

文章编号:0559-9350(2019)03-0377-11

基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置研究

李丽琴^{1,2}, 王志璋³, 贺华翔^{1,4}, 马真臻¹, 谢新民¹, 魏传江¹

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 2. 北京市水科学技术研究院 水资源研究所, 北京 100044;

3. 中国水利水电科学研究院 信息中心, 北京 100038;

4. 清华大学 水利水电工程系 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对内陆干旱区城市发展和生态环境保护的强烈互斥性, 在整体识别内陆干旱区水循环与生态演变耦合作用机理上, 构建基于生态水文阈值调控的水资源多维均衡配置模型。模型分3个层次: 以流域为单元的水资源系统耗水总量和地下水采补平衡; 以行政区为单元的经济社会系统水量平衡和水土平衡; 以河道关键控制断面和灌区为单元的生态环境系统水生态平衡和水盐平衡, 并给出相应的多重循环迭代算法。将该模型方法应用于我国内陆干旱区——塔里木河流域, 结果显示: 在平枯水平年通过累计新增节水灌溉面积85.1万hm², 累计退减基本农田外灌溉面积41.5万hm², 累计退减国民经济用水量75亿m³, 可实现该地区水资源-经济社会-生态环境复合系统的有序良性演化和高效均衡发展, 验证了该方法的可行性。

关键词: 生态系统; 水循环; 生态水文调控指标; 水资源多维均衡配置; 塔里木河流域

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180855

1 研究背景

我国内陆干旱区地处E73°39′~E106°35′, N34°18′~N47°19′之间, 主要分布在新疆、甘肃、宁夏、青海和内蒙等省区, 总面积为336.23万km^{2[1-2]}, 约占全国土地面积的1/3, 而地表水资源和地下水资源分别仅占全国的3.3%和5.5%, 10%的绿洲资源养育了85%的人口和93%的GDP产出。从水资源系统特征分析, 该区域主要分布在降雨线400 mm以下的干旱和半干旱区, 干旱少雨, 水资源紧缺; 从经济社会系统特征分析, 该区域是我国的农业主产区之一, 农业灌溉对水具有高度依赖性, 同时该区域石油矿产资源相对较为丰富, 对水具有强烈需求性; 但从生态环境系统分析: 该区域生态环境本底脆弱, 生物多样性相对较低, 这种典型的特征使得内陆干旱区的城市发展和生态环境保护具有强烈的互斥性^[3-4]。从现阶段内陆干旱区水土资源开发失衡、水盐关系失调、生态环境退化、水资源供需矛盾突出等一系列水问题可以看出, 内陆干旱区的水资源-经济社会-生态环境系统发展演化处于无序和失衡状态。随着国家西部大开发战略和“一带一路”战略的实施, 如何保障内陆干旱区水资源安全是当前的热点之一^[5]。因此, 将水资源-经济社会-生态环境复合系统作为整体进行多维均衡配置是解决这些问题的关键所在。

目前, 关于内陆干旱区水资源配置主要是针对水资源开发利用中存在的水生态问题展开, 水资源配置从水量分配逐渐发展到协调考虑经济、环境和生态各方面需求的流域水量综合调控, 随着生态演变作用机理研究的深入, 关于内陆干旱区的水资源配置研究也随之多样化, 重点是优化算法的修正和生态需水的计算^[6-11], 以往研究多局限于某个侧面或某个环节而基于生态水文过程调控的全过程和全链条水资源多维均衡配置系统研究却相对较少。因此, 本文在整体识别内陆干旱区水资源-经

收稿日期: 2018-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0404306); 贵州省科技计划课题(黔科合重大专项字([2012]6013-5))

作者简介: 李丽琴(1988-), 博士, 主要从事水资源规划、配置和管理研究。E-mail: liliqin_cool@126.com

通讯作者: 王志璋(1974-), 高级工程师, 从事水资源配置、调度与水利信息化研究。E-mail: wangzz@iwhr.com

济社会-生态环境系统耦合作用机理上, 量化生态水文关键调控指标, 以水资源-经济社会-生态环境复合系统的均衡发展为目标, 构建基于生态水文阈值调控的水资源多维均衡配置模型, 通过多循环迭代技术, 水资源配置结果将不断被优化, 直到生态水文指标达到阈值要求。

2 水资源-经济社会-生态环境系统耦合作用机理

基于内陆干旱区“自然-社会”二元水循环特征及其伴生的生态系统演变规律^[12], 研究和解析内陆干旱区二元水循环与生态系统演变耦合作用机理, 并构建二者之间量化响应关系。具体研究框架见图 1。

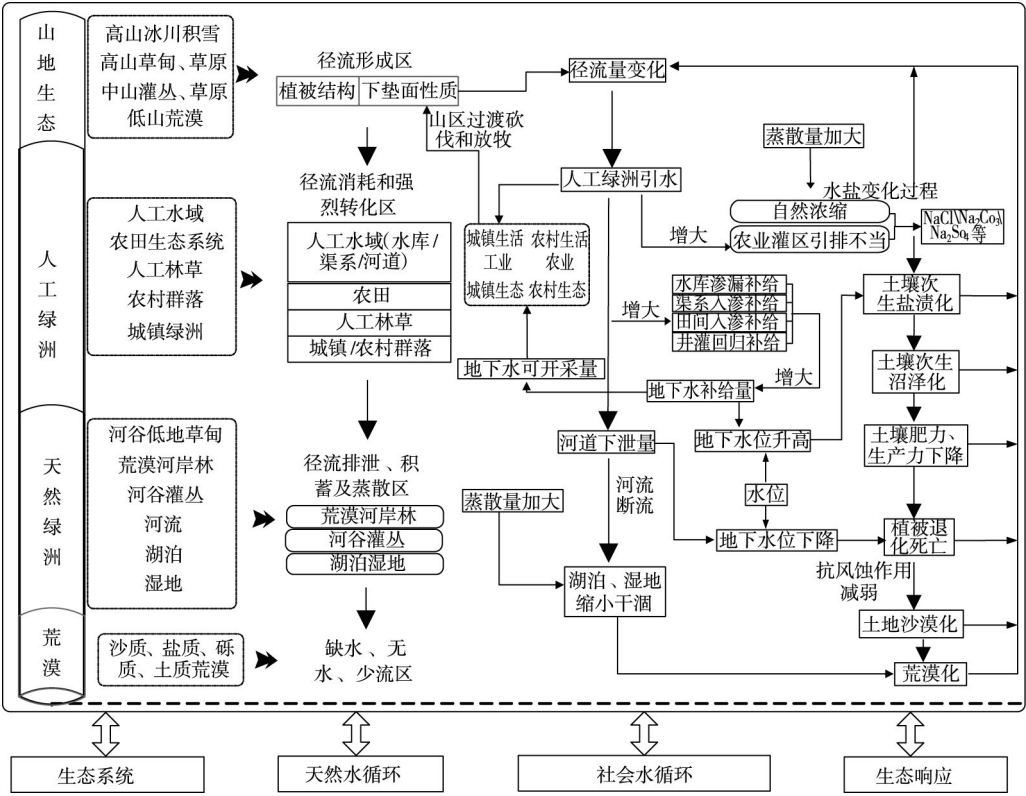


图 1 二元水循环与生态系统演变耦合作用机理研究框架

2.1 水循环与生态系统演变耦合作用机理 内陆干旱区水资源系统独特, 山区降水集流、绿洲集约转化、荒漠耗散消失的二元水循环过程, 形成了高山冰川—山地涵养林—平原绿洲—河流尾间湖泊构成的内陆水文系统和相伴而生的生态系统^[13-14]。在人类活动影响和强扰动作用下, 内陆干旱区二元水循环过程和结构、通量发生了深刻变化, 社会水循环强烈改变了平原盆地水循环过程和分配机制, 使人工绿洲取用耗水通量大大增加, 导致天然绿洲萎缩和荒漠面积扩大及其蒸发通量大幅减少, 这种改变使中游水分垂向循环加强, 蒸发和下渗通量加大甚至引发土壤次生盐渍化^[15]; 而下游水平方向径流通量减少, 天然绿洲、绿洲—荒漠过渡带生态水量大幅减少, 造成随上游人工绿洲对水资源开发、利用和消耗程度的不断提高, 下游河道断流、湖泊萎缩、湿地消失、天然绿洲萎缩、绿洲—荒漠过渡带退化、尾间湖泊干涸或永久消失^[16]; 反过来, 这种生态系统演变格局又维系着与其息息相关的二元水循环过程, 二者之间既相互依存又相互制约、相互影响, 构成了内陆干旱区独特的二元水循环与生态系统演变耦合作用机理。

我国内陆干旱区, 尤其是塔里木河流域、吐鲁番盆地和黑河流域, 过去因大规模开荒和扩大灌溉面积, 社会水循环通量无节制增大、自然水循环通量急剧衰减, 这种此消彼长和不健康、不健全

的二元水循环导致其伴生的生态系统演变格局发生根本性改变, 人工绿洲盲目扩大、天然绿洲严重萎缩和土壤盐渍化、河道断流、湖泊萎缩、荒漠化加剧等生态系统演变严重失衡现象, 造成了严重的生态灾难和大量生态移民。当前, 迫切需要透过现象, 重新认识和抓住问题本质, 研究和构建二元水循环与生态系统演变之间的量化响应关系, 为调整和优化水资源配置格局并解决生态系统演变失衡问题提供理论依据。

2.2 水循环与生态系统演变响应关系 基于内陆干旱区二元水循环独特性及其伴生的生态系统演变过程, 依据二元水循环与生态系统演变耦合作用机理, 以历史观测资料和试验数据为基础, 分析水循环对生态系统演变的驱动作用; 并结合野外调查和勘探结果, 分析和建立内陆干旱区二元水循环与生态系统演变之间的量化响应关系, 为进一步确定和明晰内陆干旱区生态水文调控指标及其阈值奠定基础。

(1) 河流及尾间湖泊下泄来水量多寡对其沿岸区域地下水位变化过程影响密切, 二者之间存在显著的响应关系。如塔里木河流域河道下泄水量(Q)与横向上地下水位响应范围(X)两者存在显著二次函数关系, 随着河流下泄水量减少和尾间湖泊来水量衰减甚至断流干涸, 其沿岸区域地下水侧向补给量急剧减少、远离河道及尾间湖泊区域地下水位抬升幅度逐渐减弱或呈现出地下水位持续下降的态势^[17-20]。

(2) 地下水位与人工绿洲、天然绿洲、绿洲-荒漠过渡带天然植被分布、组成和长势息息相关, 存在明显的响应关系^[21-28]。若地下水位 h 小于产生土壤盐渍化或沼泽化临界水位 $H_{\min}$, 则因潜水蒸发强烈、土壤积盐增强, 就会发生盐渍化或沼泽化, 不利于天然植被生长; 若地下水位 h 大于潜水蒸发或植被自然死亡临界水位 $H_{\max}$, 则潜水蒸发停止或毛细管水不能达到植被根系层去补给天然植被生长需求, 引起植被衰败。因此, 如何合理调控地下水生态水位阈值: $H_{\min} \leq h \leq H_{\max}$, 对内陆干旱区生态环境保护至关重要; 人工灌区地下水生态水位阈值一般为 1.0 和 2.8 m^[29], 塔里木河流域地下水位与胡杨枝径生长量相关性分析显示, 胡杨枝径生长量(Y)与地下水潜水埋深(X)两者存在显著负相关关系: $Y = 0.003X^4 - 0.078X^3 + 0.688X^2 - 2.854X + 6.695$, $R^2 = 0.868$, 对函数求二阶导数可得到胡杨枝径生长量变化率与地下水埋深的关系, 当地下水位埋深在 0.5 ~ 4.5 m 时, 胡杨枝径生长量呈现递增趋势, 地下水位埋深在 4.5 ~ 8.5 m 时, 胡杨枝径生长量呈现增长缓慢, 地下水位埋深在 8.5 m 时, 胡杨枝径停止生长。因此, 塔里木河流域胡杨林地下水生态水位阈值定为 0.5 和 8.5 m。

(3) 在河道来水量一定的情况下, 输水时间的不同对天然绿洲、绿洲-荒漠过渡带天然植被的生长有显著影响关系。当输水时间与植被种子成熟、萌发期相一致时, 输水的生态效应达到最大^[30], 以塔里木河流域为例, 胡杨林一般成熟、萌发期为 8—9 月份。

(4) 灌区积盐状态向脱盐状态的转变取决于临界排灌比的选取, 以塔里木河流域渭干河灌区为例, 灌区排灌比(X)与累积储盐量(Y)呈二次函数相关关系: $Y = 0.78X^2 - 36.07X + 263.53$, $R = 0.96$, 排灌比是一个动态变量, 临界排灌比的选取与耕地的初始含盐量等诸多因素相关, 其中长期排灌且盐渍化相对较低的灌区排灌比在 5% ~ 10% 之间, 由荒漠生态系统新开垦的灌区由于历史残留盐分过多, 要适当加大灌排力度, 一般为 15% ~ 30% 之间^[31-34]。

(5) 渠井灌溉适宜用水比及节水灌溉方式等对人工绿洲生态系统演变至关重要。在农田灌溉需水量一定的情况下, 渠井灌溉用水比例越高, 地下水埋深减小越明显, 基于地下水埋深变化最小的原则, 确定适宜的渠井灌溉用水比例, 平水年($P=50\%$)为 2.9 左右, 枯水年($P=75\%$)为 3.1 左右^[35-36]; 节水灌溉通过减少渠系和田间的渗漏损失, 而降低因地下水位上升而引起的次生盐渍化风险; 但是从生态良性循环角度, 节水灌溉是存在上限的, 内陆干旱区渠系利用率的节水上限应为 0.5 ~ 0.6。因此, 节水灌溉与防治土壤盐渍化的产生重点是在田间节水灌溉工程中, 适宜节水灌溉可减少土壤耕作层的淋洗周期。

3 基于生态水文阈值调控的水资源多维均衡配置模型

基于生态水文阈值调控的水资源多维均衡配置模型^[37], 是基于流域/区域/计算单元的“自然-社会”二元水循环过程调控, 涉及水资源、社会、经济、生态和环境等多目标的决策问题, 将水资源系统、经济社会系统和生态环境系统作为有机整体, 以水资源-经济社会-生态环境复合系统的有序良性演化为总目标, 以优化配置模块为核心, 以生态水文调控指标为抓手, 以多重循环耦合迭代技术为手段, 最终实现水资源-经济社会-生态环境复合系统的均衡有序发展。

3.1 优化配置模块 水资源优化配置模块主要由数据输入、模型参数、目标函数、平衡方程、约束条件和结果输出等部分组成, 利用世界银行和美国 GAMS 公司研制的通用数学模型系统对该模型进行求解计算。其中, 目标函数主要包含社会系统目标、经济系统目标和生态环境系统目标三类目标函数; 平衡方程和约束条件主要包含计算单元、水库、节点、外调水工程等水量平衡方程, 水库、渠道、污水回用、地下水、当地未控径流、湖泊、湿地、河道、农业“宽浅式破坏”等的约束条件。

(1) 社会系统目标。实现水资源在不同行业及不同地区间的供水公平, 是水资源配置社会子系统的最终目标。因此, 运用供水基尼系数概念^[38-39], 通过优化有限水资源在不同行业 and 不同流域间的分配方式, 以最小化供水基尼系数实现社会系统的均衡调控。

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \text{MIN} \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{k'=2, k'>k}^K \left(\frac{\alpha^k W_{ijt}^k / D_{ijt}^k - \alpha^{k'} W_{ijt}^{k'} / D_{ijt}^{k'}}{T \cdot K \cdot M_{ijt}} \right) \right\} \\
 F_2 &= \text{MIN} \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{j'=2, j'>j}^J \left(\frac{W_{it}^j / D_{it}^j - W_{it}^{j'} / D_{it}^{j'}}{T \cdot J \cdot M_{it}} \right) \right\} \\
 M_{ijt} &= \sum_{k=1}^K \frac{\alpha^k W_{ijt}^k}{D_{ijt}^k}; \quad M_{it} = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \frac{W_{ikt}^j}{D_{ikt}^j}; \quad W_{it}^j = \sum_{k=1}^K W_{ikt}^j; \quad D_{it}^j = \sum_{k=1}^K D_{ikt}^j
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: F_1 、 F_2 分别为行业供水基尼系数和行政分区供水基尼系数, 其值越小, 表明水资源配置在各行业和各行政分区间的公平性越好; W_{ijt}^k 、 D_{ijt}^k 分别为 t 时段第 i 个子流域 j 行政分区内 k 行业的供水量和需水量; k 、 k' 分别为第 k 、 k' 行业, 包含城镇生活、农村生活、工业、农业、城镇生态、农村生态; K 为行业个数; α^k 为第 k 个行业的供水优先序参数; $W_{ijt}^{k'}$ 、 $D_{ijt}^{k'}$ 、 $\alpha^{k'}$ 涵义依此类推; M_{ijt} 为 t 时段第 i 个子流域 j 行政分区全部行业供水量与需水量比值之总和; M_{it} 为 t 时段第 i 个子流域全部行政分区供水量与需水量比值之和; W_{it}^j 为 t 时段第 i 个子流域部行政分区 j 总供水量; D_{it}^j 为 t 时段第 i 个子流域部行政分区 j 总需水量。

(2) 经济系统目标。水资源配置经济子系统的主要功能是尽量满足河道外需水要求, 因此, 选用供水量最大化, 实现对经济子系统的均衡调控。

$$\begin{aligned}
 F_3 &= \text{MAX} \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_{\text{sur}} (XCSC_{ijt} + XCSI_{ijt} + XCSE_{ijt} + XCSA_{ijt} + XCSR_{ijt} + XCSV_{ijt}) + \right. \\
 &\quad \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_{\text{div}} (XCDC_{ijt} + XC DI_{ijt} + XCDE_{ijt} + XCDA_{ijt} + XC DR_{ijt} + XC DV_{ijt}) + \\
 &\quad \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_{\text{grd}} (XZGC_{ijt} + XZGI_{ijt} + XZGE_{ijt} + XZGA_{ijt} + XZGR_{ijt} + XZGV_{ijt}) + \\
 &\quad \left. \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_{\text{rec}} (XZTI_{ijt} + XZTE_{ijt} + XZTA_{ijt} + XZTV_{ijt}) \right)
 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: F_3 为流域供水总量, 其值越大, 表明流域水资源优化配置的经济效益越好; α_{sur} 、 α_{div} 、 α_{grd} 、 α_{rec} 分别为地表水、外调水、地下水及再生水的供水权重系数; $XCSC_{ijt}$ 、 $XCSI_{ijt}$ 、 $XCSE_{ijt}$ 、 $XCSA_{ijt}$ 、 $XCSR_{ijt}$ 、 $XCSV_{ijt}$ 分别为第 t 个时段第 i 个子流域内第 j 个行政单元地表水供城镇生活、工

业、城镇生态、农业、农村生活和农村生态供水量。外调水、地下水及再生水对各用水户供水依此类推；再生水仅对工业、城镇生态农业及农村生态供水； T 为总的计算时段，以月为单位； I 为子流域个数； J 为行政分区个数。

(3)生态环境系统目标。西北内陆区河流尾间河岸林荒漠化严重，基于2.2节水循环与生态系统演变的耦合量化响应关系，保证流域重要控制断面最小下泄水量是实现内陆干旱区生态环境系统良性循环的关键措施。因此，选用最大化断面最小生态环境水量满足程度实现对生态环境子系统的均衡调控。

$$F_4 = \text{MAX} \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \left\{ \alpha_t \frac{W_{lt}^e}{D_{lt}^e} \right\} \quad (3)$$

式中： F_4 为河道生态环境满足度系数，其值越大，表明河道内生态环境需水满足程度越高； W_{lt}^e 、 D_{lt}^e 分别为第 t 时段第 l 个河道断面的河道生态环境下泄量和河道生态环境需水量； α_t 代表第 t 时段河段下泄量敏感系数，基于生态水文调控指标阈值中输水时间与植被种子成熟、萌发期相关性设置敏感参数。

(4)综合目标。水资源优化配置作为多目标优化问题，求解过程中通常采用权重赋值将多目标问题从形式上转化为单一目标问题。全面考虑其水资源及生态环境承载能力，对不同子系统的供水效益目标赋予合理的权重系数，使其水资源配置的综合目标达到最优。

$$Z = \lambda_1 F_1 - \lambda_2 F_2 - \lambda_3 F_3 + \lambda F_4 \quad (4)$$

其中， λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为社会系统、经济系统和生态环境系统的权重参数。

3.2 生态水文调控指标及阈值 通过识别内陆干旱区“自然-社会”二元水循环与生态系统之间的量化响应关系，根据二元水循环及其伴生的生态系统演变格局，尤其是生态失衡问题，定量刻画面向内陆干旱区生态保护的生态水文调控指标及其临界阈值，为水资源多维均衡配置提供依据。具体指标的选取主要依据2.2节确定，其中关键控制断面生态水文调控指标及其阈值主要选取河流关键控制断面下泄流量/水量和时间，其临界阈值，需要根据长系列观测资料 and 具体保护目标等通过综合分析后确定；关键控制区域生态水文调控指标及其阈值主要包括：(1)地下水生态水位；(2)灌区临界排灌比；(3)渠井灌溉用水比例。

3.3 多重循环迭代算法 在水资源配置模块牵引下，通过目标函数引导及约束条件所限定的可行域内，基于生态水文阈值调控指标逐次迭代寻优计算，实现不同时空尺度、不同水源、不同行业等多维度水资源系统-经济社会系统-生态环境系统的“六大平衡”均衡发展。具体计算流程如下(图2)：

(1)第一步(S1)：初始参数数据输入，输入流域分区模型关键参数、行政分区模型关键参数、计算分区模型关键参数(地下水初始可开采量 W_0 ，并置 $j=0$)，通过流域层面-行政区层面-计算单元层面逐次协调迭代运算，确定第 j 次水资源配置结果；

(2)第二步(S2)：以流域分区为单元的水资源系统迭代计算，寻求流域层面耗水总量和地下水采补是否平衡；S21：判断是否满足流域层面耗水平衡要求(根据流域出境水量判断流域间(上、中、下游)水量分配方案是否合理，是否满足维持下游经济社会和生态环境用水要求)，若不满足则采取调整措施(如增大外调水、非常规水源供水量等)后，转向S1重新输入复合系统关键控制参量，并置 $j=j+1$ ；若满足则转入S22：判断流域地下水是否满足采补平衡要求，将各水源供水、各行业用水等相关量输入地下水均衡模型，得出地下水可开采量 W_j (j 为迭代次数， $j=1, 2, \dots, n$)，判断是否满足流域地下水采补平衡要求，若满足则转入S3；若不满足则采取调整措施(调整灌区渠井灌溉用水比例等)后转入S1重新输入复合系统关键控制参量，并置 $j=j+1$ ，重复前一次迭代过程，直至满足条件；

(3)第三步(S3)：以行政分区为单元的经济社会系统迭代计算，寻求行政区层面水量和水土是否平衡；S31：判断是否满足行政区层面水量平衡要求(是否满足用水总量、供需、国民经济耗水要求)，若不满足则采取调整措施(调整各行业发展规模、种植结构、灌溉面积或节水水平等或约定允许破坏深度)后，转入S1重新输入复合系统关键控制参量，并置 $j=j+1$ ；若满足则转入S32：判断是否满足水土平衡要求(水土平衡基尼系数^[40]是否在阈值范围内)，若满足则转入S4；若不满足则采取调整

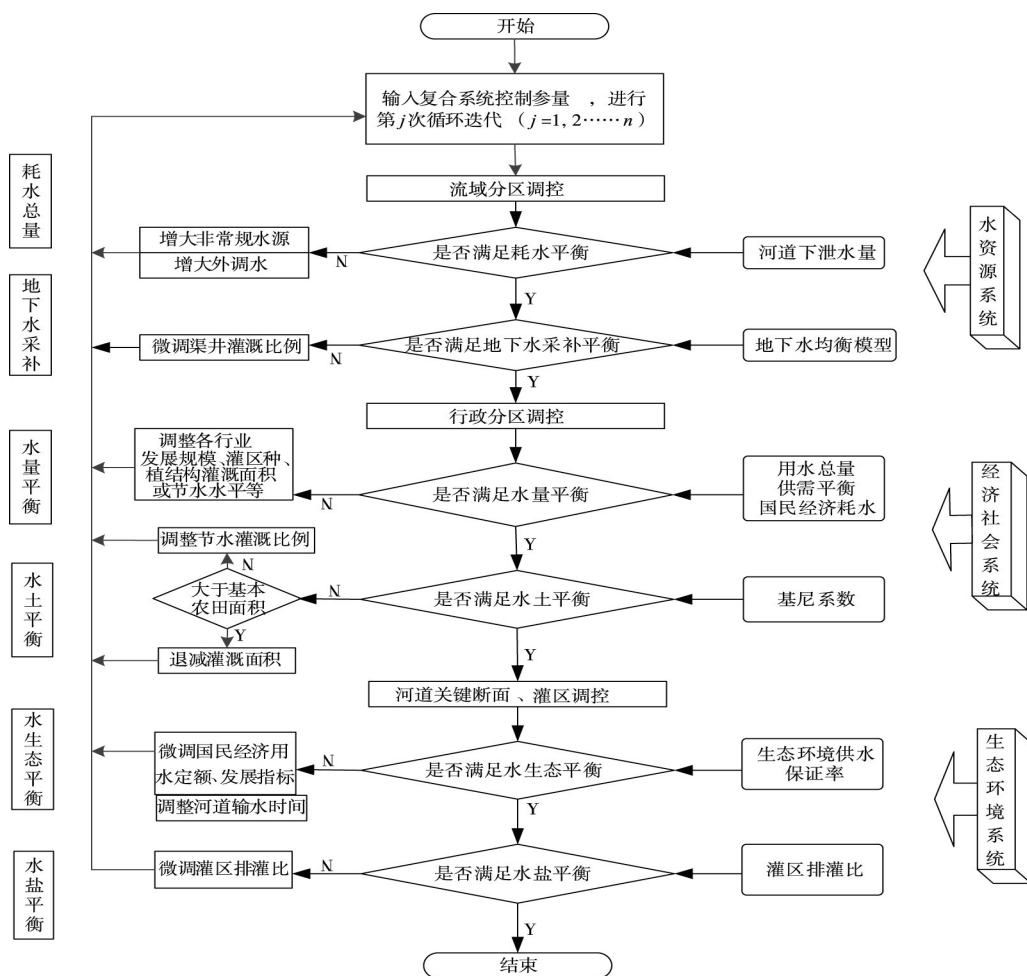


图2 水资源多维均衡配置多重循环迭代算法框图

措施(调整水土资源结构,若灌溉面积大于基本农田面积,则适当退减灌溉面积,否则实施更节水灌溉方式)后,转入S1重新输入复合系统关键控制参量,并置 $j=j+1$,重复前一次迭代过程,直至满足条件;

(4)第四步(S4):以河道关键控制断面和灌区为单元的生态环境系统迭代计算,寻求河道关键控制断面水生态平衡和灌区的水盐平衡,S41:判断河道关键控制断面是否满足生态环境用水保证率要求,若不满足则采取调整措施(微调国民经济用水定额、发展指标及河道输水时间)后,转入S1重新输入复合系统关键控制参量,并置 $j=j+1$;若满足则转入S42:判断是否满足灌区水盐平衡要求,若不满足则采取调整措施(调整灌区排灌比等)后,转入S2重新输入复合系统关键控制参量,并置 $j=j+1$;若仍不满足则转入S1再次进行复合系统关键控制参量逐次协调,并置 $j=j+1$,重复前一次迭代过程,直至满足条件;

(5)第五步(S5):输出水资源配置结果。

4 实例应用

4.1 流域概况 塔里木河是我国最大的内陆河,自西向东绕塔克拉玛干沙漠北缘贯穿塔里木盆地,干流总长一千多公里,自身不产流,主要依靠九源流补给(目前只有四源流补给),作为锁住塔克拉玛干沙漠的“生态项链”对维持南疆地区各族人民生存发展和社会稳定起着决定作用。2013年塔里木河流域总用水量为210.5亿 m^3 、社会经济耗水量为157.9亿 m^3 ,相对2000年分别增加了62%和82%,社会经济耗水增长率明显高于用水增长率,留给生态环境的可耗水量不断下降。虽然塔里木河流域多年(2000—2013年)平均来水量增加33亿 m^3 ,但多年平均生态耗水量总体呈现下降趋势,下降最为

明显的巴州地区和阿克苏地区，灌溉面积增加最为明显。2013年塔里木河流域耕地面积比2000年增加了66%，盐渍化面积占耕地面积的67%(其中轻盐化面积占42%、中盐化面积占37%、重盐化面积占21%)，林草地面积减少了13%，沙漠戈壁面积增加了3%。气候变化驱动西北内陆区水资源系统出山口径流量的增加，而经济社会系统耕地面积大规模无序扩张导致水资源系统消耗的水资源量远远超过经济社会系统节水灌溉所节约的水资源量，迫使生态环境系统所需的水资源量被大量挤占，从而导致生态环境系统失衡和恶性演变。

根据塔里木河流域水资源系统特点和现状、规划的水利工程情况以及水资源配置的要求等，将水资源系统中各类物理元素(重要水利工程、计算单元、河渠道交汇点等)作为节点，各节点间通过水资源传播系统的各类线段连接，形成塔里木河流域水资源配置系统网络图，最终概化计算单元水资源三级区套县(市)39个，水文控制站点、引水节点、排水节点、流域水资源分区断面等45个节点，已建和规划水库34座，地表水供水渠道66条，河段140条，排水渠道42条。文中以阿克苏流域为例进行演示(图3)。

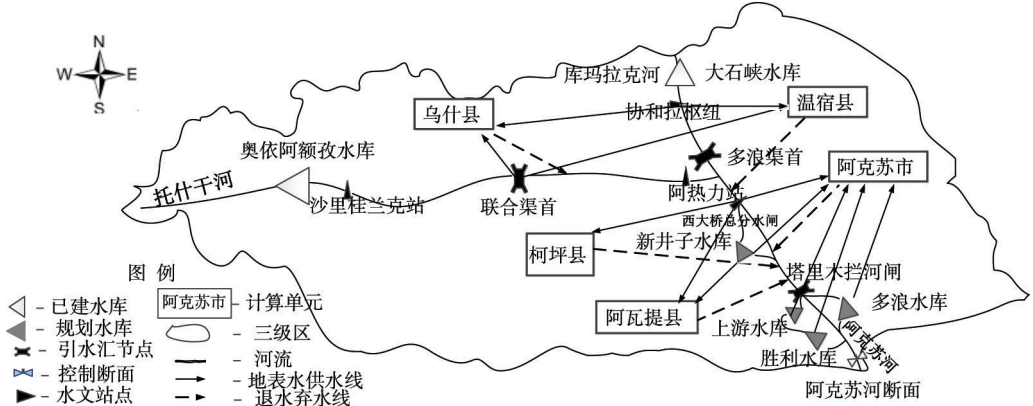


图3 水资源配置系统网络图

4.2 生态水文调控指标及其阈值确定

4.2.1 关键控制断面 塔里木河流域上游耗水量增大影响地表水文过程，导致现状下游河道彻底断流，荒漠河岸林植被严重退化衰败，生态系统功能与服务价值下降。为保障塔里木河流域源流区水量河损及尾间维持现状天然植被需水量，干流上中游维持水量河损及下游恢复植被的维持水量、地下水恢复水量，根据文献[41]确定流域生态保护目标需水量，通过河道综合整治，保证下泄生态水量，关键控制断面生态水文控制指标阈值如表1所示。

表1 关键控制断面生态水文调控指标阈值 (单位：亿 m³)

流域	和田河流域		叶尔羌流域		阿克苏流域	开都-孔雀河流域	干流	
断面	两河渠首	肖塔	艾里克塔木	黑尼亚孜	拦河闸	66km分水闸	阿拉尔	大西海子
要求下 $P=50\%$	18.54	9.29	8.25	3.3	34.20	4.5	46.5	3.5
泄水量 $P=75\%$	15.26	6.39	2.63	0	26.41	4.5	32.80	1.5

4.2.2 关键控制区域 塔里木河流域粗放、低效用水模式及人工绿洲的快速扩张，导致用水矛盾加剧，灌区内盐渍化与灌区外围天然植被退化并存，水环境恶化危及生态安全。未来关键区域内应通过完善排水系统，降低地下水位，推行节水灌溉等措施缓解次生盐渍和荒漠化。具体关键控制区域生态水文调控指标及其阈值见2.2节。

4.3 方案设置及比选

4.3.1 方案设置 规划水平年塔里木河水资源配置应注重以下几个方面：(1)提高用水效率，抑制不合理需求，经济规模与用水规模要符合本流域水资源可持续利用要求；(2)进行产业结构升级改造，调整种植结构，逐步退出高耗能高耗水产业，退减无序开荒挤占的生态用水；(3)新建污水处理厂和中水回

用工程，增加中水回用量在供水结构中的比例；(4)新建必要的山区型蓄水工程，提高供水保证率，减少工程型缺水；(5)加大外流域调水的力度，缓解资源型缺水，逐步退还占用的生态水量和地下水量。

来水系列：近年来，塔里木河流域来水量偏丰(2001—2013年系列比1956—2000年系列偏丰12.5%)，气候变化加剧了塔里木河流域水循环过程的复杂性和水资源的不安全性，因此采用偏理想(2000—2013年)和偏保守(1956—2000年)两时段逐月径流资料进行模拟计算。

需水方案：需水方案有3种，分别为：方案Ⅰ(高增长和强化节水)、方案Ⅱ(适度增长和强化节水)和方案Ⅲ(高增长和适度节水)。塔里木河流域现状年农业用水量过大，在保持现状灌溉面积条件下仅通过农业节水措施而不退减灌溉面积的情况下，农业用水需求仍超过用水总量控制红线指标，因此，塔里木河流域未来规划水平年必须采取节水和退地“两条腿”才能走向可持续发展道路。鉴于节水退地具体实施的难度相对较大，农业采取两种发展方案：高发展方案严格按照用水总量控制要求加大力度节水、退地；2020年、2030年分别累计新增节水灌溉面积78.1万hm²、85.1万hm²，累计退减基本农田外灌溉面积31.5万hm²、41.5万hm²。适度发展方案是分步实施，远期达标放缓节水、退地力度；2020年、2030年分别累计新增节水灌溉面积66.1万hm²、73.7万hm²，累计退减基本农田外灌溉面积26.3万hm²、29.7万hm²。通过来水方案与需水方案组合得到6种配置方案，具体组合情况见表2。

表2 配置方案集

需水方案	方案Ⅰ	方案Ⅱ	方案Ⅲ
1956—2000年	方案一	方案二	方案三
2001—2013年	方案四	方案五	方案六

4.3.2 方案比选 以2013年水资源开发利用情况为基准，进行1956—2013年58年长系列逐月供水模拟，对模型系统参数进行率定和校核，进而对规划水平年进行调节计算。具体配置结果如下：规划水平年不同方案水资源配置结果见表3。在相同需水方案下，来水偏理想(2001—2013年)系列明显比偏保守(1956—2000年)系列缺水率小，即方案四缺水率<方案一、方案五缺水率<方案二、方案六缺水率<方案三；在相同来水系列下，需水高方案缺水率明显比需水低方案大，尤其是在偏枯和特枯水平年该现象更为显著，即：方案一缺水率<方案二<方案三、方案四缺水率<方案五<方案六。

由表3计算结果分析可知，方案一是“以水定产、走自律式外延发展”道路，在保守来水条件下，对应经济社会高速发展和强化节水，在确保流域基本农田总量控制的基础上，加大农业节水和退地力度，全力支持工业的跨越式发展，且2020年和2030年用水总量完全控制在三条红线用水总量控制指标内，在特枯年份缺水率相对较小，且主要为农业缺水，开源投资最小，既可保证经济社会快速

表3 不同方案多年平均供需平衡分析结果 (单位：亿 m³)

水平年	方案	需水量	供水量			用水量			缺水率	
			地表水	地下水	再生水	小计	生活	工业	农业	/%
2020年	方案一	177.47	155.72	17.7	2	175.42	5.09	7.17	163.16	1.16
	方案二	180.21	156.27	19.2	1.48	176.95	4.78	5.31	166.85	1.81
	方案三	185.71	157.11	21.6	2.31	181.02	5.24	8.29	167.49	2.53
	方案四	177.47	157.9	15.8	2	175.7	5.09	7.17	163.44	1.00
	方案五	180.21	157.04	19.15	1.48	177.67	4.78	5.31	167.57	1.41
	方案六	185.71	158.54	21.37	2.31	182.22	5.24	8.29	168.69	1.88
2030年	方案一	170.86	149.52	16.17	3.47	169.16	6.87	12.46	149.83	0.99
	方案二	176.42	154.74	17.72	1.97	174.42	6.19	7.06	161.18	1.13
	方案三	181.6	155.29	18.72	4.88	178.89	7.3	17.53	154.07	1.49
	方案四	170.86	152.8	14.87	2.89	170.56	6.87	12.46	151.24	0.18
	方案五	176.42	156.72	17.34	1.64	175.7	6.19	7.06	162.45	0.41
	方案六	181.6	158.22	17.49	4.07	179.78	7.3	17.53	154.95	1.00

发展,又可节约大量水资源,从而避免生态环境用水被国民经济发展用水大量挤占,对于构建人水和谐的水生态文明社会十分有利,且在偏保守的来水条件下,水资源系统-经济社会系统-生态环境系统均衡发展程度最高。因此,在平枯水平年和外调水难度较大时,方案一是优先推荐方案。

方案二是“以水定产、走内涵式发展”道路,在保守来水条件下,对应经济社会适度发展和强化节水,考虑到农业节水退地的艰难性,采用适度节水和退地模式,且2020年和2030年用水总量完全控制在三条红线用水总量控制指标内,在特枯年份缺水率相对较大,调水规模达到14.9亿 m^3 ,但调水工程调水管线投资大、涉及的问题和利益攸关方复杂,运行管理和维护难度大,且节水力度较大,开源投资较大,而经济发展水平适度,当地财政补偿负担过重,在偏保守的来水条件下,水资源系统-经济社会系统-生态环境系统均衡发展程度适中。因此,对于决策者而言,在平枯水平年和外调水难度较大且近期退地难度较大时,方案二是次优先推荐方案。

方案三是“近期走内涵式发展,远期走自律式发展”道路,在保守来水条件下,对应经济社会高速发展和适度节水,加大农业节水和退地力度,全力支持工业的跨越式发展,2020年突破三条红线用水总量控制指标,但完全控制在《新疆水资源平衡论证》的指标内,2030年完全按照当地三条红线控制指标,但是由于节水力度较小,在特枯年份缺水率相对较大,调水规模达到17.42亿 m^3 ,开源投资较大,生态环境用水被国民经济发展用水大量挤占,不利于构建人水和谐的水生态文明社会,在偏保守的来水条件下,水资源系统-经济社会系统-生态环境系统均衡发展程度较低。因此,对于决策者而言,方案三不作为优先推荐方案。

方案四、五、六分别与方案一、二、三发展模式类似,只是基于偏理想来水条件,近期、远期水平年水资源系统-经济社会系统-生态环境系统均衡发展程度都普遍比保守来水条件偏高,对决策者而言在丰水年或具有外调水源的平枯水平年,方案四是优先推荐方案;方案五对于对决策者而言在丰水年或具有外调水源的平枯水平年且近期农业退地难度较大时可作为次优先推荐方案,方案六不作为优先推荐方案。

基于保守考虑,本文优先推荐方案一。在平枯水平年塔里木河流域通过累计新增节水灌溉面积85.1万 hm^2 ,累计退减基本农田外灌溉面积41.5万 hm^2 ,累计退减国民经济用水量为75亿 m^3 ,可实现该地区水资源-经济社会-生态环境复合系统的有序良性演化和高效均衡发展,

5 结论与展望

(1)盐渍化和荒漠化,已成为我国内陆干旱区所面临的最突出、最尖锐、最难解决的资源环境问题。针对内陆干旱区发展与保护中的特殊性,剖析和揭示内陆干旱区“自然-社会”二元水循环与生态演变耦合作用机理,分析和建立内陆干旱区二元水循环与生态系统演变之间的量化响应关系;(2)立足于山水林田湖草是一个生命共同体的理念,从节水优先、空间均衡的角度,构建基于生态水文阈值调控的内陆干旱区水资源多维均衡配置模型,为实现内陆干旱区水资源多个维度上满足“六大均衡”(耗水总量、地下水采补、水量、水土、水生态和水盐)要求提供一种全新的模型工具;(3)最后以塔里木河流域为例具体阐述了内陆干旱区水资源多维均衡配置模式在此流域的具体应用,希望为我国其他内陆干旱区的水资源多维均衡配置并以支撑可持续发展与生态平衡、健康稳定提供借鉴;(4)本次重点研究内陆干旱区水资源多维均衡配置与生态系统健康稳定问题,未深入考虑水资源配置所涉及的低碳和生态效益等问题,这将是未来研究的重点之一。

参 考 文 献:

- [1] 李云玲,张敏秋,赵宁.西北诸河区水资源开发利用问题思考与建议[J].人民黄河,2011,33(12): 48-50.
- [2] 赵勇.西北诸河区水资源综合规划概要[J].中国水利,2011(23): 127-129.

- [3] SHEN Y, LI S, CHEN Y, et al . Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989–2010[J] . *Agricultural Water Management*, 2013, 128(1): 55–64 .
- [4] GUO Q, FENG Q, LI J . Environmental changes after ecological water conveyance in the lower reaches of Heihe River, northwest China[J] . *Environ . Geol .* , 2009, 58(7): 1387–1396 .
- [5] CHEN Y, LI B, LI Z, et al . Water resource formation and conversion and water security in arid region of Northwest China[J] . *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(7): 939–952 .
- [6] 王浩, 陈敏建, 秦大庸 . 西北地区水资源合理配置与承载能力研究[M] . 郑州: 黄河水利出版社, 2003 .
- [7] 严登华, 王浩, 杨舒媛, 等 . 干旱区流域生态水文耦合模拟与调控的若干思考[J] . *地球科学进展*, 2008(7): 773–778 .
- [8] 栗晓玲, 康绍忠, 石培泽 . 干旱区面向生态的水资源合理配置模型与应用[J] . *水利学报*, 2008, 39(9): 1111–1117 .
- [9] 王浩, 秦大庸, 郭孟卓, 等 . 干旱区水资源合理配置模式与计算方法[J] . *水科学进展*, 2004(6): 689–694 .
- [10] 宋郁东, 樊自立, 雷志栋, 等 . 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M] . 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000 .
- [11] 谢新民, 赵文骏, 裴源生, 等 . 宁夏水资源优化配置与可持续利用战略研究[M] . 郑州: 黄河水利出版社, 2002 .
- [12] 王浩, 贾仰文 . 变化中的流域“自然–社会”二元水循环理论与研究方法[J] . *水利学报*, 2016, 47(10): 1219–1226 .
- [13] 李佩成 . 咸海萎缩原因、后果、对策及启示[Z] . 杨凌: 西北农业大学, 1989 .
- [14] 姚一平, 瓦哈甫·哈力克, 伏吉芮 . 西北干旱区绿洲沙漠化与盐渍化驱动力分析——以于田绿洲为例[J] . *黑龙江大学自然科学学报*, 2015(4): 519–525 .
- [15] 陈敏建, 王浩, 王芳 . 内陆干旱区水分驱动的生态演变机理[J] . *生态学报*, 2004(10): 2108–2114 .
- [16] 司书红, 朱高峰, 苏永红 . 西北内陆河流域的水循环特征及生态学意义[J] . *干旱区资源与环境*, 2010, 24(9): 37–44 .
- [17] 张一驰, 于静洁, 乔茂云, 等 . 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J] . *水利学报*, 2011, 42(7): 757–765 .
- [18] HALL A, ROOD S, HIGGINS P . Resizing a river: a downscaled, seasonal flow regime promotes riparian restoration[J] . *Restoration Ecology* . 2011, 19(3): 351–359 .
- [19] 黄粤, 包安明, 王士飞, 等 . 间歇性输水影响下的2001–2011年塔里木河下游生态环境变化[J] . *地理学报*, 2013, 68(9): 1251–1262 .
- [20] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等 . 塔里木河下游断流河道输水的生态响应与生态修复[J] . *干旱区研究*, 2006, 23(4): 521–530 .
- [21] 徐海量, 叶茂, 李吉玖 . 塔里木河下游输水后地下水动态变化及天然植被的生态响应[J] . *自然科学进展*, 2007, 17(4): 460–470 .
- [22] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等 . 塔里木河下游地下水位对植被的影响[J] . *地理学报*, 2003, 58(4): 542–549 .
- [23] 徐海量, 陈亚宁, 杨戈 . 塔里木河下游生态输水对植被和地下水位的影响[J] . *环境科学*, 2003, 24(4): 18–22 .
- [24] LI J, YU B, ZHAO C, et al . Physiological and morphological responses of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* to altered groundwater availability[J] . *Tree Physiology*, 2013, 33(1): 57–68 .
- [25] 陈亚宁, 张宏锋, 李卫红, 等 . 新疆塔里木河下游物种多样性变化与地下水位的关系[J] . *地球科学进展*, 2005, 20(2): 158–165 .
- [26] 邓铭江, 王志杰, 王姣妍 . 巴尔喀什湖生态水位演变分析及调控对策[J] . *水利学报*, 2011, 42(4): 403–413 .
- [27] 钟瑞森, 郝丽娜, 包安明, 等 . 干旱内陆河灌区地下水位调控措施及其效应[J] . *水力发电学报*, 2012, 31(4): 65–71 .
- [28] 刘桂林, 艾里西尔·库尔班, 艾尔肯·艾白不拉, 等 . 塔里木河下游生态输水后植被景观格局动态变化研究[J] . *冰川冻土*, 2012, 34(1): 161–168 .

- [29] 罗家熊,等.新疆垦区盐碱地改良[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [30] 邓潮洲,张希明,李利,等.河道输水对塔里木河下游胡杨生长状况的影响[J].中国沙漠,2010,30(2):312-318.
- [31] 娄溥礼.土壤积盐与地下水关系的分析[J].水利学报,1964(3):1-12.
- [32] 董新光,邓铭江,周金龙,等.论新疆平原灌区土壤盐碱化与水资源开发[J].灌溉排水学报,2005,24(5):14-17.
- [33] 胡顺军,艾尼瓦尔·吾买尔,田长彦,等.渭干河平原绿洲灌区合理灌排比探讨[J].水土保持学报,2001,15(1):23-26.
- [34] 杨劲松,陈小兵,周宏飞.新疆塔里木灌区水盐问题研究[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(2):69-73,77.
- [35] 刘平平.井渠结合灌区水资源联合调控模型研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [36] 李鹏.变化环境对灌区水循环的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [37] 魏传江,韩素山,韩俊华.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.
- [38] 胡祖光.基尼系数理论最佳值及其简易计算公式研究[J].经济研究,2004(9):60-69.
- [39] 邵东国,贺新春,黄显峰.基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J].水利学报,2005,36(9):1050-1056.
- [40] 姚海娇,周宏飞,苏凤春.从水土资源匹配关系看中亚地区水问题[J].干旱区研究,2013,30(3):391-395.
- [41] 新疆维吾尔自治区水利厅塔里木河流域管理局.塔里木河流域近期综合治理五年实施方案[R].2003.

Research of water resources multi-dimensional equilibrium allocation based on eco-hydrological threshold regulation in inland arid region

LI Liqin^{1, 2}, WANG Zhizhang³, HE Huaxiang^{1, 4}, MA Zhenzhen¹, XIE Xinmin¹, WEI Chuanjiang¹

(1. Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Water Resources Department, Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100044, China;

3. Information Technology Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

4. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering,

Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To tackle the strong conflict between urban development and ecological environment protection in inland arid regions, a multi-dimensional equilibrium allocation model of water resources based on eco-hydrological threshold regulation was constructed, after identifying the coupling mechanism between water cycle and ecological evolution. The model is divided into three layers; the first layer manages the total consumption of the water resources system and regulates the balance between groundwater exploitation and supplement in the basin; the second layer regulates the balance between water supply and demand and the balance between water resources and irrigation area from the economic and societal system in the administrative division; the third layer regulates the balance between water resources and ecological environment and the balance between water and salt of the environmental system in the key control channel sections and irrigation areas, as well as providing the corresponding multiple loop iteration algorithm. Applying the model to the Tarim River Basin located in China's inland arid region, the results show that, in the normal and dry years (occurrence no greater than 50% comparing to the long-term climatology), with an increased water-saving irrigation area of 0.85 million hectares, a reduced agricultural irrigation area of 0.41 million hectares, as well as a reduced water usage of national economy by 7.5 billion m³, it is possible for the orderly benign evolution and efficient as well as balanced development of composite system integrated with the water resources, economic society and ecosystem, and the results also verify the feasibility of the method.

Keywords: ecosystem; water cycle; ecological hydrology index threshold; water resource multi-dimensional equilibrium allocation; Tarim River

(责任编辑:王成丽)