

漳河下游的径流趋势分析及生态调度研究

高宇

(南水北调中线干线工程建设管理局,北京 100038)

摘要: 基于秩的 Mann Kendall 趋势检验法、变差系数等方法,利用 1962 年至 2006 年相关数据,对漳河下游的径流量年变化趋势、变化稳定程度进行了分析,研究了漳河下游河道流量的演化规律。在此基础上,结合水库的防洪、兴利、生态目标,建立了多目标水库生态调度模型,对漳河下游的岳城水库实施生态调度,并利用粒子群优化算法对调度模型进行了求解。研究表明:建立的模型可综合考虑水库防洪、供水和生态需求,实现多目标调度。从调度结果可以看出,漳河下游径流量呈十分明显的递减趋势,且年际变化大,岳城水库建库后对漳河下游水文情势影响严重;在丰水年汛期,漳河来水可以满足用水,而平水年份和枯水年的缺水形势比较严峻;除汛期以外的其余时段,即使在丰水年也必须通过水库调度放水,才能提供河道用水,否则将出现干涸。

关键词: 径流趋势;生态调度;粒子群算法;漳河下游

中图分类号: P333;TV697 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0186-05

Trend Analysis of Runoff and Ecological Regulation in Downstream of Zhanghe River

GAO Yu

(Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China)

Abstract: The annual variation trend and variation stability degree of runoff in the downstream of Zhanghe River were analyzed using the Mann Kendall trend method and coefficient of variation method based on the collected data from 1962 to 2006, which provided the evolution of river flow in the downstream of Zhanghe River. On the basis, a multi objective ecological regulation model of reservoirs was developed according to the objectives of flood control, water conservancy, and ecological environment. The model was used to perform ecological regulation on the Yuecheng reservoir in the downstream of Zhanghe River using the particle swarm optimization method. The results showed that the model can realize the multi objective regulation in consideration of the flood control, water supply, and ecological requirements. The regulation results suggested that the runoff in the downstream of Zhanghe River has a significant decreasing trend with a large annual variation, and the Yuecheng reservoir can deeply affect the hydrological conditions in the downstream of Zhanghe River. During the flood season of wet year, Zhanghe River discharge can meet the water demand, while the water scarcity situation was serious in the normal and dry years. In the other time periods except for flood season, water release from reservoir regulation was needed to avoid the occurrence of drying in the river.

Key words: runoff trend; ecological regulation; particle swarm optimization; downstream of Zhanghe River

20 世纪中后期,由于人口增长速度加快,人类活动频繁,从而导致了生态与环境问题,河流的健康状态随之急剧恶化,主要表现在河流径流量锐减和水质污染等方面^[1]。在我国,在制定水库调度方案时,更是少有考虑其对于生态环境的影响。现行的水库调度中,仅有少量的生态调度方案研究成果^[2-3]。20 世纪 80 年代中期起,欧美一些发达国家开始对水库的调度运行方式进行调整,以减少水库对生态的不利影响,在不影响航运、防洪、发电原有的主要功能的情况下,在改善区域水质、修复生态环境、娱乐与经济发展等方面发挥

了重要的作用。目前,对于生态调度,国内外并没有统一的定义。水库生态环境调度研究绝大部分是建立在河道生态流量基础之上的,以河流生态需水是水库生态调度的基础为前提,明确了河流生态要素对水的需求规律,从而提出合理的水库生态调度方案。

漳河是漳卫南运河上游支流之一。清漳河、浊漳河是其上游的两条支流,两河在河北省涉县合漳村汇合后形成漳河干流。漳河流域面积 19 537 km²,河长 460 km。漳河原为海河流域水量较多的河流之一,根据 1974 年《海

收稿日期:2013-11-15 修回日期:2014-03-13 网络出版时间:2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.039.html>

作者简介:高宇(1980-),男,河北沧州人,工程师,博士,主要从事水资源管理和工程管理方面研究。E-mail: gaoyu@nsbd.cn

滦河年径流分析》多年平均年径流量为 18 亿 m^3 。由于上游流域内大量修建水库和大型渠道引水,使来水量显著减少,漳河观台水文站资料统计,1980 年-1999 年平均径流量仅为 3.53 亿 m^3 。

20 世纪 60 年代以来,由于漳河上游人类生产、生活需水量的增加,特别是岳城水库等工程投入运用,随之而来的引提水量也剧增,导致漳河下游来水量骤减,各类河流生态问题严重:河床沙化、河流生态环境恶化;河道断流和水文形势的改变严重影响防洪安全;沿岸地下水补给减少,形成大面积地下水漏斗等。因此,我们必须从全新的开发角度和更为和谐的人水共处理念,来适当地开展水环境生态修复活动,构建当代全新的人水和谐生态格局^[4-5]

本文针对漳河目前存在的问题,利用统计方法对漳河下游径流演变规律进行分析,研究其上游水库,特别是岳城水库建成后对下游径流的影响,并建立岳城水库生态调度模型,研究综合考虑防洪、供水、生态目标情况下的水库调度策略。

1 岳城水库概况

岳城水库工程主体位于河北省磁县境内,距河北省邯郸市 55 km,距河南省安阳市区 25 km,下游距京广铁路桥 15 km。工程由大坝、泄洪洞、溢洪道、电站及引水渠首等建筑物组成,是漳河上最大的一座以防洪为主,兼有供水、灌溉、发电等综合效益的大型控制性水利枢纽工程。

岳城水库工程建设于 1959 年,1961 年开始蓄水,1970 年 11 月水库建成发电;水库原设计总库容 11.1 亿 m^3 ,1963 年以后核实为 10.9 亿 m^3 ,1987 年-1992 年大坝加高加固工程完成后,总库容达 13 亿 m^3 。

岳城水库原防洪标准按 100 年一遇洪水设计,1000 年一遇洪水校核。根据新的水文分析成果和运用方式,1986 年 8 月岳城水库被列为全国首批重点病险水库。同年水电部以水电水规字[1986]第 64 号文批准“岳城水库提高防洪标准补充初步设计”。1987 年-1991 年岳城水库除险加固工程实施,将水库防洪设计标准提高至 1000 年一遇,校核标准提高至接近 2000 年一遇。

2 漳河下游径流演变分析

2.1 径流量特征分析方法

2.1.1 Manr Kendall 趋势检验法

本文采用基于秩的 Manr Kendall 趋势检验法来分析漳河下游径流量特征。Manr Kendall 趋势检验法(又称为无分布检验)是一种非参数统计检验方法,它既不需要样本遵从一定的分布,又能够排除少数异常值的干扰,计算简单方便,适用于各种类型变量及顺序变量,在气象、水文等领域得到了广泛应用^[6-7]。Manr Kendall 趋势检验法的基本公式如下。

设 X_t 为一平稳序列($t=1, 2, \dots, n$ 为序列长度),定义统计量为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (1)$$

其中: $\text{sign}(\theta)$ 为符号函数,

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,则其正态分布的检验统计量 Z 可用下式计算:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

当 Z 为正值时表示其为增加趋势,当 Z 为负值时表示为减少趋势。若 Z 的绝对值 ≥ 1.28 时,则表示其通过了信度 90% 的显著性检验;若 Z 的绝对值 ≥ 1.64 时,则表示其通过了信度 95% 的显著性检验;若 Z 的绝对值 ≥ 2.32 时,则表示其通过了信度 99% 的显著性检验。

2.1.2 年径流量的变差系数

变差系数是均方差 σ 与数学期望的比值,或称为离差系数,以 C_v 表示,计算公式为:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \quad (4)$$

式中: x_i 为年径流量; \bar{x} 为多年平均年径流量; n 为年数。年径流量的变差系数反映了年径流量总体的离散程度, C_v 值越大,则年径流量的年际变化越剧烈,剧烈的年际变化对水资源的利用非常不利,而且易于发生洪涝等灾害; C_v 值越小,则年径流量的年际变化越小,年际变化平稳,有利于水资源的开发利用。

2.2 漳河下游径流量变化分析

选择漳河上岳城水库作为分析断面。岳城水库 1961 年开始蓄水,因此取 1962 年-2006 年岳城水库放入漳河年径流量进行分析。经计算(表 1),趋势检测值为 -2.768,通过 99% 显著性检验, C_v 等于 2.104,说明断面下径流量呈明显逐年递减趋势,且年际变化大,反映出岳城水库建设对下游河道水情势影响很大。

表 1 岳城断面径流 M-K 与 C_v 统计结果

Table 1 Statistical results of M-K and C_v of runoff at Yuecheng section

统计年份	1962-1979	1980-2006	1962-2006
Manr Kendall	-2.651	0.334	-2.768
C_v	1.514	1.929	2.104

从表 1 中还可以看出,1980 年-2006 年,径流变化趋势基本稳定,但漳河下游河道水量处于很低的水平,甚至多次发生断流。岳城断面不同阶段的年径流量变化趋势图见图 1-图 3。从图中可以看出,1962 年-2006 年的年径流量总体呈减少的趋势。

3 岳城水库生态调度

3.1 生态调度模型

3.1.1 生态调度目标函数

本研究考虑水库供水、防洪和生态供水的多功能,根据生态调度理论,利用多目标优化技术建立了水库多目标生态调度模型:

$$\min \{ a \cdot f(x_1, x_2, \dots, x_m) + b \cdot g(y_1, y_2, \dots, y_m) \} \quad (5)$$

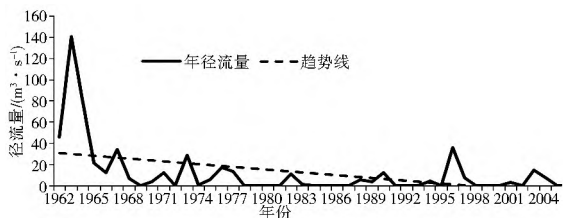


图 1 岳城断面 1962 年- 2006 年径流量趋势

Fig. 1 Runoff trend at Yuecheng section from 1962 to 2006

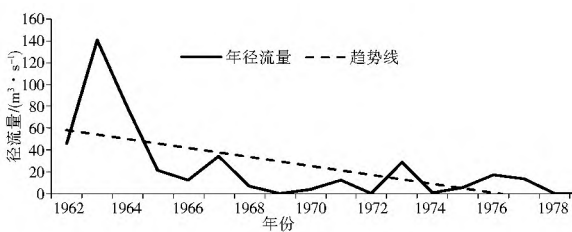


图 2 岳城断面 1962 年- 1979 年径流量趋势

Fig. 2 Runoff trend at Yuecheng section from 1962 to 1979

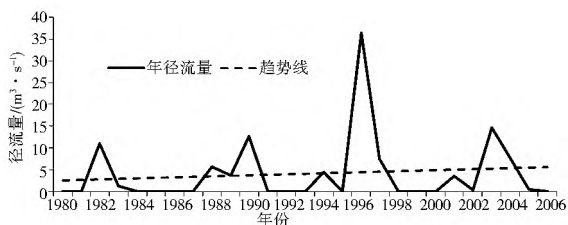


图 3 岳城断面 1980 年- 2006 年径流量趋势

Fig. 3 Runoff trend at Yuecheng section from 1980 to 2006

式中: a, b 为目标权重, $a + b = 1$, 当 $a = b = 0.5$ 时, 为等权重; $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为供水目标, 表示各时段供水不足引起的供水破坏率; $g(y_1, y_2, \dots, y_m)$ 为生态目标, 表示各时段生态供水不足引起的生态破坏率。供水目标和生态目标分别利用公式(6)、公式(7)计算:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - w_i)^2} \quad (6)$$

式中: x_i 为各时段的供水量(亿 m^3); m 表示年供水时段数, $m = 18$; 其中汛期 7 月至 9 月按旬计算, 其他按月计算, 即 x_1 为 7 月上旬供水量, x_2 为 7 月中旬供水量, 以此类推; w_i 为第 i 个时段的供水需求(亿 m^3)。

$$g(y_1, y_2, \dots, y_m) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - s_i)^2} \quad (7)$$

式中: y_i 为各时段的河道下泄水量(亿 m^3); m 表示年供水时段数, $m = 18$; 其中汛期 7 月至 9 月按旬计算, 其他按月计算, 即 y_1 为 7 月上旬水库向河道泄水量, y_2 为 7 月中旬水库向河道泄水量, 以此类推; s_i 为第 i 个时段的生态需水(亿 m^3), 当 $y_i > s_i$, 计算取 $y_i = s_i$ 。

目标函数的实际意义在于: 当水量不能满足供水和生态用水需求时, 通过调度使得缺水破坏呈“宽浅式”, 从而防止集中缺水破坏。

3.1.2 生态调度约束条件

(1) 水位约束。

$$Z_{\min, i} \leq Z_i \leq Z_{\max, i} \quad (8)$$

式中: Z_i 为各时段的水库水位(m); $Z_{\min, i}$ 为死水位或最低供水水位(m); $Z_{\max, i}$ 为汛限水位或正常蓄水位(m)。

(2) 水量约束。

$$0 \leq x_i \leq w_i$$

$$0 \leq y_i \leq q_{\max}$$

(9)

式中: q_{\max} 为时段最大下泄水量(亿 m^3), 汛期根据安全泄量或泄流能力确定, 非汛期根据生态需水量确定。

(3) 水量平衡约束。

$$V_{t+1} - V_t = (\bar{Q}_t - \bar{q}_t) \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中: V_{t+1}, V_t 为 t 时段末和初的水库蓄水量(亿 m^3); \bar{Q}_t 为该时段的平均入库流量(m^3/s); \bar{q}_t 为该时段的平均出库流量(m^3/s), 即供水及河道生态补水之和; Δt 为时段长。

(4) 调度约束。

调度规则的约束, 主要指汛期水库的调度规则。

岳城水库按防洪库容法进行调度, 以库水位作为水库控泄条件。因此要密切关注天气发展, 利用水文遥测及常规报讯系统及时掌握水雨情, 做好入库洪水预报, 在保证水库安全的前提下优化调度, 尽量减轻下游的防洪压力。

当库水位在起调水位(132 m)以上, 而低于 135.95 m(3 年一遇洪水位)时, 根据降雨及洪水的发展趋势, 控制水库下泄流量在 0~500 m^3/s 范围内。

当库水位在 135.95~153.05 m(30 年一遇洪水位)之间, 控制水库下泄流量在 500~1500 m^3/s 范围内。

当库水位在 153.05~154.58 m(50 年一遇洪水位)之间, 控制水库下泄流量在 1500~3000 m^3/s 范围内。

当库水位超过 154.58 m 时, 水库泄洪洞、溢洪道闸门全部开启泄洪。

3.2 岳城水库生态调度计算

3.2.1 生态需水过程

采用 Tennant 方法^[8,9] 计算漳河下游生态基流, 并根据相关资料考虑河流的渗漏损失, 两者之和作为各月生态需水量; 根据 1962 年-2001 年各月实际出库水量计算平均值, 以此作为各月的供水量; 岳城水库年平均蒸发渗漏损失量为 0.23 亿 m^3 , 水库日蒸发渗漏损失量约为 6.3 万 m^3 。

3.2.2 典型年来水过程

根据研究区域历年来水数据, 经频率分析计算, 选择的枯水年、平水年、丰水年分别为 1994 年 7 月至 1995 年 6 月($P = 75\%$), 1989 年 7 月至 1990 年 6 月($P = 50\%$), 1976 年 7 月至 1977 年 6 月($P = 25\%$), 各典型年的来水过程见表 2-表 4 中来水量数据。

3.2.3 典型年生态调度

本文利用粒子群优化算法^[10,11] 进行多目标生态调度模型求解, 计算综合考虑供水、防洪及生态用水情况下, 水量分配结果和库水位变化过程。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO) 是一种源于对鸟群捕食行为的研究而发明的进化计算技术, 目前已广泛应用于水文水资源领域, 大量实例证实其应用效果良好。对于本文中的模型, 涉及到变量维数为 18, 利用粒子群算法在较短的时间内收敛到全局最优解。

以库水位 132 m 作为起调水位, 并作为水库生态调度最低控制水位。供水目标权重取 0.9, 生态用水目标权重取 0.1。利用模型进行水库调度后, 供水水量、生态分水量以及库水位的变化过程见表 2-表 4。

表2 枯水年岳城水库生态调度结果

Table 2 Results of ecological regulation in Yuecheng reservoir during the dry year

时段	来水量/亿 m ³	供水水量/亿 m ³	供水缺水量/亿 m ³	生态水量/亿 m ³	生态缺水量/亿 m ³	库水位/m
7月上旬	0.2732	0.2669	0.0170	0	0.1077	132
7月中旬	0.2732	0.2669	0.0170	0	0.1077	132
7月下旬	0.2732	0.2663	0.0460	0	0.1185	132
8月上旬	0.0712	0.0649	0.3706	0	0.2529	132
8月中旬	0.0712	0.0649	0.3706	0	0.2529	132
8月下旬	0.0712	0.0643	0.4147	0	0.2782	132
9月上旬	0.0437	0.0374	0.2271	0	0.1384	132
9月中旬	0.0437	0.0374	0.2271	0	0.1384	132
9月下旬	0.0437	0.0374	0.2536	0	0.1522	132
10月	0.0241	0.0045	0.7755	0.0007	0.2913	132
11月	0.0793	0.0331	0.3569	0.0273	0.1747	132
12月	0.1272	0.1051	0.3249	0.0032	0.1558	132
1月	0.1302	0.0193	0.1507	0.0022	0.1238	132.4121
2月	0.0803	0.0053	0.2047	0.0021	0.1129	132.6597
3月	0.0072	0.0099	0.6201	0.0362	0.0838	132.3941
4月	0.0096	0.0711	0.8189	0.0055	0.0915	132
5月	0.007	0	0.79	0	0.107	132
6月	0.0355	0.0026	0.8074	0.0021	0.1209	132

漳河枯水年(1994年代表年)汛期来水量很小,7月至9月各旬来水均不满足需水量,甚至都满足不了供水的需求。因此,在汛期调度时,应遵循优先满足供水需求的原则;非汛期水量也不能满足需水要求,通过调度使得缺水量尽量均匀。若调整生态及生活供水的目标权重,水量分配结果将相应变化,权重大的目标则会分配更多水量。

经计算,枯水年水库年来水总量为1.66亿 m³,水库年蒸发渗漏损失为0.23亿 m³,则可用水量仅为1.43亿 m³。而生态及生活需水量分别为2.89亿 m³和8.15亿 m³,共计缺水9.61亿 m³。经水库调度,生活供水1.35亿 m³,短缺

6.8亿 m³;生态供水0.08亿 m³,短缺2.81亿 m³。

平水年汛期7月上旬和中旬来水可以满足供水及生态水的需求,而且河道下泄水量大于生态需水量(7月上旬和中旬均多于生态需水量0.0262亿 m³)。非汛期来水不能满足需求,经过调度,尽量使得缺水量均匀。调度后,缺水总量为5.87亿 m³,其中灌溉、生活供水量2.37亿 m³,生态缺水量3.5亿 m³。

丰水年汛期可满足用水需求,但非汛期仍缺水,经调度计算,缺水总量为1.91亿 m³,其中灌溉、生活供水量0.79亿 m³,生态缺水量1.12亿 m³。

表3 平水年岳城水库生态调度结果

Table 3 Results of ecological operation in Yuecheng reservoir during the normal year

时段	来水量/亿 m ³	供水水量/亿 m ³	供水缺水量/亿 m ³	生态水量/亿 m ³	生态缺水量/亿 m ³	库水位/m
7月上旬	0.4241	0.2839	0	0.1339	0	132
7月中旬	0.4241	0.2839	0	0.1339	0	132
7月下旬	0.4241	0.3123	0	0.1049	0.0136	132
8月上旬	0.4553	0.4355	0	0.0135	0.2394	132
8月中旬	0.4553	0.4355	0	0.0135	0.2394	132
8月下旬	0.4553	0.4484	0.0306	0	0.2782	132
9月上旬	0.067	0.0607	0.2126	0	0.1430	132
9月中旬	0.067	0.0607	0.2126	0	0.1430	132
9月下旬	0.067	0.0607	0.2126	0	0.1430	132
10月	0.0801	0.0588	0.7212	0.0024	0.2896	132
11月	0.1255	0.1058	0.2842	0.0008	0.2012	132
12月	0.0126	0	0.43	0	0.159	132
1月	0.0964	0.0392	0.1308	0.0319	0.0941	132
2月	0.2267	0.038	0.172	0.0205	0.0945	132.685
3月	0.2025	0.1012	0.5288	0.0031	0.1169	133.049
4月	0.2929	0.495	0.395	0.0077	0.0893	132
5月	0.6428	0.6233	0.1667	0.0006	0.1064	132
6月	0.9279	0.81	0	0.099	0.024	132

表 4 丰水年岳城水库生态调度结果

Table 4 Results of ecological operation in Yuecheng reservoir during the wet year

时段	来水量/亿 m ³	供水水量/亿 m ³	供水缺水/亿 m ³	生态水量/亿 m ³	生态缺水/亿 m ³	库水位/m
7 月上旬	0.832 1	0.283 9	0	0.541 9	0	132
7 月中旬	0.832 1	0.283 9	0	0.541 9	0	132
7 月下旬	0.832 1	0.312 3	0	0.512 9	0	132
8 月上旬	1.928 4	0.435 5	0	1.486 6	0	132
8 月中旬	1.928 4	0.435 5	0	1.486 6	0	132
8 月下旬	1.928 4	0.479	0	1.442 4	0	132
9 月上旬	1.002 2	0.273 3	0	0.722 6	0	132
9 月中旬	1.002 2	0.273 3	0	0.722 6	0	132
9 月下旬	1.002 2	0.273 3	0	0.722 6	0	132
10 月	1.274 9	0.686 4	0.093 6	0.015 7	0.276 3	134.478 5
11 月	1.117 2	0.278 8	0.111 2	0.039 8	0.162 2	137.507 1
12 月	1.058	0.403 5	0.026 5	0.031 8	0.127 2	139.592 5
1 月	0.409 8	0.087 5	0.082 5	0.024 7	0.101 3	140.501 7
2 月	0.319 3	0.145 5	0.064 5	0.012 3	0.102 7	140.954 6
3 月	0.151 6	0.510 5	0.119 5	0.017 9	0.102 1	139.679
4 月	0.113 8	0.771 6	0.118 4	0.030 7	0.066 3	137.216 4
5 月	0.069 4	0.638 4	0.151 6	0.036 5	0.070 5	134.791 8
6 月	0.186 9	0.787 1	0.022 9	0.012 1	0.110 9	132

通过上述计算可以看出:漳河来水难以满足各方面的用水需求,即使在丰水年,也只能在汛期满足用水,平水年份和枯水年份,缺水程度已十分严峻;汛期由于漳河洪水下泄河道,河流生态用水得以满足,但其余时段必须通过水库调度放水,才能提供河道用水,否则将出现干涸;根据调度结果,生活、生态、灌溉均缺水严重,因此沿线经济发展必须考虑水资源承载能力。

4 结语

本文通过对漳河下游径流规律的分析发现,自岳城水库建成以来,漳河下游水量显著减少,且目前已多次出现了断流,生态水文系统受到严重破坏。为缓解这一问题,除了采用工程措施逐步对下游河道进行修复,还需在水库运用时考虑生态需水的要求。通过建立多目标调度模型,实现对岳城水库的生态调度,并利用现代优化技术粒子群算法进行成功求解。计算结果表明,通过生态调度,在考虑水库防洪、供水的同时,也考虑到河流生态需水,可以对有限水量进行优化配置。但是由于漳河水资源严重短缺,生活、生产、生态缺水程度大,因此必须充分考虑当地水资源承载能力,实施可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 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): 119-123. (ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng. River Health: Concept, Assessment Method and Direction [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(1): 119-123. (in Chinese))
- [2] 董哲仁,孙东亚,赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32. (DONG Zheren, SUN Dongya, ZHAO Jinyong. Multiobjective Ecological Operation of Reservoirs [J]. Water Resources Hydropower Engineering, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese))
- [3] 陈庆伟,刘兰芬,刘昌明. 筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(5): 578-582. (CHEN Qingwei, LIU Lanfen, LIU Changming. Impact of Dam Construction on Ecosystem and Dispatches of Ecological Water [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2007, 43(5): 578-582. (in Chinese))
- [4] CAI Qinghua, Tang Tao and LIU Jiar kang. Several Research Hotspots in River Ecology [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1573-1577.
- [5] 王根绪. 流域尺度生态水文研究评述 [J]. 生态学报, 2005, 25(4): 892-903. (WANG Gexun. Review on Some Issues Ecological Hydrology Research at the Watershed Scale [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(4): 892-903. (in Chinese))
- [6] Hirsch, R. M., Slack, J. R., Smith, R. A. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data [J]. Water Resource Research, 1982, 18(1): 107-121.
- [7] 朱勇华,邵淑彩,孙毓玉. 应用数理统计[M]. 武汉: 武汉大学水利电力大学出版社, 2000. (ZHU Yonghua, TAI Shurcai, SUN Weiyu. Application of Mathematical Statistics [M]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering Press, 2000. (in Chinese))
- [8] 门宝辉,刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 479-482. (MEN Baohui, LIU Changming. Modified Calculative Criterion of Tennant and Its Application [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 479-482. (in Chinese))
- [9] 陈朋成,周孝德,靳春燕,等. 黄河上游河道生态需水量研究 [J]. 人民黄河, 2008, 30(2): 43-45. (CHEN Pengcheng, ZHOU Xiaode, JIN Chunyan, et al. Study of the Ecological Water Demand in Upper Reaches of Yellow River [J]. Yellow River, 2008, 30(2): 43-45. (in Chinese))
- [10] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [C]. In: IEEE Int'l Conf On Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [11] Shi Y, Eberhart R C. Fuzzy Adaptive Particle Swarm Optimization [C]. In: Proc Congress On Evolutionary Computation, 2001.