

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.01097

碧流河水库下游河道生态需水分析及应对措施

王 强, 梁国华, 何 斌, 周惠成

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 根据碧流河流域生态特征, 分析了适合该流域的河道生态需水计算方法, 应用于碧流河水库兴利调度, 并以生态目标为基础, 确定下游河道的生态需水量。结果表明: 碧流河水库下游河道生态环境基本供水量及改善供水量分别需要 2 765 万 m³ 和 4 250 万 m³。为了保护和改善河流生态环境, 促进流域水资源可持续利用, 需要采取最严格的用水管理制度, 加大非常规水源的开发利用力度, 并结合调水工程以及河库连通工程等相关措施。

关键词: 生态需水; 碧流河水库; 7Q10法; Tennant法; 兴利计算

中图分类号: TV213.9; TV697.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2013) 01-0097-04

Analysis and Measures of Ecological Water Demand in Lower Reaches of Biliuhe Reservoir

WANG Qiang, LIANG Guo hua, HE Bin, ZHOU Hui cheng

(Hydraulic Engineering College, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the ecological characteristics of the Biliuhe Basin, the calculation method of river ecological water demand is introduced in this paper. This method is applied in the profit regulation of the Biliuhe Reservoir in order to determine the river ecological water demand based on the ecological objectives. The results show that the basic and improved ecological water supply in the lower reaches of the Biliuhe reservoir are 27.65 million cubic meters and 42.5 million cubic meters, respectively. In order to protect and improve the river ecological environment and facilitate the sustainable utilization of water resources in the Biliuhe basin, the strictest water management system and the development and utilization of non-conventional water resources need to be implemented, as well as the water diversion project and river reservoir connectivity project.

Key words: ecological water demand; Biliuhe Reservoir; 7Q10 method; Tennant method; profit regulation calculation

大连市是我国北方严重的资源性缺水城市之一, 人均水资源占有量仅为 493 m³, 不到全国人均占有量的 1/4。境内主要河流的地表水开发利用程度平均达到了 45.6%, 超过了国际上公认的开发利用上限, 而且流域内水资源时空分布不均, 有近一半的河流来自难以利用的沿黄海、渤海的季节性小河, 因此, 本地水资源进一步开发潜力不大^[1]。近年来, 随着大连市社会经济稳定发展、人口持续增长, 用水量超过了该地区水资源承载能力, 生活和工业用水大量挤占河道生态用水的现象时有发生。作为大连市最大的水源地, 碧流河水库在对大连市进行供水时仍然采用传统的水库调度方式, 主要考虑人类生活用水、工业用水、农业灌溉用水及发电用水的需求, 较少考虑水库下游河道生态需求, 导致下游生态恶化, 河道污染严重。本文以碧流河水库为研究对象, 对其下游河道进行生态需水分析, 并提出了改变大连市水资源短缺

现状的几点应对措施, 以保障大连市社会经济和生态环境可持续性。

1 研究区域概况

碧流河发源于盖州市卧龙泉镇的新开岭, 于普兰店市城子坦镇谢家屯流入黄海。碧流河总长 156 km, 流域面积 2 814 km²。碧流河水库是大连市最大的水源地, 位于辽宁省大连普兰店市双塔镇与庄河市荷花山镇分界的碧流河干流上, 水库控制面积 2 085 km², 占全流域面积的 74.1%。总库容为 9.34 亿 m³。水库按五百年一遇洪水设计, 万年一遇洪水校核, 控制流域多年平均降水量 742.8 mm, 坝址以上多年平均径流量 6.14 亿 m³。碧流河水库是一座以城市供水为主, 兼有防洪、发电、养鱼、灌溉等综合效益的多年调节大(II)型水利枢纽。碧流河流域位置图见图 1 所示。

收稿日期: 2012-10-21 修回日期: 2012-12-25 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1131.018.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50909012; 51109025); 水利部公益性行业专项(201001024); 大连理工大学学科交叉前毅科研专题(DUT12JR01)

作者简介: 王 强(1985-), 男, 吉林辽源人, 博士, 主要从事水库调度及水资源综合利用研究。E-mail: wangqiangzzu@126.com

通讯作者: 何 斌(1977-), 男, 浙江舟山人, 副教授, 博士, 从事区域水资源可持续利用研究。E-mail: hebin@dut.edu.cn



图 1 碧流河流域地理位置示意图

Fig. 1 Location of the Biliuhe Basi

具有重要的基础性作用,根据简单的水文学指标对河道流量进行设定,假定恢复、保持河道内一定规模的来流即可实现生态系统对径流的需求。目前常用的水文学方法主要包括 7Q10 法和 Tennant 法,其生态需水量计算标准及具体使用过程详见参考文献[10]和[11]。

由于碧流河流域地处北方严寒地区,主要气候类型为温带季风气候,季节性差异明显,冬季长达半年以上,雨量主要集中在夏季。流域年平均气温 10.5℃,年内最高气温发生在 8 月,平均气温为 24.0℃,最低气温发生在 1 月,平均气温为 -4.7℃,而鱼类产卵育幼适宜温度一般为 17℃以上,所以碧流河流域鱼类的产卵育幼最佳时期为 5 月底到至 7 月份,8 月为活跃期,而且每年的 12 月到翌年 3 月河道均处于冰冻期,故对 Tennant 法的计算标准做了修正^[10],修正后的河流流量状况标准见表 1。

表 1 Tennant 法河流流量状况标准修正

Table 1 Modified standard of river discharge using the Tennant Method

流量描述	推荐的基流(9月-5月) 平均流量百分比(%)	推荐的基流(6月-8月) 平均流量百分比(%)
最大	200	200
最佳范围	60~100	60~100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
中	10	30
差或最差	10	10
极差	0~10	0~10

2 生态需水量的计算

2.1 生态需水量计算方法

生态需水量是近年来水资源和生态环境领域的一个研究热点^[2-4]。对生态需水的研究涉及了河流、植被、湖泊和湿地等生态系统,其中对河流生态系统的研究较为深入,并取得了丰富的研究成果^[5-7]。较为通用的研究方法有水文学方法、水力学方法、栖息地方法和综合法等^[8-9]。而水文学法是最简单,最具代表性的方法,该法基于河道径流对生态系统

2.2 河道生态需水量的计算

选取碧流河流域为典型流域,以 7Q10 法计算其生态流量,即采用近 10 年最枯月平均流量作为河流最小流量设计值,并用修正后 Tennant 法进行检验,进而确定水库下游河道的生态需水量。近 10 年最枯月平均流量计算采用 2002 年-2011 年碧流河水库以上流域月径流量资料,见表 2。

表 2 碧流河流域月平均径流量与流量

Table 2 Average monthly runoff and flow discharge in the Biliuhe River

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
水库平均径流量/ 10^4 m^3	700	717	1078	1409	2691	1975	5781	19880	3886	1757	1111	900
水库平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.61	2.93	4.02	5.44	10.05	7.62	21.58	74.22	14.99	6.56	4.29	3.36
区间平均径流量/ 10^4 m^3	245	251	377	493	942	691	2023	6958	1360	615	389	315
区间平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.91	1.03	1.41	1.9	3.52	2.67	7.55	25.98	5.25	2.3	1.5	1.18
河口平均径流量/ 10^4 m^3	945	968	1455	1902	3633	2666	7804	26838	5246	2372	1500	1215
河口平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	3.52	3.96	5.43	7.34	13.57	10.29	29.13	100.2	15.24	8.86	5.79	4.54

水库 6 月-8 月最小月平均流量发生在 6 月,为 7.62 m^3/s ;9 月-5 月最小月平均流量发生在 1 月,为 2.61 m^3/s 。下游区间 6 月-8 月最小月平均径流量发生在 6 月,为 2.67 m^3/s ;9 月-5 月最小月平均径流量发生在 1 月,为 0.91 m^3/s 。由于缺乏区间径流资料,故本文采用简化的方式来确定区间径流量,即根据水文同步性,将水库坝址以上控制流域面积与水库至入海口之间流域控制面积进行对比,进而同倍比放大得到区间径流量。采用该方式来确定区间径流量,

可以还原未建库状态下河流的天然流量状态,合理反映出建库前的河道生态需水过程,使水库下游河道的生态需水量的计算更加真实可靠。

流域平均流量的计算选取 1951 年-2011 年碧流河流域流量资料计算,并采用修正后的 Tennant 法来选择生态需水合理的范围,计算结果见表 3。通过计算,碧流河水库下游河道近 10 年最枯月平均流量为 3.52 m^3/s ,相当于碧流河流域多年平均流量的 13.7%。参考《水资源可利用量估算方法

(试行)》的有关规定,北方地区一般取流域多年平均流量的10%~20%作为最低生态需水量,所以采用7Q10法计算碧流河水库下游河道的生态需水量是合理的。

表3 碧流河生态需水量计算标准

Table 3 Calculation standard of ecological flow demand in the Biliuhe River

参数	枯水期	丰水期
	(9月-5月)	(6月-8月)
近10年最枯月平均径流量(7Q10法)/ 10^4m^3	945	2 666
近10年最枯月平均流量(7Q10法)/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	3.52	10.29
流域多年平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	25.72	
适宜生态流量“好”(Tennant法)/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	5.14	10.29
适宜生态流量“中”(Tennant法)/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.57	7.72
适宜生态流量“差”(Tennant法)/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2.57	2.57
最佳生态流量(Tennant法)/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	> 15.43	

3 基于生态需水的优化调节计算

3.1 基本资料

在本文兴利计算中,入库水量采用了碧流河水库1951年-2011年实测的月径流量资料,蒸发量通过对历史资料的

表4 碧流河水库兴利调度供给下游河道的生态环境基本和改善供水量

Table 4 The basic and improved ecological water supply in the lower reaches of the Biliuhe reservoir under the profit regulation

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年生态需水量	年生态供水量	年缺水水量
10%流量(差)/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.88	1.76	1.11	1.18	1.23	0.88	0.12	0.03	0.13	0.46	0.99	1.48			
10%水量(差)/ 10^4m^3	503	426	297	306	330	227	31	9	34	124	256	396	2939	2765	174
30%流量(中)/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.88	1.76	1.11	1.18	1.23	5.01	0.94	0.5	0.13	0.46	0.99	1.48			
30%水量(中)/ 10^4m^3	503	426	297	306	330	1366	321	203	34	124	256	396	4562	4250	312
增加供水量/ 10^4m^3	0	0	0	0	0	1139	290	194	0	0	0	0	1623	1485	138

注:10%流量、30%水量分别表示满足下游生态基本和改善流量、水库补给的水量。

3.3 结果分析及讨论

根据表4的计算结果,把生态“差或最差”的状态提高到“中”的状态,供水量增加了1485万 m^3 。这主要是因为,在调度过程中,充分利用了兴利调度过程中的弃水,并且在供给农业用水的同时,河道生态需水也得到了一定的补给,同时水库至入海口间的区间径流在很大程度上也补给了水库的下游河道生态需水。从这一调整过程可以发现,流域生态需水量提高的过程主要发生在6月-8月,而6月-8月正是水库的汛期,弃水主要发生在这一时间内。

此外,优化调节后水库所供给的生态需水量并不能完全达到生态“差或最差”及“中”的状态需求,如表4所示。流域生态流量处于“差或最差”的状态,年生态缺水水量为174万 m^3 。因此,完全满足生态需水后的实际的供水量分别为:流域生态流量“差或最差”的状态为2939万 m^3 ,流域生态流量“中”的状态为4562万 m^3 ,相应的把“差或最差”的状态提高到中的状态,供水量增加了1623万 m^3 。这其中生态供水不能达到实际生态需水要求的主要原因为:碧流河水库按照现有调度规则进行兴利调度时,优先考虑生活及工业用水的需要,然后才考虑农业灌溉和生态需水的需要,造成了生态需水量供给不足,这也是水资源供需矛盾的重要体现。

分析,选用历史最枯典型年的蒸发量作为蒸漏损失量。实际农业灌溉用水量为标准农业灌溉用水量乘以农灌系数确定,城市及生活供水量取规划值2.25亿 m^3/a ,工业时段保证率为97%,农业年保证率为76%。

3.2 计算步骤及结果

应用遗传算法进行优化计算,起调水位采用多年平均值64.0m,汛限水位按规划设计值即主汛期汛限水位为68.1m,后汛期汛限水位为68.5m,兴利水位为69.0m。在保证城市供水保证率以及农业供水保证率不变的前提下,以生态缺水最小为目标函数,按照碧流河水库调度规则对水库进行优化调度,调度时考虑了生态需水的需要,而生态需水量则通过7Q10法及Tennant法来确定,优化调节后,碧流河水库为下游河道生态环境基本和改善供水量的估算结果见表4。参考表1的描述,流域生态流量处于“差或最差”状态下,按照基本流量供给生态环境需水,则碧流河水库在满足城市供水保证率不变的情况下,用于下游河道生态的供水量为2765万 m^3 。如果把生态需水提高到“中”的水平,即将6月-8月的流域生态需水量提高到7.72 m^3/s ,则碧流河水库每年需要增加生态供水量为1485万 m^3 。

4 水资源短缺的应对措施

由于水资源条件的改变,大连市天然径流量近年来明显减少。从大连市第二次水资源评价成果中可以发现,由于人类活动、水质变化等原因,导致了现状供水能力的下降;根据大连市水资源情况和现有工程情况,本区域的地表和地下水的可开发潜力已不是很大,很难有充足的水量来满足生态环境需求。考虑到城市发展用水量增加、水资源开发过度地区需要退还生态用水、气候变化导致来水偏少等因素,未来水资源供需形势更为严峻。为应对大连市在新跨越式发展形势下的水资源开发利用问题,主要采取了以下几点应对措施。

4.1 实施最严格的用水管理制度

遵循人与自然和谐、生态平衡的用水原则,按照水生态环境承载能力,引导产业结构调整,严格控制河流开发利用上限,并加强用水管理,建立水资源高效利用体系,同时实行最严格的水资源管理制度,建立水资源利用“三条红线”,严格实行总量控制、定额管理。对于规划新建区域和建设项目取水须进行水资源论证,对取水的合理性、取水水源的可靠性及允许取水量、退水情况及水资源保护措施提出合理的建

议,通过法律、法规和政策等手段,严格管理取水许可,充分发挥水资源的利用效益和效率,并把节水减排工作贯穿于经济社会发展全过程。

4.2 非常规水源的开发利用

4.2.1 海水利用对策

大连市拥有靠海的优势,海水可直接利用于工业冷却水,而海水淡化主要用于海岛的生活饮用水。根据大连市黄、渤海不同海水水质,结合电厂新建或改扩建及温海水排放项目,以黄海沿岸的大连湾北岸、大孤山半岛以及庄河黑岛、石城列岛,渤海沿岸的长兴岛、松木岛以及旅顺口区为重点区域,集合沿岸工业企业布局,选择沿岸工业企业相对集中的地区建设海水淡化项目。通过海水淡化与城市供水管网并网,成为城市供水的重要应急储备水源。

随着工业直接利用海水的推广和海水淡化技术的不断提高,海水利用量将逐年增加。根据目前工业对海水直接利用的需求以及海水淡化能力规模,大连市海水利用量还有很大的潜力可挖。根据《大连市水务现代化规划》相关数据显示,2015 年海水淡化规模为 50 万 m^3/d ,2020 年海水淡化规模达到 100 万 m^3/d 。

4.2.2 中水回用对策

中水主要是指对污水处理厂的二级排放水进行深度处理后的再生水,符合《城市杂用水水质标准》或《生活杂用水水质标准》,能满足工业冷却、城市绿化、建筑施工、地下水回灌等用水要求。中水回用是大连市解决水资源短缺问题,提高水资源承载能力,促进经济社会可持续发展的重要途径之一。

目前,大连市中水回用年增长率高达 34.2%。随着大连市规划中的中水工程设施陆续建成,形成以长兴岛临港工业区、甘井子区和瓦房店为核心的发展区域,并根据大连市现有和规划的污水处理能力和回用能力,进一步扩大中水利用范围,提高污水处理标准以增加中水回用规模。根据《大连市水务现代化规划》相关数据显示,2015 年大连市中水回用量达到 2.6 亿 m^3 ,2020 年中水回用量将达到 3.6 亿 m^3 。

4.2.3 雨水利用对策

雨水利用是把原来快速排除的雨水转变为下渗、收集回用、调蓄排放等,是解决水资源短缺问题的重要技术手段。目前,大连城市化率高达 80%,城区多为屋顶、路面等不透水表面,一遇暴雨,几乎全部雨量即刻形成径流,每年约 15 亿 m^3 的淡水资源白白流入大海^[1]。作为沿海城市,大连的灰尘污染较轻,雨水杂质含量较低,特殊的地理环境为雨水开发利用提供了条件。利用城市交通设施、广场、绿地、大型建筑物和小区,做好雨水的回收与利用,不仅能充分利用天然降雨,解决城市绿化、改善区域的生态环境、减轻城市的防洪压力、减少污水排放造成的污染,还能缓解大连的用水压力,涵养地下水源。从长远看,开发利用雨水资源,对大连经济可持续发展具有重要意义。

4.3 跨流域调水工程的实施

在采取节水、污水处理回用、加大海水利用、调整产业结构等措施的同时,还需加大外流域调水。目前大连市已实施了引碧入连、引英入连等境内跨流域调水工程,平均每年约

为大连市供水 3.2 亿 m^3 。然而这些工程只是暂时缓解了大连市水资源短缺的形势。随着社会经济的快速发展,水资源短缺的现状将进一步加剧,为此大连市正在进行大伙房水库输水二期工程及其配套工程的规划建设。随着大伙房输水工程的启用,按规划水量调配,可以充分解决大连市缺水问题,且有充足的水量供给碧流河水库下游河道生态系统。预计到 2020 年,正在实施的大伙房调水工程与未来拟实施的外流域调水工程每年可增加供水量 5.4 亿 m^3 。

4.4 河库连通工程的实施

鉴于地区水资源日趋短缺的严峻形势以及新时期水务发展的高要求,大连市开始着手构建适应大连经济社会现代化要求的安全、联动的水资源调配体系,对市内六条河流及十座水库进行连通联调,形成“六河十库十通道”的水资源连通体系。通过该工程的实施,可充分发挥外调水与本地水之间、本地连通水库群之间的补偿调节作用,明显改善和修复河道生态环境,显著提高各类用水的供水保证率,对以水资源的可持续利用保障经济社会的跨越式发展具有重大意义。

综上,在加强用水管理的基础上,通过优化开发本地水资源,加大利用非常规水源,合理实施引入跨流域调水工程以及河库连通工程,形成“东西互济、北水南调、主客联动、多源补给、丰枯调剂”的水资源配置格局。通过实施以上应对措施,大连市城镇需水基本得到满足。同时通过水源置换的方式有效的降低了碧流河水库城市生活供水量,间接地保障了河道内生态环境需求,促进了水资源的可持续发展。

5 结语

大连市水资源匮乏,生态用水比例过高会影响社会经济的正常发展,过低会使下游生态环境遭到破坏。本文结合大连市气候及环境条件,合理估算了碧流河下游河道内的生态需水量。结果表明,在保证城市供水保证率以及农业供水保证率不变的前提下,通过优化调度,增加少量供水,即可使下游生态环境得到较大改善,同时还能充分利用汛期水库中所产生的弃水来满足河道适宜生态需水量要求。

本文以河流鱼类作为生态保护目标进行河流生态需水量的估算,旨在维持当前碧流河水库下游河道的生态环境不再进一步恶化。而要达到生态恢复的目标,就必须提高其生态供水量,增加生态供水量势必加重水资源供需矛盾。因此,需要加强用水管理,实行最严格的水资源管理制度,建立水资源利用“三条红线”。在此基础上,加大利用非常规水源,合理实施跨流域调水工程以及河库连通工程,形成“北水南调、主客联动、多源补给、丰枯调剂”的水资源配置格局,最终实现经济社会、生态环境与水资源协同发展。

参考文献(References):

- [1] 郎连和,杨德礼,彭勇,等.大连市水资源可持续利用对策研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(6):27-32.(LANG Lian he, YANG De li, PENG Yong, et al. Study on Sustainable Utilization Countermeasure of Water Resource in Dalian[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 27-32. (in Chinese))

(下转第 109 页)

- in the Yangshan Au Ore Belt [J]. Acta Geologica Sichuan, 2007, 27(1): 37-39. (in Chinese)
- [10] 杨文玉, 师春, 王金伟, 等. 克什克腾旗黄岗矿区水文地质特征[J]. 内蒙古水利, 2011, (1): 117-118. (YANG Wen yu, SHI Chun, WANG Jin wei, et al. Characteristics of Hexigten Banner Huanggang Mining Area Hydrogeological [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2011, (1): 117-118. (in Chinese))
- [11] 金红, 王生力, 武毅. 基岩裂隙地下水综合勘查技术模式[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 34-38. (JIN Hong, WANG Sheng li, WU Yi. Integrated Exploration Technology Mode for Bedrock Fissure Groundwater [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(1): 34-38. (in Chinese))
- [12] 龙玉桥, 李伟, 李砚阁, 等. MQ 点插值法在地下水稳定流计算中的应用[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 572-579. (LONG Yu qiao, LI wei, LI Yan ge, et al. Application of Multiquadric Method for Numerical Simulation of Steady Groundwater Flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 572-579. (in Chinese))
- [13] 刘立才, 张霓, 王理许. 北京平原区浅层地下水热泵系统承载能力评价[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1473-1480. (LIU Li cai, ZHANG Ni, WANG Li-xu. Energy Load Capacity Evaluation for Shallow Groundwater Heat Pumps in Beijing Plain [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1473-1480. (in Chinese))
- [14] 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等. 滨海地区潮汐对地下水水位变化影响的统计学分析[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1365-1376. (FU Cong sheng, CHEN Jian yao, Ceng Song qing, et al. Statistical Analysis on Impact of Tide on Water Table Fluctuation in Coastal Aquifer [J]. (in Chinese))
- [15] 霍再林, 冯绍元, 康绍忠, 等. 神经网络与数值模型在地下水变化分析中应用[J]. 水利学报, 2009, 40(06): 724-728. (HU O Zai lin, FENG Shao yuan, KANG Shao zhong, et al. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(06): 724-728. (in Chinese))
- [16] 张玉军, 张维庆. 考虑裂隙的几何-力学特性的双重孔隙介质水-应力耦合模型及其有限元分析[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1452-1459. (ZHANG Yu jun, ZHANG Wei qing. Coupled Hydro-mechanical Model and FEM Analysis for Dual porosity Media Considering Geometric mechanical Characteristics of Fractures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1452-1459. (in Chinese))
- (上接第 100 页)
- [2] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 等. 生态环境需水研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 617-623. (ZHAO Xi ning, WU Pu te, WANG Wan zhong, et al. Research Advance on Ecological Environmental Water Requirement [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 617-623. (in Chinese))
- [3] 刘昌明. 水文水资源研究理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (LIU Chang ming. Theory and Practice of Hydrology and Water Resources [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 507-514. (WANG Xi qin, LIU Chang ming, YANG Zhi feng. Research Advance in Ecological Water Demand and Environmental Water Demand [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 507-514. (in Chinese))
- [5] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 129-137. (DONG Zhe ren. Framework of Research on Fluvial Ecosystem [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 129-137. (in Chinese))
- [6] 郑建平, 王芳. 大洋河河流生态需水研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 502-504. (ZHENG Jian ping, WANG Fang. Research on Ecological Water Requirement of Dayang River [J]. Journal of Hehai University (Natural Sciences), 2006, 34(5): 502-504. (in Chinese))
- [7] 宋兰兰, 陆桂华, 刘凌. 水文指数法确定河流生态需水[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1336-1341. (SONG Lan lan, LU Gui hua, LIU Ling. Estimation of Instream Flow Based on Hydrological Indexes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1336-1341. (in Chinese))
- [8] 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 294-301. (YANG Zhi feng, ZHANG Yuan. Comparison of Methods for Ecological and Environmental Flow in River Channels [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(3): 294-301. (in Chinese))
- [9] 魏国, 何俊仕. 沈阳市生态环境需水研究[J]. 人民长江, 2008, 36(5): 54-56. (WEI Guo, HE Jun shi. Research on Ecological Water Requirement of Shenyang [J]. Yangtze River, 2008, 36(5): 54-56. (in Chinese))
- [10] 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 Bao hui, LIU Chang ming. Modified Calculative Criterion of Tennant and its Application [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3): 479-482. (in Chinese))
- [11] 董福平, 管仪庆, 周黔生, 等. 河流生态用水量确定新方法研究[J]. 水利学报, 2007, (增刊): 547-551. (DONG Fu ping, GUAN Yi qing, ZHOU Qian sheng, et al. Study on the Calculation Method of River Ecological Environmental Flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, (supp.): 547-551. (in Chinese))
- [12] 迟宝明, 易树平, 李治军. 大连地下水开发模式探讨[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 73-77. (CHI Bao ming, YI Shu ping, LI Zhi jun. Exploitation pattern of groundwater in Dalian Area [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(2): 73-77. (in Chinese))