

文章编号: 0559-9350(2014)08-0938-12

流域/区域水量水质联合配置研究 II : 实例应用

张守平^{1,2}, 魏传江^{1,2}, 王浩^{1,2}, 侯丽娜³, 毕彦杰^{1,2}, 周翔南^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038;

3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为检验流域/区域水量水质联合配置理论方法的可行性, 在湟水干流进行实例应用研究。进行了基准年的供需平衡、耗水平衡分析和水质模拟, 对当地水质型缺水进行了识别。构建需水方案和工程方案集, 以需水中方案和工程方案3为推荐方案。以改进的三次平衡思想为指导, 模拟现有污染治理水平下, 2030年水功能区纳污量; 分析了耗水平衡和水功能区纳污能力的变化趋势, 进行了污染物总量控制分配。结果表明, 随着本研究方案的实施, 各水资源分区生态用水比例均在60%以上; 水质型缺水率仅为0.4%; 2030年COD和氨氮纳污量分别为4585.51t和244.63t, 污染物总量得到控制; 各水功能区水质均达标。证实流域/区域水量水质联合配置理论方法可行。

关键词: 水量水质; 配置; 三次平衡; 总量控制; 湟水干流

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.2014.08.007

现阶段, 我国水资源短缺与水环境污染并存, 水环境恶化进一步加剧了水资源短缺, 水循环和水环境演变呈现自然-人工二元水循环特征^[1]。传统的以水量配置为核心的水资源配置模式已难以适应, 需研究水量水质联合配置理论与方法。本文在文献[2]的理论方法基础上, 按照问题识别-方案设置-情景计算分析-方案评价推荐的过程, 以改进的三次平衡思想为指导, 以湟水干流为例进行分析应用。案例基准年为2010年, 规划水平年为2030年。

1 研究区概况

湟水干流是黄河上游一级支流, 发源于青海省海晏县境内, 自西北流向东南, 于甘肃省永靖县汇入黄河。本次研究范围为青海省内的湟水干流(图1)。湟水干流在青海省境内面积16120km², 全长336km。行政分区包括青海省海晏县、湟源县、湟中县、西宁市、大通县、互助县、平安县、乐都县和民和县。水资源分区包括上游区、北川河区、中游区和下游区(图2)。研究区内有8个水功能一级区, 22个水功能二级区。湟水干流水资源总量为22.88亿m³, 其中地表水资源量21.61亿m³。2010年, 各类水源工程的现状供水能力为11.98亿m³/a。2010年人均用水量332m³。万元GDP用水量为150m³, 农田亩均灌溉用水量为727m³。2010年湟水干流西宁大通以下河段的水质为IV-劣V类, 污染严重, 水功能区达标率仅为44%。2010年西宁市一水厂和二水厂由于地下水水质污染被关闭, 城市生活用水安全受到威胁。湟水中下游水质污染已对水资源开发利用造成严重影响。需从水量水质相结合的角度布局未来水资源开发利用。因此, 本次研究以湟水干流为例进行应用研究。

收稿日期: 2013-10-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201-006); 国家自然科学基金资助项目(51179203, 51379215, 50939006); 中央分成水资源费项目(1261530110043)

作者简介: 张守平(1984-), 男, 四川万源人, 博士生, 主要从事二元水循环及伴生过程模拟研究。E-mail: zsp19840625@163.com

通讯作者: 魏传江(1962-), 男, 山东泰安人, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wei1962@bbn.cn



图1 湟水干流地理位置



图2 湟水干流水资源分区

2 基准年问题识别分析

2.1 水量水质联合配置系统网络图 绘制水资源配置系统网络图是水资源配置的基础工作之一，文献[3]论述了水量配置系统网络图的基本原理和绘制方法。文献[4]论述了水资源全要素框架下的配置系统网络图绘制。在原有研究基础上，根据当地水功能区划分，增设必要水功能区和水质监测断面节点，形成水量水质联合配置系统网络图。

研究区分为湟水源头区、中游区和下游区以及北川河区4个水资源四级区。将工业园区和农业园区划分为独立的计算单元，按照四级区套县(市)细化其余地区，全区共分为55个计算单元。将大中小型水库均作为独立水库节点，包括现有水库和规划水库，共40座。各四级区出口断面设置水资源分区断面节点。根据实际供水和受水单元状况，确定供水节点。根据水资源分区断面、供水节点、水功能区断面和水质监测断面等，并结合水文站，共确定控制节点56个。研究区水量水质联合配置网络图较为复杂，文中以湟水下游区为例进行演示(图3)。

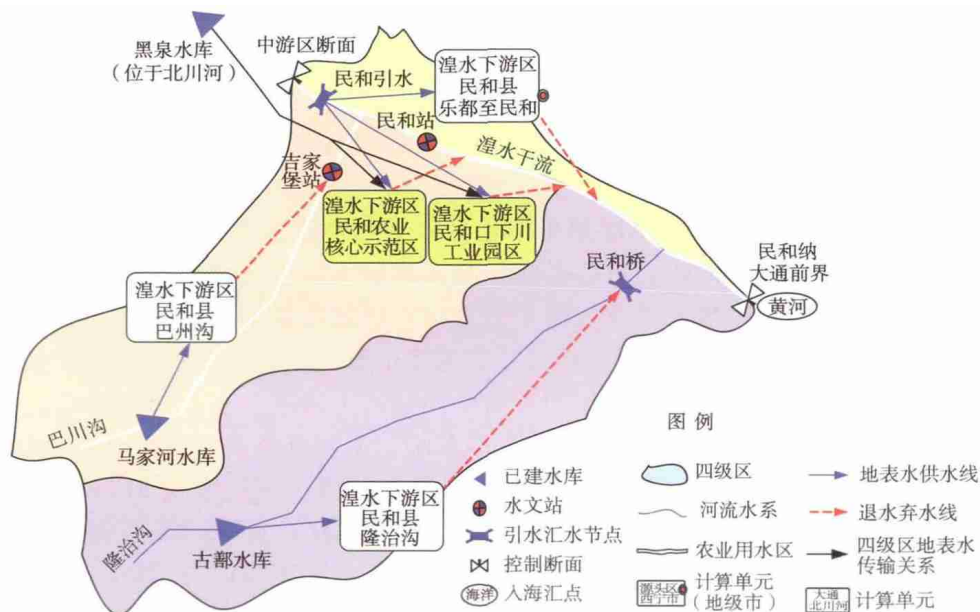


图3 湟水下游区水量水质联合配置系统网络图

2.2 模型求解及敏感参数 供需平衡分析系统和基于水功能区纳污能力污染物总量分配模型，根据系统网络图建立约束方程，在目标函数的引导下，利用GAMS软件包求解。而地下水模拟系统GMS则运用有限差分方法进行求解，地下水模拟为供需平衡分析提供地下水开采上限和地下水水质情

况。耗水平衡分析系统和水质模拟系统则通过模拟方法进行求解。供需平衡系统、耗水平衡系统和水质模拟系统参数率定过程见文献[4]。

供需平衡分析系统参数包括：地下水可开采量、地表水渠道供水能力、提水渠道供水能力、外调水渠道供水能力、废污水处理率、中水回用率等。耗水平衡分析系统参数包括：城镇生活、工业污水排放率，灌溉水利用系数，渠系蒸发、渗漏和入河道比例系数，田间净水量补给地下水比例系数等。污染物总量分配模型主要通过调整各决策参与者的权重，结合各参与者的平等协商，综合确定各排污口污染物排放量。水质模拟模型参数包括：各类污染物的入河系数，河流、湖泊和水库污染物的综合降解系数等。

2.3 基于现状平衡的水质模拟

2.3.1 基于现状的供需平衡分析 现状年干流水质污染严重，各支流水质较好。为了用水安全，生活和绝大部分工业以支流为主要水源地，农业则以干流供水为主。湟水干流只有农业、生态存在水质型缺水，型工业存在少量水质型缺水，生活不存在水质型缺水。但实际供水过程中，工业、农业和生态供水并没有完全按照标准进行分质供水，污染超标的水仍旧供给农业等。所以，表面上湟水干流水资源开发利用受水环境污染的影响不大。

以现状年水资源开发利用情况为基准，利用供需平衡分析系统，进行长系列逐月非分质供水模拟，得到基准年水资源供需平衡结果。基准年研究区多年平均缺水量为 12 025 万 m^3 ，缺水率为 9.7%；需水量为 123 665 万 m^3 ，供水量为 111 640 万 m^3 。其中城镇生活用水量为 5 799 万 m^3 ，农村生活用水量为 5 250 万 m^3 ，工业用水量为 26 851 万 m^3 ，城镇生态用水量为 4 273 万 m^3 。

2.3.2 基于现状的耗水平衡分析 在供需平衡基础上，以各个排污口废污水入河量为标准，模拟分析流域范围内城镇生活和工业用水的耗排情况。在耗水平衡分析过程中，以各水文测站的实际径流资料为基准，通过调节各河段的蒸发、渗漏等损失系数，确定各流域断面的水量过程，为河道内水质模拟提供径流过程基础。

基准年湟水干流农业耗水量占经济社会总耗水量的 77.3%，工业和生活耗水量分别占 11.7%、10.9%。因为西宁市及周边工业园区的影响，源头区社会经济发展水平较高，源头区生活和工业耗水量所占的比重最大，农业耗水比重最小；发展水平较低的中游区和下游区农业耗水比重却最大。基准年湟水干流综合耗水系数为 0.52。其中生活、工业和农业耗水系数分别为 0.51、0.23 和 0.62。各水资源分区经济社会耗水比例大致在 2.7%~19.4%。其中源头区和北川河区经济社会耗水比例最高，分别为 17.1% 和 19.4%，生态用水比例在合理的范围内。部分地区的水资源还有一定的开发潜力。

2.3.3 污染物产生及入河模拟 模拟基准年不同地区污染物产生水平及特点，是截污减排的基础。点源污染物产生和入河模拟以点源排污口各类污染物监测值为基准。在模拟点源废污水排放和入河的基础上，调整点源污染物产生浓度以及入河系数进行点源污染物的入河计算。非点源污染物产生和入河以非点源污染评价值为基准，并通过输出系数模型估算^[5]，非点源污染物评价值的准确程度决定了非点源污染模拟的精度。污染物从产生到入河要经过人工消减、自然降解和沿途留存，只有部分污染物进入河流。由于水量水质系统网络图概化的影响，需要校核入河系数确定污染物入河量。

湟水干流污染物产生总量为 344 375.7 t，其中 COD 为 226 760.2 t，氨氮为 10 817.8 t，TP 为 58 282.2 t，TN 为 48 515.5 t。全流域污染物产生量以面源为主，COD、氨氮、TP 和 TN 分别占总量的 82.76%、49.48%、98.51% 和 81.93%。从污染物产生来源看，湟水干流主要以面源污染物为主。

全流域污染物入河总量为 49 009.05 t，其中 COD 为 34 253.34 t，氨氮为 4 238.70 t，TP 为 2 629.10 t，TN 为 7 887.91 t。面源污染物的入河时间和距离较长，降解程度较高，污染物入河系数较小。全区以点源污染物入河为主，COD、氨氮、TP 和 TN 的入河量分别为 30 317.63 t、4 139.94 t、654.12 t 和 6 653.45 t，分别占入河量的 88.51%、97.67%、24.88% 和 84.35%。全流域 TN 入河量模拟误差最大，相对误差为 16%，其余各项误差均在 10% 以内。

点源污染物主要来源于西宁市，大通、湟中产生量也相对较高。西宁市及周边地区社会经济相

对发达，人口聚集，点源污染物产生较多。面源污染物主要来自互助、平安、乐都和民和等中下游地区。由于潜山地区水土流失严重和农业面源污染的影响，大通和湟中面源污染物产生量也较大。由于上游的西宁市、大通及湟中的排污影响，干流中下游水质变差，水质型缺水严重，上游水质型缺水较小。

2.3.4 河道内水质模拟 在耗水平衡分析过程中，以河道实测径流量为基准确定各节点的径流量。模型以月旬为模拟步长，径流量模拟也有误差，某一时间的水监测浓度的代表性差，且当地无逐时段长系列水质监测资料。因此，本次研究难以逐时段将污染物浓度进行校核，以各监测断面污染物通量为基准进行模拟，COD 和氨氮模拟结果分别见图 4 和图 5。COD 和氨氮的最大模拟误差分布在支流上，分别为 24.0% 和 38.9%，但干流模拟误差在 20% 以内，结果基本可行。

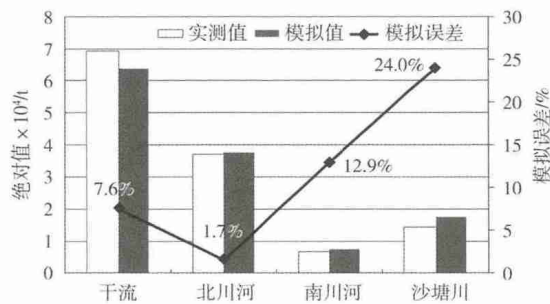


图4 主要河道 COD 输移量模拟结果

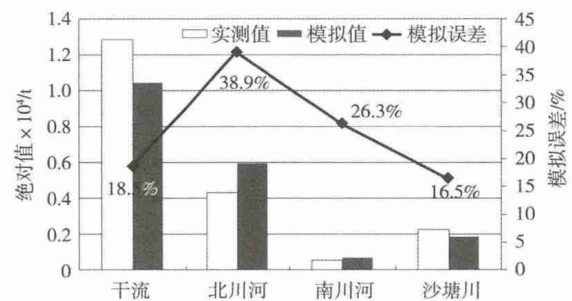


图5 主要河道氨氮输移量模拟结果

2.4 问题诊断

2.4.1 缺水识别 水量水质联合配置需要摸清基准年资源型缺水、工程型缺水和水质型缺水规模。工程型缺水和资源型缺水识别方法应用较多。本文重点分析水质型缺水识别。在供需平衡、耗水平衡和水质模拟的基础上，将节点的模拟水质输入供需平衡分析系统，其他参数不变，进行分质供水模拟。非分质供水和分质供水的缺水量差值即为水质型缺水量。

基准年，湟水干流水质型缺水为 4 531 万 m³，水质型缺水率为 3.7%。其中平安县水质缺水率为 25.7%，缺水量高达 1 589 万 m³，具体结果见表 1。乐都水质型缺水率为 14.2%。西宁、湟源和民和均受水质污染影响，海晏县、大通县和互助县基本不受影响。中游区水质缺水率为 9.3%，缺水量为 3 622 万 m³，下游区水质型缺水率为 1.6%，源头区和北川河区水质型缺水率较小。因此，湟水干流中下游水质污染严重，影响当地用水。水质型缺水主要集中于农业，其次为工业，农村生活和生态也部分受水质污染的影响，城镇生活暂无水质型缺水。但水质污染已经影响农村生活用水。

表 1 基准年行政区水质型缺水统计结果

(单位：万 m³)

行政区	需水量	缺水量					小计	缺水率/%
		城镇生活	农村生活	工业	农业	城镇生态		
西宁市	27 766	0	0	360	209	0	569	2.0
海晏县	1 993	0	0	0	0	0	0	0.0
湟源县	8 493	0	35	39	100	1	175	2.1
湟中县	21 488	0	0	1	0	0	1	0.0
大通县	18 651	0	0	0	0	0	0	0.0
互助县	14 562	0	0	0	0	0	0	0.0
平安县	6 180	0	0	228	1 232	129	1 589	25.7
乐都县	14 416	0	56	294	1 692	11	2 053	14.2
民和县	10 116	0	47	77	20	0	144	1.4
合计	123 665	0	138	999	3 253	141	4 531	3.7

湟源县、湟中县、互助县和民和县的缺水率较大。除湟中县甘河工业园区工业缺水 853 万 m³ 外，其余均为农业缺水。湟源县主要为资源型缺水；大通和湟中等主要为局部地区的工程型缺水；互助县为工程型和资源型缺水并存；平安和乐都等，主要为水质型缺水。总之，湟水干流资源型、工程型和水质型缺水并存。

2.4.2 纳污评价 湟水干流水功能区纳污能力为 2000 年制定。2001—2010 年湟水干流河道径流量和功能区分区纳污能力并未发生明显改变。按照文献[6]，计算基准年各水功能区纳污能力。各水功能区的设计流量和设计流速有所变化，降解参数、功能区水质目标均不变。通过分析，湟水干流水功能区纳污能力没有发生明显变化。因此，基准年仍以 2000 年制定的水功能区纳污能力为准进行纳污评价。

通过水质模拟，主要水功能区点源纳污量结果见表 2。各水功能区 COD 纳污量超过纳污能力 2 倍，氨氮纳污量超过纳污能力 7.9 倍，水污染形势严峻。基准年全区点源污染 COD 至少消减 20 282 t，氨氮至少消减 3 666.4 t，才能满足污染物总量控制。

表 2 基准年主要水功能区点源纳污能量模拟结果

水功能区	COD	氨氮	COD 纳污能力	氨氮纳污能力	COD 消减量	氨氮消减量
湟水海晏农业用水区	1 794.8	152.2	95.0	2.4	1 699.8	149.8
湟水湟源过渡区	2 009.0	130.3	214.9	6.0	1 794.1	124.4
湟水西宁饮用水水源区	2 031.4	144.6	262.1	27.0	1 769.3	117.7
湟水西宁市城西工业用水区	2 187.0	420.2	1 167.8	61.5	1 019.2	358.7
湟水西宁景观娱乐用水区	1 971.3	378.7	1 052.6	42.6	918.6	336.1
湟水西宁市城东工业用水区	2 354.2	452.3	1 257.1	75.6	1 097.1	376.7
湟水西宁排污控制区	2 988.6	574.2	1 595.9	59.6	1 392.7	514.6
湟水平安过渡区	371.1	71.3	198.2	12.7	172.9	58.6
湟水乐都农业用水区	1 303.2	220.0	1 180.1	49.2	123.2	170.9
湟水民和农业用水区	4 274.3	468.2	2 052.1	85.4	2 222.2	382.8
北川西宁工业用水区	7 059.4	886.9	594.3	24.7	6 465.1	862.1
南川西宁工业用水区	143.9	19.7	2.4	0.1	141.5	19.6
南川西宁景观娱乐用水区	86.6	11.9	1.5	0.1	85.1	11.8
沙塘川互助农业用水区	1 365.3	170.3	143.5	9.1	1 221.8	161.2
沙塘川西宁工业用水区	178.1	22.2	18.7	0.8	159.4	21.4
合计	30 118.2	4 123	9 836.2	456.8	20 282	3 666.4

2.4.3 问题诊断 通过基准年水量水质联合模拟分析，湟水干流水资源开发利用存在如下问题：水资源总量不足，水资源开发利用程度偏高；工程配套较差，部分地区存在工程型缺水；城镇生活污水处理水平低，工业污水处理达标率低且设施运行不稳定；农业面源污染日益突出；未实现污染物入河总量控制；水污染形势日趋严峻，水质型缺水逐步显现。针对问题，提出如下策略：加快引大济湟工程及其相关配套工程的建设；实行动态用水总量和排污总量控制；加大污水治理力度，缓解当地水体污染；提高当地水与外调水的联合调配力度。

3 方案设置

3.1 需水预测及工程方案组合 根据湟水干流社会经济发展规划，确定高、中、低 3 种需水方案。高方案为社会经济高速发展和适度节水；中方案为高速发展和强化节水；低方案为适度发展和强化节水。2030 年，高中低需水方案总需水量分别为 255 981 万 m³、235 083 万 m³ 和 211 718 万 m³。

以三次平衡思想为指导，通过 2015、2020 和 2030 年供需平衡分析设置工程方案集(表 3)，推

荐工程方案为方案3：总干渠、北干渠一期工程、西干渠(且冬季供水)、西宁供水管线和海东供水管线于2015年开通；2020年开通北干渠二期和扩大西干渠供水规模^[7-8]。将推荐工程方案与高、中、低需水方案分别进行水资源供需平衡分析。高、中、低需水方案的缺水量分别为35 847、21 586和3 321万m³，缺水率分别为14%、9.2%和1.6%。需水低方案不符合青海省未来发展的要求；需水高方案不符合节水政策和湟水干流的实际需求。需水中方案虽存在一定程度的缺水，但符合青海省未来发展要求和节水政策，可通过适当增加外调水量解决。因此，2030年推荐方案为需水中方案和工程方案3。

表3 工程方案设置

工程	2015年			2020年			2030年		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
总干渠	无	无	有	有	有	有	有	有	有
北干渠	一期	一期	一期	二期	二期	二期	二期	二期	二期
西干渠	无	原设计规模+ 冬季通水	原设计规模+ 冬季通水	无	原设计规模+ 冬季通水	扩大设计规 模+冬季通水	原设计规模+ 冬季不通水	原设计规模+ 冬季通水	扩大设计规 模+冬季通水
西宁供水管线	无	有	有	有	有	有	有	有	有
海东供水管线	无	有	有	有	有	有	有	有	有

3.2 水功能区纳污能力变化 随着用水效率提高，湟水干流社会经济耗水率逐步增加。从基准年到2030年，湟水干流经济耗水总量由5.53亿m³增加到14.20亿m³，综合耗水系数由0.52增加0.67，工业耗水系数由0.23增加到0.62，农业耗水系数由0.62增加到0.76。工业、农业和综合耗水系数逐渐增加，生活耗水系数逐渐减小。生活和农业耗水比重越来越小，工业耗水比重越来越大。各水资源分区经济社会耗水比例由20%以下增加到44%以下，生态用水比例由80%以上下降到56%以上。耗水量增加导致河道径流量减少。

由图6可知，虽有引大济湟工程调水，河道径流量还是逐步减小。但河道径流量均能满足河道适宜生态流量。河道径流量的减少，致使各水功能区纳污能力也发生明显变化，COD和氨氮纳污能力变化趋势分别见图7。从基准年到2030年，COD和氨氮纳污能力分别由15 629 t和701 t减小到9 482 t和413 t，分别减少38.6%和40.7%。

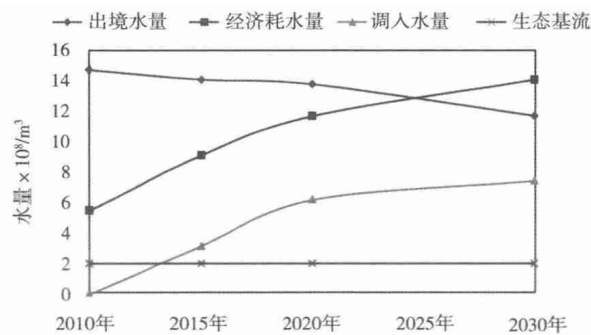


图6 湟水干流出境断面下泄量变化趋势图

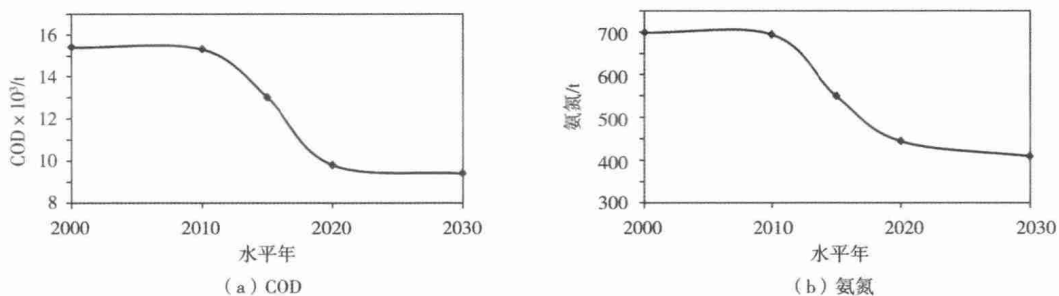


图7 湟水干流水功能区纳污能力变化

3.3 污染物总量控制与分配 为确定规划水平年污染治理程度，需分析在现状污染治理水平下，规划水平年的污染物产生和入河情况。在纳污能力变化趋势分析的基础上，确定污染治理程度。在现有污水处理能力下，2030年主要水功能区污染物纳污量结果见表4。主要水功能区 COD 和氨氮总纳污量分别超过纳污能力的8倍和25.8倍。西宁周边水功能区纳污量增长最快。

表4 2030年主要水功能区污染物消减量 (单位：t)

水功能区	COD	氨氮	COD纳污能力	氨氮纳污能力	COD消减量	氨氮消减量
湟水海晏农业用水区	2 453.8	202.9	11.09	0.28	2 442.7	202.7
湟水湟源过渡区	3 090.7	186.0	126.43	3.51	2 964.2	182.5
湟水西宁饮用水水源区	7 318.9	499.4	48.91	5.92	7 270.0	493.5
湟水西宁市城西工业用水区	3 509.2	678.1	116.82	6.58	3 392.3	671.5
湟水西宁景观娱乐用水区	3 163.0	611.2	977.08	39.56	2 185.9	571.6
湟水西宁市城东工业用水区	3 777.5	729.9	621.79	38.23	3 155.7	691.7
湟水西宁排污控制区	4 795.4	926.6	897.17	33.02	3 898.2	893.6
湟水平安过渡区	595.5	115.1	27.64	1.50	567.8	113.6
湟水乐都农业用水区	2 900.4	426.2	806.97	33.61	2 093.5	392.6
湟水民和农业用水区	9 485.8	976.2	1 981.10	82.47	7 504.7	893.7
北川西宁工业用水区	8 969.0	1 096.2	256.11	10.67	8 712.9	1 085.5
南川西宁工业用水区	365.0	38.3	2.41	0.10	362.6	38.2
南川西宁景观娱乐用水区	155.3	21.3	0.39	0.02	154.9	21.3
沙塘川互助农业用水区	3 378.8	474.9	0.00	0.00	3 378.8	474.9
沙塘川西宁工业用水区	746.1	68.0	10.26	0.43	735.8	67.6
合计	54 704.4	7 050.3	5 884.17	255.9	48 820	6 794.5

基于上述分析确定的2030年河道纳污能力和纳污量，运用基于水功能区纳污能力的污染物总量分配优化模型进行调节计算。以谁污染谁治理为分配原则，即水功能区上游的污染物消减以上游水功能区出境水质达标为准，本区的污染物消减以本区的水功能区出境水质达标为准。后通过各行政区的协调，综合确定各行政区的污染物消减量。到2030年湟水干流各行政区 COD 和氨氮消减 50 842.4 t 和 8 111.8 t，消减率分别为 86.4 % 和 95 %，具体结果如表5所示。

表5 2030年各行政区污染物总量分配结果

行政区	入河量/t		消减量/t		消减率/%	
	COD	氨氮	COD	氨氮	COD	氨氮
海晏县	2 760.7	379.6	2 486.6	366.5	90.1	96.5
湟源县	3 566.0	365.9	3 292.5	352.1	92.3	96.2
湟中县	7 689.1	659.1	6 342.1	602.5	82.5	91.4
西宁市	22 599.8	4 050.7	19 761.7	3 882.5	87.4	95.8
大通县	4 683.1	486.1	3 750.6	442.0	80.1	90.9
互助县	4 390.1	707.8	3 602.1	672.9	82.1	95.1
平安县	2 860.0	584.4	2 409.1	558.9	84.2	95.6
乐都县	5 402.3	680.0	4 714.2	637.5	87.3	93.7
民和县	4 895.0	625.6	4 483.5	597.0	91.6	95.4
合计	58 846.1	8 539.1	50 842.4	8 111.8	86.4	95.0

针对2030年的截污减排目标，通过点源、面源两方面入手，综合经济、技术和管理可行性，制定污染物治理方案。根据文献[9]，治理措施主要包括：增加城镇污水处理能力；兴建重点工业污染源截污减排工程，废水重复利用；水源地保护；进行水土保持和农药化肥面源污染防治；环境监测网络建设等。

通过上述措施，使湟水干流 COD 和氨氮产生量分别为 72 701.4 和 3 292 t，相对于基准年，产生量消减率分别为 61.3 % 和 38.5 %；COD 和氨氮入河量分别为 1 561.3 t 和 56.7 t，消减率分别为 60.3 % 和 42.7 %。到2030年城镇生活污水处理量为 7 800.7 万 m³，日处理规模为 21.37 万 m³/d，处理率为 79.9 %，工业污水处理量为 28 371 万 m³，日处理规模为 77.73 万 m³/d，处理率为 91.1 %，点源污水处理总量为 36 171.6 万 m³，日处理规模为 99.1 万 m³/d，处理率为 88.4 %。

4 配置方案分析

4.1 生态用水比例 规划水平年生态用水比例反映了水资源开发利用的可持续性、河流生态环境系统的健康程度。评价主要针对设定的水资源开发利用方案，通过模拟，考核配置方案是否满足水资源可持续利用和社会经济可持续发展要求，预测社会经济耗水与生态环境用水之间的关系。若方案不符合可持续发展需求，则需调整配置方案。

随着社会经济耗水量增大，生态用水比例越来越小。因此，研究区内各水资源四级区的生态用水比例将不断减小，基准年为 77.7 % ~ 96.9 %，2015 年为 67.3 % ~ 96 %，2020 年为 61.8 % ~ 95.7 %，2030 年为 56.8 % ~ 94.7 %。2030 年经济生态用水比例如图 8 所示。

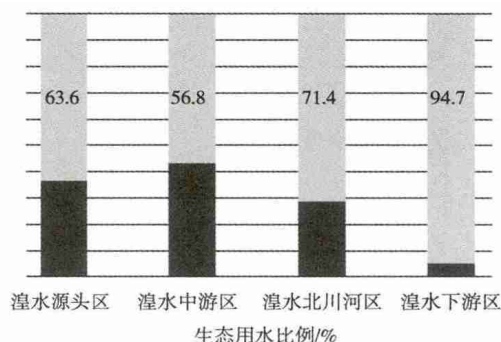


图8 2030年湟水干流流域经济生态用水比例

与基准年相比，2030年各水资源分区社会经济耗水比例均增加，北川河、源头区和中游区增加明显，分别为 23.8 %，19.3 % 和 18.9 %。由于社会经济耗水比例增加，生态用水比例将减少。北川河区的产业园区、设施农业等的建设和黑泉水库通过北干渠、西干渠、西宁供水管线和海东供水管线向其它水资源分区输水共同导致当地社会经济耗水比例增加。产业园区和东部城市群崛起则直接导致源头区和中游区社会经济耗水比例增加。但2030年，河道内适宜生态用水得到满足，地下水采补平衡，各水资源分区生态用水比例最低维持在 60 %，最高超过 90 %。当前国际认可的生态用水比例在 60 % ~ 70 % 以上。中国工程院咨询项目 西北地区水资源可持续发展战略研究 认为^[10]，我国西北地区生态用水比例至少在 50 % ~ 60 % 以上。因此，方案的生态用水比例可接受。方案的实施将使供水水源比较集中，对城市供水安全保障不利。地下水采补平衡后，作为战略应急水源储备。因此，拟定的水量水质联合配置方案符合水资源可持续利用的需求。

4.2 分质供水及平衡 在推荐需水和工程方案的基础上进行分质供水。随着节水措施、工程方案和截污减排方案的逐渐实施，全区社会经济缺水率逐步减小。基准年、2015年、2020年和2030年的缺水率，在非分质供水情况下分别为 9.7 %、4.2 %、3.3 % 和 8.8 %，在分质供水情况下，分别为 13.4 %、6.8 %、4.6 % 和 9.2 %。因此，基准年、2015年、2020年和2030年的水质型缺水率分别为 3.7 %、2.6 %、1.3 % 和 0.4 %。

2030年推荐方案的供需平衡结果，见图9。2030年全区需水量 239 731 万 m³，供水量 217 704 万 m³。缺水量 22 032 万 m³，缺水率 9.2 %；75 % 保证率缺水量 26 110 万 m³，缺水率 10.89 %，其中农业缺水量 10 947 万 m³，缺水率 9.22 %，缺水主要集中在南岸地区；95 % 保证率的缺水量 27 964 万 m³，缺水率 11.66 %，其中工业缺水量 14 988 万 m³，缺水率 14.8 %，缺水主要集中在工业园区。需水中方案在原规划外调水规模条件下，尚不能实现供需平衡，存在工业和农业缺水问题。应积极考虑2030

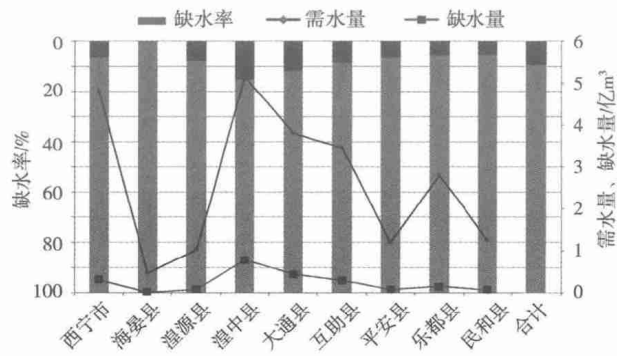


图9 2030年水资源供需平衡结果

年进一步扩大调水规模和修建南岸干渠。

2030年，湟水干流随着引大济湟工程及相关配套和截污减排方案的实施，基本不存在工程型缺水水质型缺水。工程型缺水此处不做详细分析。通过模拟调算，2030年推荐方案的水质型缺水具体见表6。

表6 2030年行政分区水质型缺水统计结果

(单位：万 m^3)

行政分区	需水量	缺水量					小计	缺水率/%
		城镇生活	农村生活	工业	农业	城镇生态		
西宁市	48 203	0	4	71	0	1	76	0.3
海晏县	4 648	0	0	0	0	0	0	0.0
湟源县	10 109	0	0	14	260	5	280	5.5
湟中县	51 572	0	0	0	0	0	0	0.0
大通县	38 125	0	0	19	0	4	15	0.1
互助县	34 660	0	0	3	0	0	0	0.0
平安县	11 908	0	0	7	28	2	38	0.6
乐都县	28 015	0	0	26	1	0	28	0.2
民和县	12 491	0	0	0	0	0	0	0.0
合计	239 731	0	4	141	290	13	437	0.4

2030年水质型缺水总量 437 万 m^3 ，水质型缺水率为 0.4%。湟源县当地山区径流的部分水质污染导致湟源县出现了少量水质型缺水，主要集中于农业。湟水干流的水质已经达标。随着截污减排方案的有效实施，湟水干流水资源开发利用将不受水环境污染的影响。

4.3 耗水平衡分析 各水平年，湟水干流经济社会耗水系数和耗水结构，见图10。全区综合耗水率由基准年的0.56变为2030年的0.67，其中工业耗水率增长明显，由基准年的0.28增长为2030年的0.62。耗水结构也不断发生变化，农业耗水比例减少，工业耗水比例则不断增加。

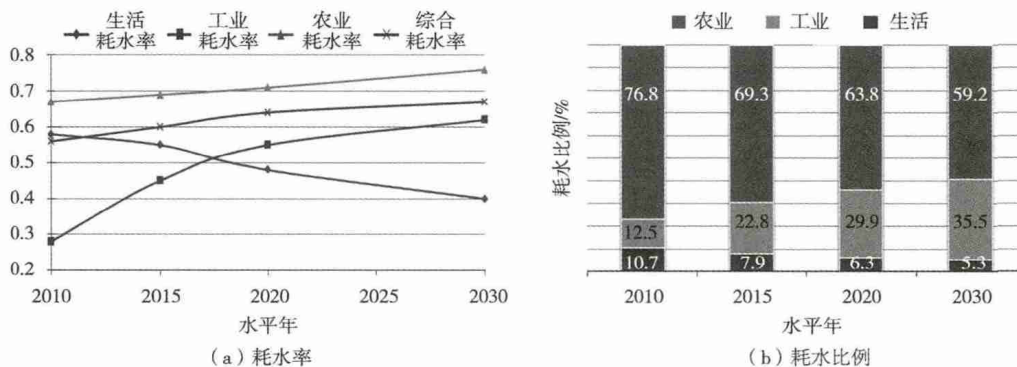


图10 湟水干流耗水结构分析

2030年全区农业耗水量占总耗水量的59.2%，工业和生活耗水量分别占35.5%和5.3%。由于西宁市及周边工业园区的发展，源头区工业耗水量所占的比重最大，农业耗水比重最小。中游区和下游区的生活和农业耗水比重最大，经济社会发展水平较低。2030年，社会经济快速发展导致各水资源分区经济耗水比例增加，生态用水比例减小，出口断面下泄流量减少。流域出口断面径流量由基准年的14.84亿m³减小到2030年的11.8亿m³。

4.4 纳污和水质达标评价 随着截污减排方案的实施，全区点源污染物入河量逐渐减少。点源COD、氨氮入河量分别由基准年的30317.63t、4139.94t减少到2030年的4585.51t和244.63t，点源COD、氨氮多年平均减排率分别为9%和13.2%。

2030年主要水功能区污染物纳污统计结果见表7。2030年COD污染物纳污能力尚有空余，但氨氮纳污量已接近极限。因此，COD污染控制偏于严格，氨氮控制稍微宽松。总体而言，各水功能区纳污能力均能满足其纳污量。

表7 2030年推荐方案主要水功能区纳污量 (单位:t)

水功能区	COD 纳污量	氨氮纳污量	COD 纳污能力	氨氮纳污能力
湟水海晏农业用水区	7.60	0.26	11.09	0.28
湟水湟源过渡区	86.71	3.35	126.43	3.51
湟水西宁饮用水水源区	33.54	5.06	48.91	5.92
湟水西宁市城西工业用水区	80.12	6.18	116.82	6.58
湟水西宁景观娱乐用水区	870.11	38.77	977.08	39.56
湟水西宁市城东工业用水区	526.44	36.50	621.79	38.23
湟水西宁排污控制区	815.30	31.53	897.17	33.02
湟水平安过渡区	18.96	1.44	27.64	1.50
湟水乐都农业用水区	553.44	32.09	806.97	33.61
湟水民和农业用水区	1358.69	78.74	1981.10	82.47
北川西宁工业用水区	225.64	10.18	256.11	10.67
南川西宁工业用水区	1.66	0.10	2.41	0.10
南川西宁景观娱乐用水区	0.26	0.02	0.39	0.02
沙塘川互助农业用水区	0.00	0.00	0.00	0.00
沙塘川西宁工业用水区	7.04	0.41	10.26	0.43
合计	4585.51	244.63	5884.17	255.9

断面水质评价方法较多，包括长系列年达标评价、典型年达标评价和典型流量达标评价等方法^[4]。本研究选用典型年达标评价进行水质评价。选定水功能水质控制断面，根据断面90%保证率径流量，选择典型年，分析典型年控制断面水质是否达标。若断面达标率超过80%即认为水质达标。在污染物总量控制和分配的基础上进行水质模拟。2030年水功能区断面达标率均达标。总体而言，随着截污减排方案的实施，水功能区水质基本达标。

4.5 水质达标、总量控制及水质型缺水的关系 随着配置方案的实施，全区主要水功能区COD和氨氮纳污总量由基准年的34252.2t、4239t，减少为2030年的4585.51t和244.63t；基准年水功能区COD、氨氮纳污量分别超过纳污能力2倍、7.9倍，2030年各水功能区纳污能力均能满足其纳污量；基准年湟水干流中下游水质污染严重，到2030年水功能区水质基本达标；全区水质型缺水由基准年的4530万m³减少到437万m³，水质型缺水率由3.7%减少到0.4%。基准年水质型缺水主要集中在平安、乐都，西宁等地，到2030年各行政区(除湟源县)水质型缺水率均在0.6%以下。

在从严治污的原则下，随着截污减排措施的实施，2030年湟水干流水功能区纳污能力均满足纳污需求，水质监测断面均达到水质目标，水资源开发利用基本不受水质型缺水影响。由于当地水资源量的限制，尚有一定量的资源型缺水，建议扩大外调水规模。因此本研究确定的水量水质联合配置方案可行。

5 结论

本文运用文献[2]提出的水量水质联合配置理论方法,以青海省湟水干流为例进行了实例应用。(1)运用所构建的水量水质联合配置模型进行了基准年的供需平衡分析、耗水平衡分析和基于供需平衡分析的水质模拟,对当地资源型、工程型和水质型缺水进行了识别。湟水干流基准年资源型、工程型和水质型缺水并存。湟水中下游水质较差。全区基本未实现污染物总量控制。(2)构建了需水方案和工程方案,以需水中方案和工程方案3为推荐方案。以改进的三次平衡思想为指导,模拟计算在现有污染治理水平下,2030年污染物产生量和水功能区纳污量;分析了耗水平衡和水功能区纳污能力的变化趋势。随着社会经济耗水量的增加,河道径流量减少,水功能区纳污能力减小,并估算2030年各水功能区纳污能力。运用基于水功能区纳污能力的污染物总量分配优化模型进行了污染物总量分配。(3)本文拟定的水量水质联合配置方案河道内生态用水得到满足,地下水采补平衡,满足可持续发展要求。随着方案的实施,湟水污染物总量得到控制,各水功能区水质达标,水功能区纳污能力满足纳污需求,基本不受工程型和水质型缺水的影响。本研究确定的水量水质联合配置方案可行。

本研究尚存以下不足:(1)由于2030年地下水作为战略水源储备,未参加供需平衡分析,因此地表水、地下水相结合的水量水质联合配置研究不足。地表水、地下水水量水质模型耦合受时空尺度问题的限制,地表水模拟结果需要进行时空展布,地下水模拟结果需要时空聚合。(2)本文只是对污染源进行了评价,并用输出系数法进行了初步模拟。并未构建分布式水文水质模型进行面源污染模拟分析。因此面源污染模拟将是下一步工作的重点。(3)本次研究主要针对点源污染物进行截污减排。未来将在非点源污染研究基础上,进行点源和非点源污染相结合的污染物总量控制研究。(4)本研究区现状为非分质供水,基准年供需平衡分析是基于非分质供水进行供需平衡分析、水质模拟和缺水识别。对于实行分质供水的地区,则需直接把节点水质类型输入模型,进行分质供水供需平衡,后再进行水质模拟和缺水识别。本文方法在推广应用中还需根据当地情况而定。(5)由于废污水处理投资较大,很多地区不愿将处理好的废水回归河道而再次循环使用,易导致河道断流,北京地区已经出现类似情况。随着缺水加剧,这种现象将在很多地方出现。所以需研究基于污染物总量控制的补偿机制和标准研究,让经过处理的水回归河道,保证河道生态功能和下游供水安全。

参 考 文 献:

- [1] Wang Hao , Wang Chengming . Theory of annual runoff evolution under natural- artificial dual mode and case study of Wuding River basin on the middle Yellow River[J] . Science in China Ser . E Engineering & Materials Science 2004 , 47(Supp. 1) : 51-59 .
- [2] 张守平,魏传江,王浩,等.流域/区域水量水质联合配置研究 I :理论方法[J].水利学报,2014,45(7):757-766.
- [3] 魏传江,王浩.区域水资源配置系统网络图[J].水利学报,2007,38(9):1103-1108.
- [4] 魏传江,韩俊山,韩素华.流域/区域水资源全要素优化配置关键技术及示范[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [5] 崔巍,白音包力皋,陈文学,等.中小河流非点源污染治理负荷估算及分区分类研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2013,11(1):14-19.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T25173-2010 水域纳污能力计算规程[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2010.
- [7] 中国水利水电科学研究院.青海省引大济湟工程水资源配置方案修订报告[R].北京:中国水利水电科学研究院,2011.
- [8] 张守平.湟水干流水量水质联合配置研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2012.
- [9] 青海省环境监测中心站.湟水流域水污染防治规划[R].西宁:青海省环境监测中心站,2008.
- [10] 中国工程院 西北水资源 项目组.西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[J].中国工程科学,2003,5(4):1-26.

Basin/region water quality and quantity allocation II. Application

ZHANG Shou-ping^{1,2}, WEI Chuan-jiang^{1,2}, WANG Hao^{1,2},
HOU Li-na³, BI Yan-jie^{1,2}, ZHOU Xiang-nan^{1,2}

1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. Engineering and Technology Research Center for Water resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;
3. Changjiang Institute of Survey Planning Design and research, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to test the feasibility of basin/regional water quantity and quality of joint configuration theory, taking the main stream of Huangshui River for example, this study analyzes the supply-demand balance and water consumption balance, simulates the change of water quality and identifies the water shortage type, constructs the water demand scheme and engineering scheme, and puts forward the recommended scheme. Taking the improved three-time balance as the guidance, the quantity of pollutants received in water function area in 2030 were simulated under the current pollution control level, the trend of water environment capacity was analyzed and the controlling pollution amount was allocated. The results show that with the scheme implementation, the proportion of water ecology for each water resources district will be above 60% with only 0.4% of water shortage induced by water pollution; the quantity of COD and ammonia nitrogen will be 4,585.51t and 244.63 t into the main water functional areas in 2030 respectively, and the pollution amount will be controlled, meeting the water quality requirements for each water functional area. Basin/regional water quantity and quality joint configuration method is feasible.

Key words: water quality and quantity; water resource allocation; three-time balance; total amount control; main stream of Huangshui River

(责任编辑:韩 昆)

(上接第937页)

Dynamic numerical model for the prediction of water and sediment transport

LAI Rui-xun^{1,2}, FANG Hong-wei¹, XU Xing-ya¹, ZHANG Fang-xiu²

1. Department of Hydraulic Engineering and State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Traditional numerical models for water and sediment transport are solved on the basis of the principle of conservation law and the identification of parameters. In this paper, available observations of water level and sediment concentration are combined into the traditional numerical model to improve the accuracy of prediction. The traditional model is transformed into state-space equations, in which the variables including water level, discharge and sediment concentration are changed into input-output system. The optimal values of the variables are calculated using the Ensemble Kalman filter and then used to update the initial conditions in the next time step. In this way, the traditional numerical model develops into the dynamic model. The water and sediment regulation in 2011 was taken as a case to test the performance of the dynamic model. It finds out that the dynamic model can largely improve the accuracy of the predicted water level, discharge and sediment concentration.

Key words: numerical model; Ensemble Kalman filter; dynamic prediction; the lower Yellow River; regulation of water and sediment

(责任编辑:李福田)