问题研究 [J]. 水科学进展 ,2002 ,13(15) :557-561.

[3] 徐德龙 ,沙志贵 .南水北调对汉江中下游水文特性的影响 [C] /湖北科技论坛 .武汉 :湖北省水利学会 ,2001 :37-39.

[4] 石自堂 ,冯红春 ,陈晓群 ,等 .南水北调中线工程对汉江中下游的影响及其对策 [C] /湖北科技论坛 .武汉 :湖北省水利学会 ,2001 :5-7.

[5] 李晓路 ,胡振鹏 ,张文捷 .大坝下游河道水温变化规律及其影响 [J]. 江西水利科技 ,1995 ,21(3) :167-173.

[6] 刘大银 ,周晓刚 ,汪翰 ,等 .汉江中游水污染规律与控制方案研究 [J]. 长江流域资源与环境 ,2001 ,10(4) :365-371.

[7] 邬红娟 ,彭建华 ,韩德举 ,等 .丹江口水库浮游植物及其演变 [J]. 湖泊科学 ,2005 ,17(4) :366-372.

[8] 徐新伟 ,吴中华 ,于丹 ,等 .汉江中下游水生植物多样性及南水北调工程及其影响 [J]. 生态学报 ,2002 ,22(11) : 1933-1938.

[9] 李修峰 ,黄道明 ,谢文星 ,等 .汉江中游鱼类资源现状 [J]. 湖泊科学 ,2005 ,17(4) :366-372.

[10] 方芳 ,陈国湖 .调水对汉江中下游水质和水环境容量影响研究 [J]. 环境科学与技术 ,2003 ,26(1) :14-15.

(收稿日期 :2008-11-26 编辑 :徐 娟)

用电量预测 [J]. 四川大学学报 :工程科学版 ,2006 ,38(2) :6-10.

[9] 张红梅 ,卫志农 ,龚灯才 ,等 .基于粒子群支持向量机的短期电力负荷预测 [J]. 继电器 ,2006 ,34(3) :28-31.

[10] CHERKASSKY V ,MA Yun-qian . Practical selection of SVM parameters and noise estimation for SVM regression [J]. Neural Networks ,2004 ,17(1) :113-126.

[11] 董春曦 ,饶鲜 ,杨绍全 ,等 .支持向量机参数选择方法研究 [J]. 系统工程与电子技术 ,2004 ,24(8) :1117-1120.

[12] WANG Wen-jian ,XU Zong-ben ,LU Wei-zhen , et al . Determination of the spread parameter in Gaussian kernel for classification and regression [J]. Neurocomputer ,2003 ,55 :643-663.

[13] STAELIN C . Parameter selection for support vector machines [DB/OL]. [2003 - 10 - 10] <http://www.hpl.hp.com/techreports/2002/HPL-2002-354R1.html>.

[14] ASIC M D , KOVACEVIE-VUJCIC V V . Taboo search methodology in global optimization [J]. Computers and Mathematics with Application ,1999 ,33(3) :125-133.

[15] 汪嘉杨 ,李祚泳 ,倪长健 ,等 .基于混合禁忌搜索算法的水位流量关系拟合 [J]. 系统工程 ,2006 ,24(6) :107-110.

[16] PELCHMANS K ,SUYKENS J A . GESTEL T V , et al . LS-SVM lab :a MATLAB/C toolbox for least squares support vector machines [EB/OL]. [2002]. <http://www.esat.kuleuven.ac.be/sista/lssvmlab/>.

(收稿日期 :2008-11-04 编辑 :徐 娟)