中国科学: 技术科学 2011 年 第 41 卷 第 12 期: 1658 ~ 1667
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

面向流域系统的生态需水量整合研究

金鑫[①②], 严登华[②③*], 王浩[①②③], 张诚[②], 唐蕴[②], 杨贵羽[②], 王凌河[①②]

① 大连理工大学 水利工程学院, 大连 116024;
② 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038;
③ 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
* E-mail: denghuay@gmail.com

收稿日期: 2010-12-13; 接受日期: 2011-07-18
国家自然科学基金创新研究群体科学基金(批准号: 51021066)和国家重点基础研究发展计划("973"计划)(批准号:2010CB951102)资助项目

摘要 水库(群)的运行调度对坝址下游水文情势产生一定影响, 维及到下游河流廊道及与河道存在水力联系的生态系统生态用水安全. 为保障下游生态用水, 需对水库(群)进行生态调度; 而生态需水及其整合计算是其关键支撑. 生态需水整合的核心是在对各类生态需水进行评价的基础上, 以流域/区域水循环及其伴生水生态过程为主线, 将各类生态需水整合成满足水资源配置或调度要求的水量过程. 本文结合水库(群)生态调度实践需求, 以各类生态系统的生态需水规律及水力联系为基础, 整体提出流域生态需水的整合模式; 在分布式水文模拟技术的支撑下, 构建了生态需水整合模型; 并就南水北调西线一期工程雅砻江流域的生态需水及其整合计算进行了研究. 结果表明, 上述整合模式有效结合了各类生态系统生态需水在时空上的水力联系, 与基于集总式水平衡分析的生态需水整合模式相比, 克服了多时空尺度上生态需水水源及生态供水难以得到有效保障的不足, 可满足水库(群)生态调度的需求.

关键词
生态调度
生态需水
整合计算
分布式水文模拟
南水北调西线工程
雅砻江流域水源区

区域多时空尺度上生态需水的科学评价是面向生态的水资源配置及水库(群)生态调度的关键[1~4]. 因生态需水评价与水资源配置/调度在时空尺度上存在差异, 且各类生态系统的需水特征及评价方法不同, 需对区域生态需水进行整合计算, 以克服区域生态需水评价中各类生态系统需水间的重复计算及多时空尺度上生态供水难以得到保障的不足. 生态需水整合已成为水文水资源研究领域的前沿与热点.

当前区域生态需水主要采用三种模式进行整合: 一种是基于宏观水平衡分析的整合模式, 即以大尺度区域宏观水资源配置需求为目标, 对水文水资源单元内的各类生态需水进行汇总[5]; 第二种是基于水文特性差异的整合模式, 即根据水文特性将生态需水划分成不同的整合类型及单元, 如将区域内的生态需水整合成坡面生态需水(河道外生态需水)与河流生态流量(河道内生态需水)[6~8]; 第三种是基于水文过程的生态需水整合模式, 即以区域降水-产流与汇流过程为主线, 将区域生态需水分别整合成不同水资源配置/调度单元与节点上的需水与径流过程阈值[9, 10]. 相比之下, 第三种整合模式的水文机理更为明确, 可满足区域水资源配置与调度中对生态需水多时空尺度评价成果的要求, 但其研究尚处于起步

英文版发表信息: Jin X, Yan D H, Wang H, et al. Study on integrated calculation of ecological water demand for basin system. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 2638–2648, doi: 10.1007/s11431-011-4535-5

阶段, 现阶段主要是为满足水资源配置的需求.

本文结合水库(群)生态调度中对生态需水评价的实践需求, 构建了基于水循环过程的生态需水整合模式; 并以自主研发、适合中国国情的分布式水文模型(Water and Energy Transfer Process, WEP)为支撑, 开发生态需水整合计算模块. 在上述生态需水整合模式与模型的支撑下, 对南水北调西线一期工程雅砻江调水枢纽以下影响区域的生态需水进行了整合研究, 以期为西线工程水源综合生态调度提供理论与技术支持.

1 面向流域系统的生态需水整合内涵、特征及模式

1.1 生态需水整合的基本内涵

在一定时间及空间尺度上, 社会经济用水挤占生态用水, 导致生态退化, 危及到区域生态安全及和谐发展. 为此, 在区域水资源配置及调度中, 需要合理配置及调度生态用水, 以发挥区域水资源最大的经济社会与生态环境效益及效率. 区域水循环及伴生的水生态过程具有多向反馈作用, 并在“自然-人工”二元驱动下发生整体演化. 生态需水整合就是以水循环及伴生的水生态过程演化为主线, 紧密围绕水资源配置及调度的时空需求, 将不同地域单元上的各类生态需水整合到水资源配置/调度单元及节点上.

需要指出的是, 因各配置/调度单元及节点上的水循环过程存在水力联系, 生态需水的表征指标也不同, 难以通过直接加和计算的方式得到各区域生态需水的总量. 如坡面生态需水重点核算的是满足植被耗水需求及维持适宜生境条件所需的水量, 主要是评价“存量”形式的水需求; 而河流生态需水重点核算的是生态控制水位与流量, 主要是评价“通量”形式的水需求. 与此同时, 同一条河流各配置/调度节点间存在区间来水和水量损失, 需通过区间坡面及河道的汇流演算进行生态需水整合, 否则难以满足各河段及整条河流的生态需水要求.

1.2 生态需水整合特征与要求

水库(群)的运行调度将对坝址下游河段水文情势产生影响, 其影响程度随着下游区间来水的增加而逐渐降低; 水库(群)运行调度对下游生态与环境的影响也随着其对水文情势影响的变化而改变. 为保障下游区域整体及各河段的生态用水要求, 维持其生态与环境健康, 在水库(群)调度中需综合考虑防洪、生态、环境、兴利等要求, 进行生态调度或联合生态调度. 在当前的水库(群)生态调度中, 重点考虑的是下游近坝段的生态与环境需求[2], 尚需进一步考虑下游区域生态需水的整体要求[11].

在水资源配置中, 重点是对“存量”形式的生态需水进行整合计算, 配置节点的水需求主要是对节点上的径流总量进行控制, 且以历史序列典型年的月尺度水文过程为依据进行整合; 而在水资源调度中, 则需将“存量”形式的水需求整合成“通量”形式的水需求, 且以月及更小时间尺度上的实际水文过程及预测为依据进行整合. 为此,研究中需对小尺度流域或区域的生态水文耦合作用机理进行系统剖析.

1.3 面向流域系统的生态需水整合基本模式及关键支撑技术

面向流域系统的生态需水整合以流域或区域水循环及其伴生水生态过程为主线, 按照“总-分-总”的模式予以整合. 首先根据坝址下游区域总体生态功能区划及生态保护目标, 结合水循环空间分异特征、水资源调度节点及生态分区, 确立生态需水计算单元及生态目标, 系统识别各计算单元的生态水文作用机制, 并评价各单元各类型的生态需水. 通过坡面汇流与河道汇流追迹计算与迭代, 获得各调度节点上不同生态情境下的径流需求过程(图 1).

根据水文与生态空间分异特征, 可将流域或区域划分为坡面系统及河流廊道系统. 从坡面生态系统水源来看, 包括坡面径流补给及坡面-河道径流联合补给两类子系统. 其中坡面径流补给子系统的生态需水主要包括因坡面耗水导致的河段区间来水的损失量; 坡面-河道径流联合补给子系统的生态需水除上述损失量外, 还应包括河道径流对该子系统的补给量. 河流廊道系统主要包括河流水生生态系统、滨河带湿地生态系统及河口生态系统. 研究中, 需对上述各类子系统的生态需水进行满足生态调度时间尺度的逐一评价, 并结合水循环及水力联系, 将上述各子系统生态需水进一步整合到调度节点上.

具有物理机制的分布式水文模拟技术能够客观描述流域/区域上水循环的时空差异及多时空尺度上水循环过程间的联系与空间连续性特征, 可满足将各类子系统生态需水整合到调度节点上径流过程的

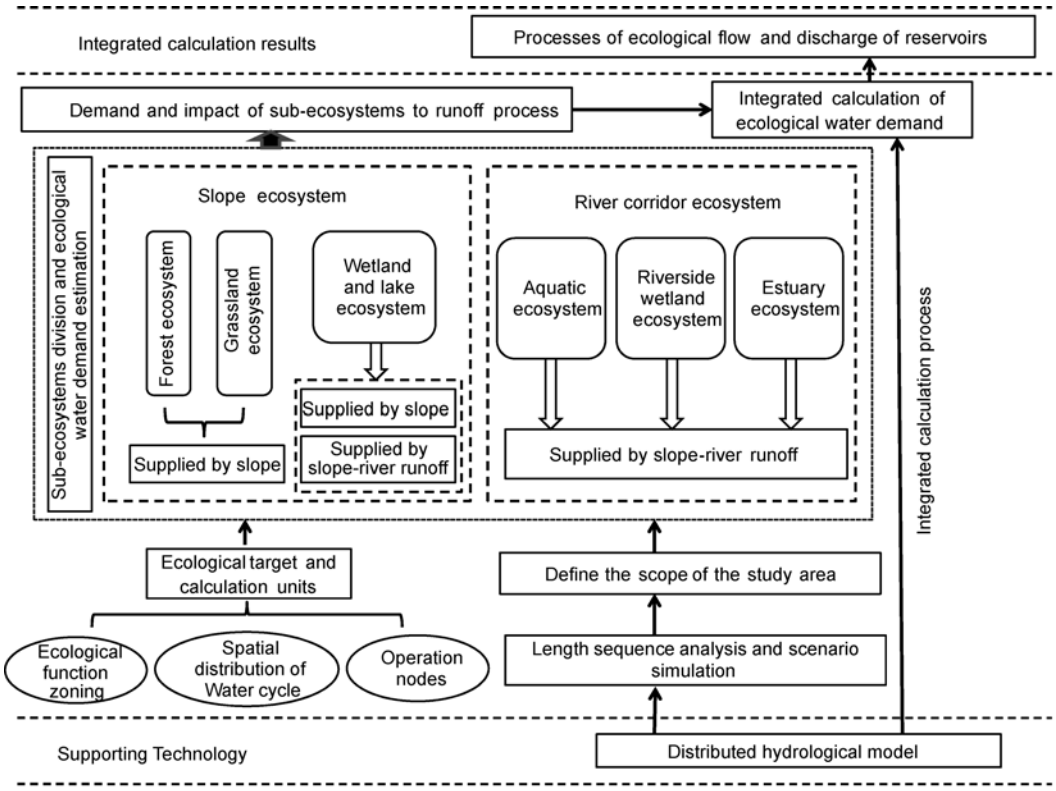


图 1　面向流域系统的生态需水整合计算基本模式

需求. 为此, 研究中采用分布式水文模型作为整合计算的技术支撑.

2　子系统生态需水评价

按照上述生态需水整合模式, 首先对流域/区域各子系统的生态需水进行评价.

2.1　坡面系统生态需水评价

坡面天然生态系统主要包括森林生态系统、草地生态系统、湖沼湿地生态系统三种类型. 森林生态系统和草地生态系统的生态需水主要是来源于降水及坡面径流; 而湖沼湿地生态系统按照生态需水补给源则可划分为坡面径流补给型及坡面-河道径流联合补给两种. 这两类补给型的湖沼湿地生态需水计算方法相似, 本文一并在下节进行论述.

此外, 坡面上还分布有人工生态系统, 主要包括城市生态系统、农田生态系统两类. 鉴于在水资源调度中, 这两类系统的需水属社会经济用水的调度对象, 在本文整合计算中,暂不考虑坡面人工生态系统需水过程.

坡面天然生态系统的生态需水主要由蒸发、蒸腾及渗漏三部分消耗型需水组成[9].

$$W_p^t = W_w^t + W_T^t + W_u^t,$$

式中 W_w^t, W_T^t, W_u^t 分别为时段 t 坡面天然生态系统蒸发、蒸腾及渗漏的耗水量. 公式中各参量可通过分布式水文模型获得, 并通过产汇流计算来评价其对河道径流过程的影响.

2.2　河流廊道系统生态需水评价

2.2.1　河流水生生态子系统

河流水生生态子系统的生态需水包括消耗型需水及非消耗型需水两部分. 其中, 消耗型需水是指河道内水面蒸发、植被蒸腾及河床渗漏所消耗掉的水量; 非消耗型需水是指河流为了实现并维持其物质输运、生物栖息及迁徙通道等生态功能所需的生态流量[9]. 为保障下游区域生态健康, 要求调度后的径流过程

在经过消耗型生态需水的消减后, 仍然能满足非消耗型生态流量的要求.

河流水生生态系统总的生态需水过程按下式计算:

$$W_r^t = W_{\mathrm{C}}^t + W_{\mathrm{NC}}^t = (W_w^t + W_T^t + W_u^t) + Q_t \Delta t,$$

式中 W_r^t 为时段 t 河流水生生态系统的生态需水总量, W_w^t,W_T^t,W_u^t 分别为时段 t 河道内水面蒸发、植物蒸腾及河床渗漏消耗的水量, Q_t 为时段 t 河道子系统所需的生态流量, Δt 为时间步长.

现阶段, 国内外关于河道生态流量计算方法的研究有很多, 且已形成多类算法[12, 13], 如水文学法(Tennant 法[14]、Texas 法[15]), 水力学法(湿周法[16]、R2-Cross 法[17]), 水文—生物分析法(Basque 法[18]), 生境模拟法(IFIM/PHABSIM 法[19]), 综合法(BBM 法[20])等. 计算中可根据河流生态特征及资料收集情况选用适宜的算法. 消耗型生态需水计算中各参量可通过分布式水文模型获得,

2.2.2　湖沼湿地及滨河带湿地子系统

湖沼湿地及滨河带湿地的生态耗水及环境耗水是湿地生态系统为了维持其结构和功能所必须消耗的水量. 目前大量湿地水面萎缩、水质恶化的原因之一就是忽视了这部分耗水与湿地来水之间的水量关系, 以致在来水量较小的时期或年份, 未能对湿地缺水进行及时补充[9]. 崔保山和杨志峰等人认为, 广义的湿地生态需水量是指维持湿地系统生态平衡和正常发展、保障湿地系统水文功能及相关环境功能正常发挥所需的水量; 狭义的湿地生态需水量是指在一定时空尺度下, 湿地用于生态消耗和环境消耗而需要补充的水量[21, 22]. 本文从工程角度出发, 取其狭义概念. 湿地生态需水过程按下式计算:

$$W_l^t = W_w^t + W_T^t + W_u^t,$$

式中 W_l^t 为时段 t 湿地子系统的生态需水总量, W_w^t, W_T^t, W_u^t 分别为时段 t 湿地蒸发、蒸腾及渗漏消耗的水量, 各类需水量计算方法已有研究[9].

水库(群)的运行调度将影响坝址下游河流水文情势, 从而危及坡面-河道径流联合补给型湖沼湿地及滨河带湿地的生态用水安全. 对于作为保护目标的湿地, 除天然补给外, 尚需以人工的方式引用河流水量以补充湿地耗水. 对河流流量总的需求为

$$\begin{aligned} Q_w^t &= Q_{\mathrm{N}}^t + \mathrm{Q}_{\mathrm{A}}^t = (W_l^t - W_s^t)/\Delta t \\ &= [(W_w^t + W_T^t + W_u^t) - (W_p^t + W_c^t)]/\Delta t, \end{aligned}$$

式中 Q_w^t 为时段 t 坡面-河道径流联合补给型湖沼湿地或滨河带湿地消耗的河流流量; W_l^t,W_s^t 为时段 t 湿地的生态需水总量及坡面产汇流的补给量. W_p^t,W_c^t 分别为时段 t 湿地子系统降水、汇水的补水量. 式中若 $W_l^t \leqslant W_s^t$, 则认为 Q_w^t=0.

2.2.3　河口子系统

河口子系统同时受到河流径流及海洋潮汐的双重影响, 水文情势极为复杂. 近海河段的河道流量不仅需要补充河口子系统的生态耗水, 还需维持一定的入海流量, 确保河口地区水文情势稳定、防止海水倒灌[23], 河口子系统需水过程按下式计算:

$$\begin{aligned} W_e^t &= W_{\mathrm{C}}^{\mathrm{t}} + W_{\mathrm{NC}}^{\mathrm{t}} \\ &= (W_w^t + W_T^t + W_u^t) + \max(Q_e, Q_s, Q_n) \times \Delta t, \end{aligned}$$

式中 W_e^t 为时段 t 河口子系统的生态需水总量, W_w^t,W_T^t,W_u^t 分别为时段 t 河口子系统蒸发、蒸腾及渗漏消耗的水量, Q_e, Q_s, Q_n 分别为时段 t 为了维持河口子系统生物栖息、盐分平衡、泥沙输运等所需的流量. 与河流水生生态系统相似, 整合计算要保证调度后的径流过程在经过消耗型生态需水的消减后, 仍然能满足非消耗型生态流量的要求.

3　生态需水整合方法

面向流域系统的生态需水整合包括不同类型生态需水整合及不同区域生态需水整合两部分内容.

3.1　不同类型生态需水整合

从类型上看, 研究区各系统的生态需水可分为消耗型需水和非消耗型需水两类, 不同类型生态需水整合旨在将不同系统的各类生态需水转化为对河流流量过程的需求或影响. 具体而言: 1) 河流水生生态子系统及河口子系统的消耗型生态需水将消减河道径流, 整合计算中需在相应河段扣除这部分消耗量; 2) 坡面-河道径流联合补给型的湖沼湿地及滨河带湿地的生态需水主要为消耗型需水, 为保证其生态健康, 需引用或消耗河道流量, 整合计算中需结合具体的生态保护目标和措施在相应河段扣除相应流量; 3) 坡面径流补给型的湖沼湿地及林地、草地等其他坡面生态系统的生态需水表现为截留降雨, 削减区间汇水量, 属消耗型需水, 在整合计算中通过分

布式水文模型计算其蒸发、蒸腾、渗漏, 并通过产汇流计算来分析其对河道流量的减水作用.

3.2 不同区域生态需水整合

不同区域生态需水整合以分布式水文模型的汇流模块为基础进行, 通过河道生态流量整合将研究区上下游贯通起来. 根据河流特征可分为单一河道生态流量整合及复杂河网生态流量整合两种情况(图 2).

单一河道生态流量整合如图 2(a)所示, 其中 R 为水库, A-A, B-B, C-C 为河道控制断面. 河流上下游各生态系统对水库泄水过程的要求表现在: 水库泄水过程不仅要满足坝址断面 A-A 处的生态需水要求, 还要保证经区间汇水及各类耗水消减后, 下游各控制断面 B-B, C-C 处的流量也能够满足该断面处的生态需水要求, 如不满足, 则需要适当提高水库泄水流量. 整合计算以分布式水文模型的河道汇流模块为基础, 并通过差值逆向传递循环算法实现河流上下游各控制断面之间的生态需水整合. 循环算法步骤如下:

① 河道汇流计算数据、参数传入;

② 汇流演算开始;

③ 判断汇流计算河段, 当计算河段包含坝址断面时, 令其流量为坝址断面处相应月份的生态流量值, 并以此计算下一段河道流量;

④ 判断汇流计算河段, 当计算河段包含河流生态需水控制断面时, 比较其汇流演算流量是否大于该断面当月的生态流量值, 若大于则通过, 继续进行下一河段汇流计算; 反之, 记流量修正值为

$$\Delta Q = \xi(Q_{\text{eco}} - Q_{\text{cal}}),$$

其中, $\zeta \in (0\sim1)$, 该参数反应河道汇流计算的非线性特征;

⑤ 返回步骤②重新进行汇流演算, 此次计算至坝址河段时, 需令其流量为坝址生态流量与流量修正值之和, 如此反复, 直到该断面汇流演算流量大于其生态流量值或两者相差不大时结束. 每进行这样一组循环则多整合一个断面;

⑥ 所有断面整合完成, 计算结束, 返回程序.

复杂河网情况如图 2(b)所示, 其中 $R_1, \cdots, R_3$ 为水库, A_1-A_1, A_2-A_2, $\cdots$, F_1-F_1 为河道控制断面. 与单一河流不同, 复杂河网生态流量整合中往往存在多个水库, 涉及数条干支流. 各水库的泄流过程不仅要能满足坝址断面及坝址所在河流各控制断面的生态需水要求, 还要能够满足干支流汇流后更高级河流的生态需水要求, 图 2(b)中, 水库 R_2, R_3 泄水要考虑 E_1-E_1 断面的生态需水要求; R_1, R_2, R_3 水库泄水要考虑 F_1-F_1 断面的生态需水要求.

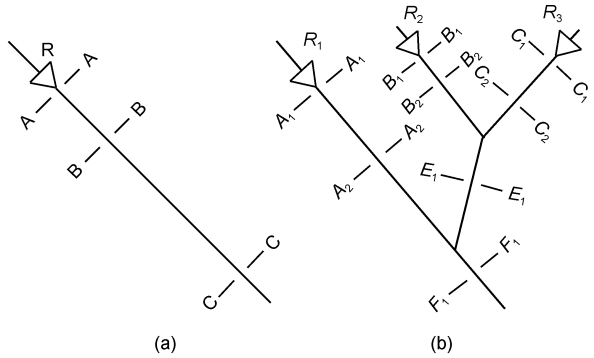


图 2 河道生态流量整合

复杂河网生态流量整合计算也基于前述差值逆向传递循环算法. 与单一河道生态流量整合相较, 复杂河网循环计算中存在的最大难点在于各水库坝址处生态流量修正值的分配. 如图 2(b), 若水库 R_1, R_2, R_3 的泄水流量经汇水汇流后, 未能满足断面 F_1-F_1 生态需水要求, 则需要适当提高各水库 R_1, R_2, R_3 的泄水量, 但可满足 F_1-F_1 断面生态需水要求的组合有无数种. 在本模型中, 此问题通过根据多年径流系列及供水要求预先设定分配比例.

4 应用实例

4.1 研究区概况

雅砻江流域地处青藏高原东南部, 位于金沙江及大渡河之间, 属高原气候区. 南水北调西线一期工程雅砻江流域调水枢纽分别位于干流甘孜段及支流鲜水河上游的达曲、泥曲(图3). 在热巴、阿安、仁达坝址处分别调水 42, 7, 7.5 亿立方米.

由于区间汇水的影响, 调水后下游水文情势的变化随距调水坝址距离的增加而递减. 在鲜水河与雅砻江干流交汇处下游约 3 km 处有正在修建的两河口水电站. 雅砻江调水后, 河道水文情势的变化在调水坝址处最大, 至两河口断面时已相对较小. 考虑到两河口水库的调节作用, 可以认为南水北调西线一期工程雅砻江调水不会对两河口水库以下地区的生态水文过程造成明显影响. 为此, 研究区的范围选为调水坝址至两河口之间的区域.

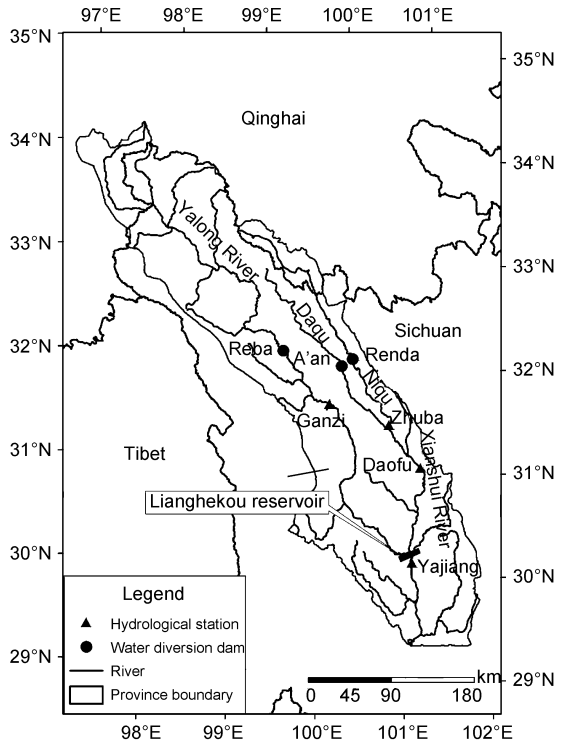


图 3　研究区位置图

南水北调西线一期工程运行实施后, 各调水枢纽下游河流径流过程消减, 对河流生态系统造成影响[24], 河流生态健康是调水工程下游影响区重要的生态保护目标之一. 雅砻江调水河流地区海拔约在 3500~4000 m 之间, 为高原区向高山峡谷区的过渡地带. 河流内主要鱼种为短须裂腹鱼[*Schizothorax wangchiachii*(Fang)]、裸腹叶须鱼(*Ptychobarbus kaznakovi* Nikolsky)、厚唇裸重唇鱼(*Gymnodiptychus pachycheilus* Herzenstein)及青石爬鮡[*Euchiloglanis davidi* (Sauvage)]等[25].

除河流生态系统外, 研究区部分湿地、自然保护区的生态水文过程也将受调水影响. 其中规模较大、且作为重点保护目标的有卡莎湖湿地等.

4.2　生态需水整合支撑技术

为科学评价各类生态系统需水要求; 充分考虑各子系统的水力联系, 避免生态需水的重复计算, 面向流域系统的生态需水整合以分布式水文模型为技术支撑, 本研究选用贾仰文教授等开发的 WEP 模型[26], 其主要计算模块的原理及功能见表 1.

4.3 子系统需水过程

根据前述生态需水分类、评价方法及区域生态需水整合模式, 结合调查资料, 对研究区生态需水计算单元进行划分, 并对研究区域内 10 个河流水生生态系统及滨河带湿地计算单元(河段)、76 个林地单元、54 个草地单元、22 个坡面湖沼湿地计算单元的生态需水过程进行评价, 结果如下.

4.3.1　坡面系统生态需水

研究区坡面系统生态需水包括林地生态需水、草地生态需水、湖沼湿地生态需水等. 考虑到坡面-河道径流联合补给型湖沼湿地的生态需水对河流径流过程有直接要求, 后面另有计算. 本节主要评价林地、草地及坡面径流补给型湖沼湿地等的生态需水过程. 通过分布式水文模型 WEP 进行长序列模拟, 并统计各生态需水计算单元的蒸发、蒸腾、渗漏过程, 从而得到坡面系统整体生态需水过程(表 2).

4.3.2　河流水生态系统需水

为合理评价河流水生生态系统的需水过程, 需对研究区河流进行分段, 并逐段计算生态需水. 河流分段主要考虑以下因素: ①河流物种(主要指鱼类)分布情况; ②河网汇流情况; ③河床地貌特征. 此外, 考虑到调水工程实施后下游近坝河段水文情势变化较大, 故各调水枢纽下游近坝段河道均作为单独河段计算生态需水过程(表 3).

表 1　WEP 模型主要计算模块原理及功能

Module	Function and theory
Sursoil	This module was used to simulate the vertical water-heat process, and the evapotranspiration and infiltration amounts were calculated in this module by Penman or Penman-Monteith formula and Green-Ampt model, respectively.
Overland	The concentration process of overland flow was simulated by the kinematic wave equation.
River	According to practical background, the kinematic wave equation or dynamical wave equation was adopted to simulate the flow concentration of river channels.
Gwater	The Bousinessq equation was used to describe the movement of ground water.
Snow	The snow and snowmelt process was simulated by the Degree-day Method.

表 2　坡面系统生态需水过程

Month	Ecological water demand (10^8 m^3)
Jan.	5.21
Feb.	5.96
Mar.	8.75
Apr.	9.78
May	10.80
Jun.	9.41
Jul.	9.87
Aug.	9.31
Sep.	7.73
Oct.	6.33
Nov.	5.21
Dec.	4.84
Annual	93.21

现阶段, 南水北调西线一期工程雅砻江流域河道生态流量的相关研究较多, 方法各异[25, 27~29]. 在本研究中, 由于涉及的河段及断面较多, 难以获得全部断面的水力学参数, 故研究中采用水文学 Tennant 法计算各河段生态流量过程. Tennant 法以河段控制断面多年平均流量百分比的形式计算河流生态流量, 计算标准如表 4 所示[9].

Tennent 法"中"标准推荐流量是维持雅砻江流域调水工程下游影响区河道生态系统不退化的最小生态需水量[30]. 研究中采用 Tennent 法"中"标准计算南水北调西线一期雅砻江流域各河段生态流量过程, 计算结果在表 5 中列出.

4.3.3　滨河带湿地生态需水

滨河带湿地生态需水包括蒸发、蒸腾、渗漏三项, 研究中采用前述滨河带湿地生态需水评价方法, 分别评价并统计 10 个滨河带湿地计算单元的生态需水过程, 从而得到滨河带湿地整体的生态需水过程(表 6).

4.3.4　坡面-河道径流联合补给型湖沼湿地生态需水

坡面-河道径流联合补给型湖沼湿地与河道之间存在复杂的水量交换关系. 雅砻江流域调水枢纽下游影响区内, 规模较大、作为重点保护目标的坡面-河道径流联合补给型湿地仅有卡莎湖. 卡莎湖位于四川省甘孜藏族自治州炉霍县朱倭乡境内, 所处地区海拔 3520 m, 湖泊形状为东西走向的长方形, 枯水期水面面积 109 hm^2, 丰水期水面面积 130 hm^2, 平水期水面面积 120 hm^2, 其东面有 18 hm^2 的草本沼泽, 湖水最深 17 m[31].

卡莎湖湿地生态需水由两部分组成, 一是卡莎湖的渗漏量; 二是净蒸发量. 鉴于卡莎湖所处地区人类活动的影响相对较少, 多年平均情况下地下水与地表水相互补给平衡, 因此计算中只考虑卡莎湖的净蒸发量.

平水年(P=50%)及偏枯水年(P=75%)卡莎湖湿地的降雨、蒸发资料采用炉霍气象站观测成果. 结合平、枯年份湿地的水面和沼泽面积大小, 可以得到不同水平年卡莎湖湿地净蒸发过程(表 7).

4.4　生态需水整合

根据本文第 3 节构建的生态需水整合方法, 在 WEP 模型河道汇流模块(RIVER)的基础上开发生态需水整合模块(ECOWATER)以实现各子系统生态需

表 3　研究区河流分段及控制断面选择

River	River section	Cross section	Geomorphological features
Yalong River	Reba Dam—the boundary of Dege and Ganzi counties	Reba Dam	The upper reaches of Yalong River is a mountain zone with V-shaped deep valleys and intensive and fast flow.
Yalong River	the boundary of Dege and Ganzi counties—Ganzi hydrological station	the boundary of Dege and Ganzi counties	
Yalong River	Ganzi hydrological station—Xinlong County	Ganzi hydrological station	The middle reaches of the river is a mass of canyons and steep slope. The shape of river is V-shaped and U-shaped.
Yalong River	Xinlong County—Lianghekou	Xinlong County	
Daqu	A'an Dam—the boundary of Ganzi and Luhuo counties	A'an Dam	hummocky plateau form with the deep valleys, floodplains and valleys
Daqu	the boundary of Ganzi and Luhuo counties—estuary of Daqu	the boundary of Ganzi and Luhuo counties	
Niqu	Renda Dam—the boundary of Ganzi and Luhuo counties	Renda Dam	The fractured rocks are distributed along the river with the fast water flow in the straight riverway.
Niqu	the boundary of Ganzi and Luhuo counties—estuary of Niqu	Zhuba hydrological station	
Xianshui River	the connection of Daqu and Niqu—Daofu hydrological station	the boundary of Daofu and Luhuo counties	Due to the shallow depths of valley, the hummocky undulating plateau and wide-shallow valley are formed in this region with rift basin and gully occasionally.

表 4　Tennent 法生态流量推荐标准

Proposed flow	Stage	Max	Optimal	Excellent	Very good	Good	General	Poor	Very poor
Percentages of average annual flow (%)	general period (Oct. to Mar. next year)	200	60–100	40	30	20	10	10	0–10
	spawning period (Apr. to Sept.)	200	60–100	60	50	40	30	10	0–10

表 5　雅砻江流域调水工程下游影响区各河段河道生态流量过程

River	River section	Cross section	Ecological flow ($m^3 s^{-1}$)	
			general period (Oct.–Mar.)	spawning period (Apr.–Sept.)
Yalong River	Reba Dam—the boundary of Dege and Ganzi counties	Reba Dam	19.3	57.8
Yalong River	the boundary of Dege and Ganzi counties-Ganzi hydrological station	the boundary of Dege and Ganzi counties	20.4	61.1
Yalong River	Ganzi hydrological station—Xinlong County	Ganzi hydrological station	27.3	81.8
Yalong River	Xinlong County—Lianghekou	Xinlong County	30.2	90.4
Daqu	A'an Dam—the boundary of Ganzi and Luhuo counties	A'an Dam	3.3	9.8
Daqu	the boundary of Ganzi and Luhuo counties—estuary of Daqu	the boundary of Ganzi and Luhuo counties	3.7	11.2
Niqu	Renda Dam—the boundary of Ganzi and Luhuo counties	Renda Dam	3.6	10.9
Niqu	the boundary of Ganzi and Luhuo counties—estuary of Niqu	Zhuba hydrological station	6.4	19.1
Xianshui River	the connection of Daqu and Niqu-Daofu hydrological station	the boundary of Daofu and Luhuo counties	12.3	36.8
Xianshui River	Daofu hydrological station—estuary of Xianshui River	Daofu hydrological station	14.4	43.2

表 6　滨河带湿地生态需水

Month	Ecological water demand (10^8 m^3)
Jan.	101.5
Feb.	118.1
Mar.	173.4
Apr.	193.7
May	212.2
Jun.	186.3
Jul.	193.7
Aug.	184.5
Sep.	153.1
Oct.	125.5
Nov.	101.5
Dec.	95.9
Annual	1839.5

水的整合. 整合计算模块(ECOWATER)的调用顺序在河道汇流模块(RIVER)之前, 计算结果作为河道汇流模块的边界条件.

结合雅砻江流域调水枢纽下游影响区域各生态系统需水计算结果, 以 WEP 模型为计算平台进行面向流域系统的生态需水整合. 为便于分析, 对各调水坝址及河流控制断面均作整合计算. 由于整合过程计入了区间来水的影响, 不同水平年的整合计算结果将有较大差异. 研究中对 1960~2000 年长系列水文过程进行模拟及生态需水整合计算, 并统计多年平均过程作为最终整合计算结果. 计算中卡莎湖生态需水过程采用平水年计算结果. 整合结果如下:

对比表 5 及表 8 可知, 整合计算后, 除各整合末断面(雅砻江干流新龙城区断面、支流鲜水河道孚水文站断面)外, 各控制断面的生态流量均比整合计算前有所增加, 但幅度各异. 对各调水坝址处的整合计算结果分析可知, 雅砻江干流热巴坝址整合前后河道生态流量变化明显, 且主要集中在 4~5 月; 在雅砻江支流鲜水河一支上, 达曲、泥曲各控制断面的生态流量过程在整合计算前后变幅较大. 这种现象在 4~5 月及 9 月尤为显著.

参照南水北调西线一期工程规划阶段初步成果, 对调水工程运行后, 雅砻江各调水枢纽多年平均泄水过程进行分析(图 4).

表 7　卡莎湖湿地生态需水过程

Typical year	Ecological water demand (10^4 m^3)												
	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Annual
Normal year (*P*=50%)	8.99	11.66	18.56	18.74	24.37	–3.76	–1.18	11.84	–0.69	11.79	9.81	8.30	118.43
Dry year (*P*=75%)	8.28	11.18	17.78	19.35	12.63	8.21	7.42	13.13	0.31	4.85	9.37	7.21	119.72

表 8　雅砻江流域调水工程下游影响区生态需水整合计算结果

River	Cross section	Ecological flow (m^3 s^{-1})											
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Yalong River	Reba Dam	20.07	22.05	21.85	65.07	66.33	62.05	63.23	62.94	65.85	22.2	19.3	19.3
Yalong River	the boundary of Dege and Ganzi counties	21.17	22.82	22.35	66.22	70.95	65.64	66.93	66.61	68.86	23.54	20.4	20.4
Yalong River	Ganzi hydrological station	28.11	28.29	28.21	83.7	84.13	82.84	83.32	83.35	83.65	28.14	27.3	27.96
Yalong River	Xinlong County	30.2	30.2	30.2	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	90.4	30.2	30.2	30.2
Daqu	A'an Dam	3.61	3.44	3.62	10.34	12.13	10.86	11.25	11.2	11.55	4.17	3.3	3.39
Daqu	the boundary of Ganzi and Luhuo counties	4.19	3.8	3.75	11.74	13.02	11.96	12.36	12.32	12.52	4.43	3.7	4.01
Niqu	Renda Dam	3.75	3.6	3.67	11.27	15.61	13.5	13.99	13.65	15.29	5.5	3.6	3.6
Niqu	Zhuba hydrological station	8.14	6.95	6.53	19.65	21.6	20.54	20.75	20.83	21.32	7.57	6.4	7.25
Xianshui River	the boundary of Daofu and Luhuo counties	12.58	12.3	12.3	36.8	39.76	38.76	38.87	39.25	39.33	13.57	12.3	12.54
Xianshui River	Daofu hydrological station	14.4	14.4	14.4	43.2	43.2	43.2	43.2	43.2	43.2	14.4	14.4	14.4

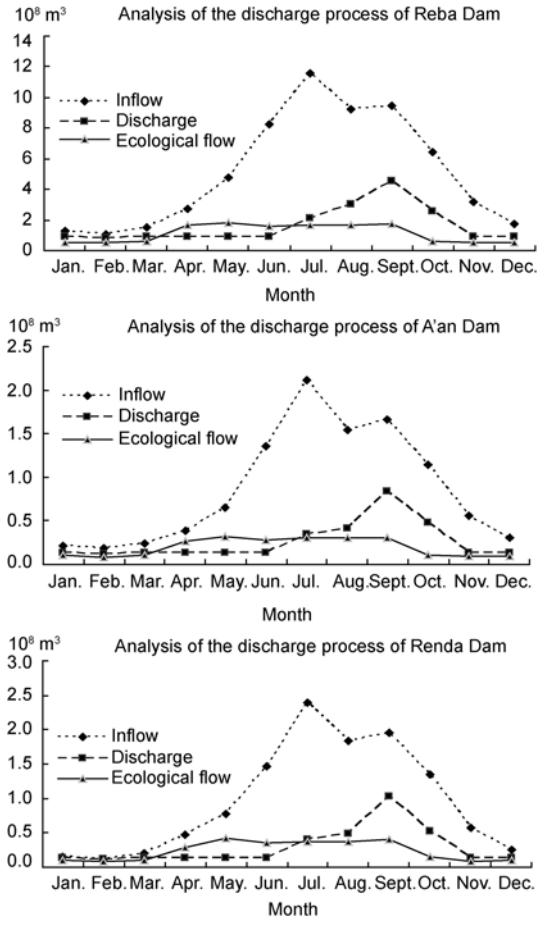


图 4　雅砻江流域调水坝址泄水过程分析

由图 4 分析可知: 从全年角度考虑, 各调水坝址泄水总量均能满足生态需水要求; 但从年内角度分析, 三个调水坝址的泄水过程均不能满足下游影响区域各生态系统的需水要求, 主要表现在 4~6 月下泄水量明显小于下游生态需水, 这是由于 4~6 月为鱼类产卵育幼期, 而这一时期区间汇水量相对较小, 需要调水坝址适当加大下泄水量以满足鱼类产卵所需的水位、流速.

5　结论

1) 本文从水库(群)生态调度实践需求出发,构建了面向流域系统的生态需水整合模式. 该模式以流域水循环及其伴生水生态过程为主线; 以各类生态系统的生态需水规律及水力联系为基础; 具有物理机制; 可满足生态调度中将各类子系统生态需水整合为调度节点上径流过程的需求.

2) 在上述理论、方法的支撑下, 本文以分布式水文模型 WEP 为技术支持, 开发了区域生态需水整合模块. 并以南水北调西线一期雅砻江流域调水枢纽下游影响区为例进行了实例分析. 应用结果表明: 整合计算前后各调水坝址处生态流量过程存在差异, 主要表现在产卵期的枯水月份整合后的流量过程要高于整合前. 依据整合计算后的生态需水过程进行水库(群)生态调度, 可保障下游区域整体的生态用水

要求.

3) 在复杂河网生态流量整合计算中, 本文根据历史径流系列及区间供水需求预设比例来分配各坝址生态流量修正值, 是一种静态的方法. 进一步的研究方向是根据各水库承担的任务, 结合水库群优化调度理论构建动态的分配模型.

参考文献

1 郑红星, 刘昌明, 丰华丽. 生态需水的理论内涵探讨. 水科学进展, 2004, 15(5): 626–633
2 康玲, 黄云燕, 杨正祥, 等. 水库生态调度模型及其应用. 水利学报, 2010, 41(2): 134–141
3 杨志峰, 崔保山, 刘静玲. 生态环境需水量评估方法与例证. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(11): 1072–1082
4 严登华, 王浩, 王芳, 等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探. 水利学报, 2007, 38(3): 267–273
5 Dong X, Du P F, Tong Q Y, et al. Ecological water requirement estimates for typical areas in the Huaihe Basin. Tsinghua Sci Technol, 2008, 13(2): 243–248
6 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 东辽河流域河流系统生态需水研究. 水土保持学报, 2001, 15(1): 46–49
7 倪晋仁, 金玲, 赵业安, 等. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究. 水利学报, 2002, (10): 1–7
8 王根绪, 张钰, 刘桂民, 等. 干旱内陆流域河道外生态需水量评价——以黑河流域为例. 生态学报, 2005, 25(10): 2467–2476
9 杨志峰, 刘静玲, 孙涛, 等. 流域生态需水规律. 北京: 科学出版社, 2006
10 Zhang Y, Yang Z F, Wang X Q, et al. Methodology to determine regional water demand for instream flow and its application in the Yellow River Basin. J Environ Sci, 2006, 18(5): 1031–1039
11 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究. 水科学进展, 2008, 19(3): 325–332
12 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较. 水动力学研究与进展(A 辑), 2003, 18(3): 294–301
13 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述. 水科学进展, 2006, 17(3) : 430–434
14 Tennant D L. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries, 1976, 1(4): 6–10
15 Mathews R C, Bao Y X. The Texas method of preliminary instream flow determination. Rivers, 1991, 2(4): 295–310
16 Gippel C J, Stewardson M J. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. Regul River, 1998, 14: 53–67
17 Mosley M P. Analysis of the effect of changing discharge on channel morphology and instream uses in a braided river, Ohau River, New Zealand. Water Resour Res, 1982, 18(4): 800–812
18 Docampo L, De Bikuna B G. The Basque method for determining instream flows in Northern Spain. Rivers, 1993, 4(4): 292–311
19 Stalnaker C B, Lamb B L, Henriksen J, et al. The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM. Washington, DC: U. S. Department of the Interior, National Biological Service, 1995
20 Hughes D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers. J Hydrol, 2001, 241(1-2): 140–151
21 崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. 环境科学学报, 2002, 22(2): 219–224
22 杨薇, 杨志峰, 孙涛. 湿地生态需水量与配水研究进展. 湿地科学, 2008, 6(4): 531–535
23 孙涛, 徐静, 刘方方, 等. 河口生态需水研究进展. 水科学进展, 2010, 21(2): 282–288
24 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 西线调水工程对水量调出区的环境影响分析. 地理科学进展, 2001, 20(2): 153–160
25 吴春华, 轩晓博, 刘达通. 调水工程河道内生态需水量研究及实例分析. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5/6): 524–530
26 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式水文流域模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2005
27 万东辉, 夏军, 宋献方, 等. 基于水文循环分析的雅砻江流域生态需水量计算. 水利学报, 2008, 39(8): 994–1000.
28 刘苏峡, 莫兴国, 夏军, 等. 用斜率和曲率湿周法推求河道最小生态需水量的比较. 地理学报, 2006, 61(3): 273–281
29 Men B H, Liu C M. Ecological hydraulic radius model to calculate instream flow requirements for transporting sediment in the western water transfer region. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(11): 3401–3405
30 门宝辉, 刘昌明. Tennant 法计算标准的修正及其应用. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(3): 479–482
31 江华明, 隆廷伦. 卡莎湖湿地鸟类群落组成及多样性分析. 西华师范大学学报(自然科学版), 2004, 25(1): 78–81