

文章编号:1672-3031(2021)01-0148-08

## 人类活动影响的辽宁省大凌河流域水文干旱演变特征

苏志诚<sup>1,2</sup>, 马苗苗<sup>1,2</sup>, 邢子康<sup>1,3,4</sup>, 吕娟<sup>1,2</sup>, 张学君<sup>1,2</sup>, 余钟波<sup>3,4</sup>, 衣鹏<sup>3,4</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾研究所 北京 100038;

2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038; 3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

4. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了揭示人类活动干扰对不同时空尺度水文干旱的影响, 本文以辽西北大凌河流域为例, 利用SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型重建天然状态下的历史水文序列, 基于多时间尺度的标准化径流指数(*SSI*), 对比评估天然状态和人类活动影响下的流域水文干旱演变特征。结果表明, 人类活动干扰是流域径流序列在2000年发生显著突变的主要原因。在时间尺度上, 人类活动对水文干旱的影响主要体现在月、季尺度, 对年尺度、多年尺度的影响相对较小。在空间分布上, 中游水文干旱受人类活动的干扰较下游更为显著。干旱季节性变化的分析表明, 人类活动的影响导致冬、春季出现干旱的频率降低, 而秋旱的频率增加; 季尺度干旱的历时和烈度的均值和离散程度均呈上升态势。

**关键词:** 水文干旱; 大凌河流域; SWAT模型; 人类活动; 干旱指标

**中图分类号:** P333

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20200115

### 1 研究背景

水文干旱指河川径流或地下含水层水位低于正常值的情况, 是气象干旱发展到一定程度后的结果<sup>[1-2]</sup>。由于居民生活、工农业发展及水力发电等对地表水资源的依赖程度高, 所以水文干旱的破坏性较气象干旱更加直接<sup>[3-4]</sup>。影响区域水文干旱的原因较为复杂, 一般认为人类活动和气候变化是驱动区域水文干旱的两大因素<sup>[5-6]</sup>。

过去几十年, 随着人口的增加和工、农业的快速发展, 人类对水资源的需求迅速增加, 大量的水利工程建设(如水库、抽水井、取水工程等)导致了地表和地下水资源的过度开发, 使自然水循环遭到不同程度的破坏, 河川径流的自然节律性受到影响<sup>[6]</sup>。评价人类活动对水文干旱的影响已经成为了干旱领域的热点问题。任立良等<sup>[7]</sup>提出多种径流指数参数化方案, 对比评定各方案表征非平稳干旱的合理性以及环境变换对干旱演变的影响作用, 发现人类活动是短历时干旱发生的主导因素; Rangecroft等<sup>[8]</sup>用阈值法和标准化指标法评价了智利北部圣胡安水坝建成前后的水文干旱特征, 发现大坝减少了年内干旱事件的频率、历时和强度, 但是对多年尺度干旱影响不明显。然而, 上述研究多集中于采用统计分析方法评估人类活动对水文干旱发生的贡献率, 而就人类活动对水文干旱时空(如不同季节、上下游地区)演变特征的影响分析仍相对较少。

为此, 本文拟选取辽西北大凌河流域为研究区, 采用水文模拟方法重建自然径流序列, 进一步基于标准化径流指数(*SSI*)和游程理论提取典型干旱过程及特征, 对比评估天然状态和人类活动影响下不同时空尺度下的水文干旱变化, 为适应环境变化的水资源调度管理和干旱预警预报提供科学依据。

收稿日期: 2020-07-05; 网络首发时间: 2021-01-15

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210115.1114.001.html>

基金项目: 中国水科院基本科研业务费项目(JZ0145B582017); 国家自然科学基金项目(51609257)

作者简介: 苏志诚(1975-), 教授级高级工程师, 主要从事抗旱减灾研究。E-mail: suzhc@iwhr.com

## 2 研究区概况

大凌河是辽宁省西部最大河流(118°46′—121°50′E, 40°28′—42°38′N), 全长 435 km, 流域面积 23 800 km<sup>2</sup>(见图 1)。属温带季风性气候, 夏季多雨炎热, 冬季少雨, 气候干燥。大凌河流域是辽宁省旱灾多发区之一, 素有十年九旱之称<sup>[9-10]</sup>, 降水量年际变化较大, 年内分配不均, 多年平均降水量为 430 ~ 630 mm, 多年平均气温为 7.8 ~ 8.9 °C。大凌河流域已建大型水库 4 座, 中型水库 4 座, 小型水库及塘坝 453 座, 总库容 23.45 亿 m<sup>3</sup>, 兴利库容 11.81 亿 m<sup>3</sup>。流域内人均水资源占有量 378 m<sup>3</sup>, 不到全省人均水资源占有量的一半。干旱缺水造成了生态环境恶化, 导致了上下游、河道内外和用水部门之间的水资源配置矛盾, 已经严重制约了流域内的经济发展和社会稳定<sup>[11-12]</sup>。

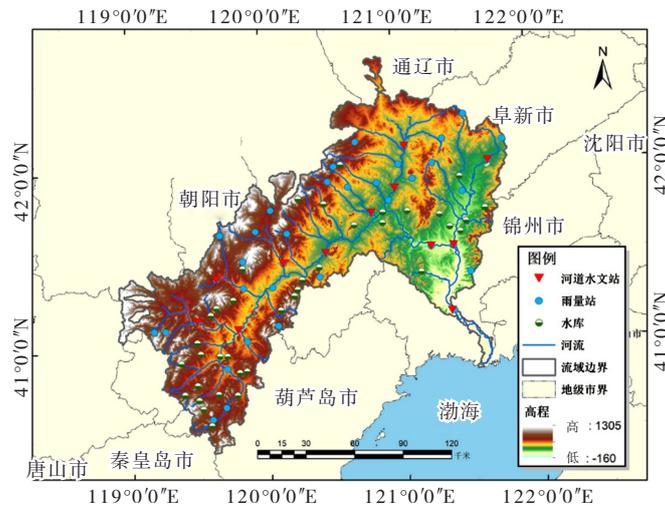


图 1 大凌河流域示意图

## 3 研究数据来源与研究方法

**3.1 研究数据来源** 本文收集了大凌河流域 12 个水文站, 40 个雨量站及 4 个国家级气象站过去近 40 年(1980—2017)的观测数据。其中, 水文数据为各站点逐月河道观测径流量, 气象数据为逐日降水量和温度、风速等。

为构建流域水文模型, 还收集了模型所需的陆面参数数据, 包括高分辨率的数字高程数据 (DEM), 土壤数据和土地利用数据。具体而言, DEM 数据来自国际科学数据共享服务平台 ([http://srtm.csi.cgiar.org/selection/input Coord.asp](http://srtm.csi.cgiar.org/selection/input%20Coord.asp)) 的 SRTM 30 m 数据; 土壤数据来自联合国粮农组织 (FAO) 和维也纳国际应用系统研究所 (IIASA) 所构建的世界土壤数据库 (Harmonized world soil database v1.2) 数据集, 中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据, 空间分辨率为 0.05° (<http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>); 土地利用数据采用国家基础地理信息中心提供的全球 30 m 地表覆盖数据 (GlobeLand30) (<http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx>)。

### 3.2 研究方法

**3.2.1 基于水文模型重建天然径流序列** 陆面水文模型是基于水平衡约束机制开发的、用于刻画和描述流域水循环过程的重要工具。以真实可靠的气象观测作为驱动输入, 陆面水文模型已成功用于重建过去几十年的水循环过程<sup>[13-14]</sup>, 并生成一系列历史长期一致的水热通量数据产品<sup>[15]</sup>。本文拟借助陆面水文模拟方法, 重建流域天然径流序列。具体如下: 利用天然时期或人类活动影响显著前的实测水文气象资料驱动并率定模型参数, 构建适用于流域的水文模型, 由此获取的模型参数能够反映

流域在人类活动弱干扰背景下的产流状况；保持参数不变，延长模拟时间，将人类活动影响期的气象驱动数据输入模型，得到相应时期的还原径流量，即为人类活动影响期的天然径流序列。

基于人类活动影响期的实测径流量和重建的天然径流量，开展水文干旱估算与对比分析，定量揭示人类活动对水文干旱的影响。

3.2.2 SWAT水文模型构建 本文选取由美国农业部农业研究中心开发的SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型重建自然状态下流域水循环过程。SWAT模型是一个具有物理机制的分布式水文模型，能够利用GIS和多种空间数据集提供的空间数据信息，模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程<sup>[16]</sup>。SWAT将流域分为若干个水文响应单元(HRU)，在每个单元上采用概念性模型推求净雨，再进行汇流演算，最后求得出出口断面流量。该模型在国内外被广泛地用于水文预报、水资源规划管理与水土保持评价等领域<sup>[17-19]</sup>。SWAT模型在重建自然水循环过程，生成历史长期一致的水热通量序列方面也有成功的先例<sup>[20]</sup>。

本文利用SRTM 30 m DEM数据、土壤和土地利用数据构建大凌河流域SWAT模型陆面参数数据库，利用40个雨量站逐日降雨数据和气象观测台站逐日最高、最低气温和风速、相对湿度数据作为SWAT模型的气象强迫输入(具体见3.1节)，采用长序列(近20年)(天然)月径流观测系列进行模型参数率定。采用Nash-Sutcliffe效率系数(*NSE*)和相对误差(*Er*)评价模型率定的效果<sup>[21]</sup>。根据模型评估的标准<sup>[14]</sup>，当*NSE*高于0.70且*Er*低于25%时，即可认为模型效果能够合理地重现径流的年际及年内变化。

### 3.2.3 典型水文干旱过程识别

(1)水文干旱诊断指标。目前国内外广泛采用标准化河道流量指数(*SSI*)进行水文干旱识别研究<sup>[22-25]</sup>，计算方法与标准化降水指数(*SPI*)类似，即在确定特定时间内径流量适合的概率分布类型后，进行正态标准化径流指数的计算，具体方法见参考文献<sup>[26]</sup>；参照中华人民共和国国家标准气象干旱等级(GB/T 20481-2006)规定的干旱等级标准，对*SSI*干旱等级进行划分<sup>[27]</sup>(见表1)，以便从旱情严重程度视角对比分析水文干旱。

鉴于我们主要关注人为活动影响期水文干旱特征的变化，为此，本研究利用重建的天然径流序列和相应时期的径流观测序列，分别计算相应的*SSI*序列。

(2)水文干旱事件特征提取。干旱不同于洪水，往往很难准确地定义干旱事件的起始和结束时间，甚至不能准确地定义干旱事件的特征<sup>[28]</sup>。游程理论是定义干旱事件的较为有效的方法<sup>[29]</sup>。即假设阈值*X*来截取一个随时间变化的离散系列 $X_t$ ，当 $X_t$ 在一个或多个时段内连续大于*X*时，出现正游程；而当 $X_t$ 连续小于*X*时，则出现负游程。在干旱研究中，把负游程的长度称作干旱历时(*D*)，即干旱开始至结束时间的长度；负游程的总量称为干旱烈度(*M*)，也称干旱的严重程度，即干旱历时内所有小于截断水平值的累积之和。值得注意的是，通常干旱发展过程缓慢且历时长，在一场干旱持续时期内，由于某些原因，如临时性的降水，可能出现若干“子干旱”。这种相邻的几次“子干旱”构成了相互关联的非独立干旱事件，但它们实质上是一场干旱事件。定义此时的干旱历时为初始“子干旱”至末尾“子干旱”的历时之和，相应的烈度为“子干旱”烈度之和。

表1 干旱等级划分

<i>SSI</i> 值	干旱等级
$\geq 0$	无旱
[-1, 0)	轻度干旱
[-1.5, -1)	中度干旱
[-2, -1.5)	严重干旱
$< -2$	特大干旱

## 4 结果分析

4.1 流域水文气象观测要素分析 对大凌河流域1980—2017年的水文气象要素序列分析(图2(a)—图2(c))显示，1980—2017年流域内降水和气温总体上呈缓慢上升趋势，且2000年前后降水和气温的变化趋势没有发生显著的变化。凌海站(流域出口)的径流量变化趋势表明，1980—1999年和2000—2017年径流量均呈上升趋势，但变化率差异较大，1980—1999年的径流变化率为2000—2017

年的8倍。这可能与人类活动的干扰密切相关。1980—2000年是大凌河水利建设和退耕还林的主要时期，特别是2000年投入运行的白石水库，极大地改变了大凌河干流的径流机制。

大凌河流域年降水量与年径流深的双累计曲线(图2(d))进一步表明，2000—2017年流域降水和径流关系较1980—1999年发生了改变，径流量显著下降，导致径流系数明显下降。以上分析说明了大凌河流域在气象要素变化趋势没有发生明显的变化的前提下，径流量的变化趋势却在2000年出现了突变。

结合大凌河流域人类活动历史特征，选取1980—1999年为天然期，此阶段水文过程受环境变化干扰较小；选取2000—2017年为人类活动影响期，此阶段人类活动对水文过程的影响显著。

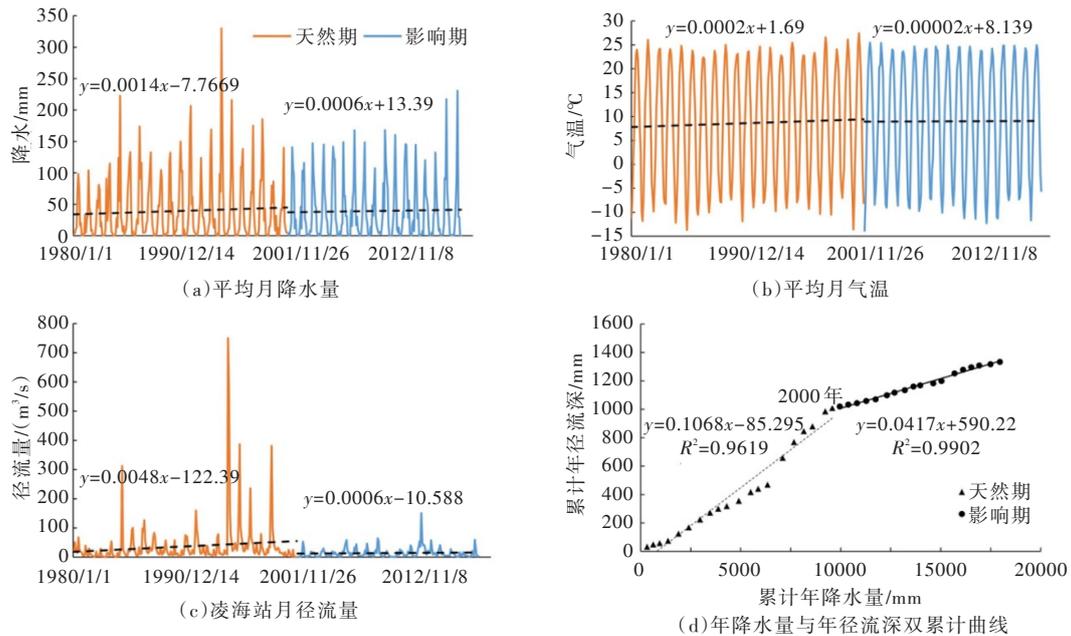


图2 大凌河流域水文气象要素过程线

**4.2 人类活动影响期的天然径流序列重建** 采用典型水文站点的实测月径流数据率定天然期SWAT模型参数，以Nash-Sutcliffe效率系数( $NSE$ )和相对误差( $Er$ )作为模型率定的检验标准。结果显示(图3)，模拟径流的年际变化和多年平均值均能和观测径流吻合，两个主要站点的 $NSE$ 均大于0.70，且相对误差小于20%，均在合理的范围之内<sup>[21]</sup>，表明经过率定的SWAT模型能够较好地重现天然流域水循环过程。

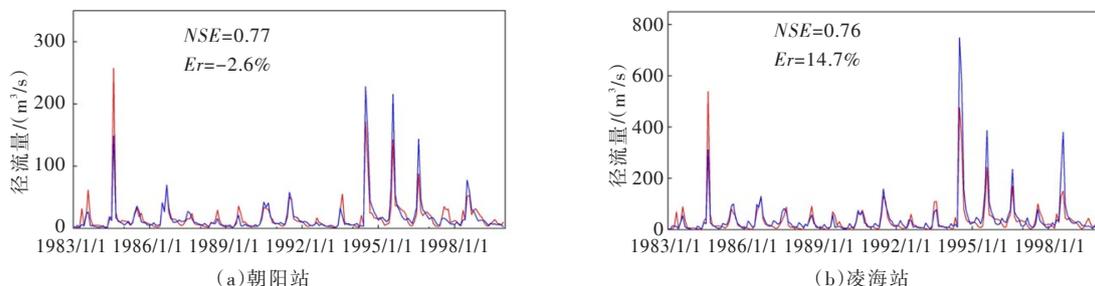


图3 SWAT模型率定结果

采用影响期的气象驱动数据和天然期的模型参数重建影响期径流序列，得到天然状态下2000—2017年的径流序列(图4)。凌海站(流域出口)的径流还原结果显示，不考虑系统误差的情况下，还原后的天然径流总量较人类活动影响下的径流量总量提高了87.9%。影响期模拟的各洪峰流量相对误差为63.4%~179.2%，反映出实测径流序列的汛期峰值与还原径流相比显著降低，这可能与新修水库

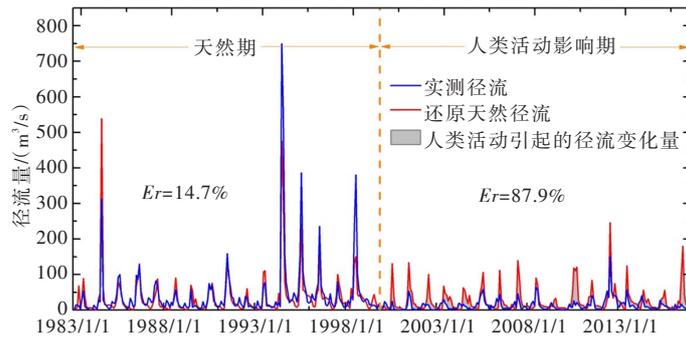


图4 人类活动对影响期径流量的影响(凌海站)

和退耕还林对洪峰的削减作用有关。

**4.3 不同时间尺度下水文干旱演变分析** 通过计算不同时间尺度的  $SSI$ ，能够描述从月尺度到多年尺度的水文干旱演变规律。图5对比凌海站(流域出口)基于实测值和基于模型还原值计算的  $SSI$ 。结果显示，人类活动对不同时间尺度(1月、3月、6月、12月)的水文干旱均产生了一定的影响。 $SSI-1$ 、 $SSI-3$ 和 $SSI-6$ 的时间序列对比结果显示，同一时期，基于观测值水文干旱发生的时间出现了滞后，表明了人类活动的调节一定程度上推迟了短期干旱发生的时间。此外，两种情形下的短时间尺度干旱等级也有较大的差异。基于实测值和基于还原值的长时间尺度水文干旱( $SSI-12$ )的整体变化趋势基本一致，同一时期  $SSI$ 反映出的旱涝情况二者区别不大，但其旱情等级出现了差异。综上，我们发现人类活动对短时间尺度的水文干旱的影响更加显著，即改变了短期干旱的发生时间，也改变了其量级；而对于长时间尺度的干旱，仅改变了部分时段的干旱等级。

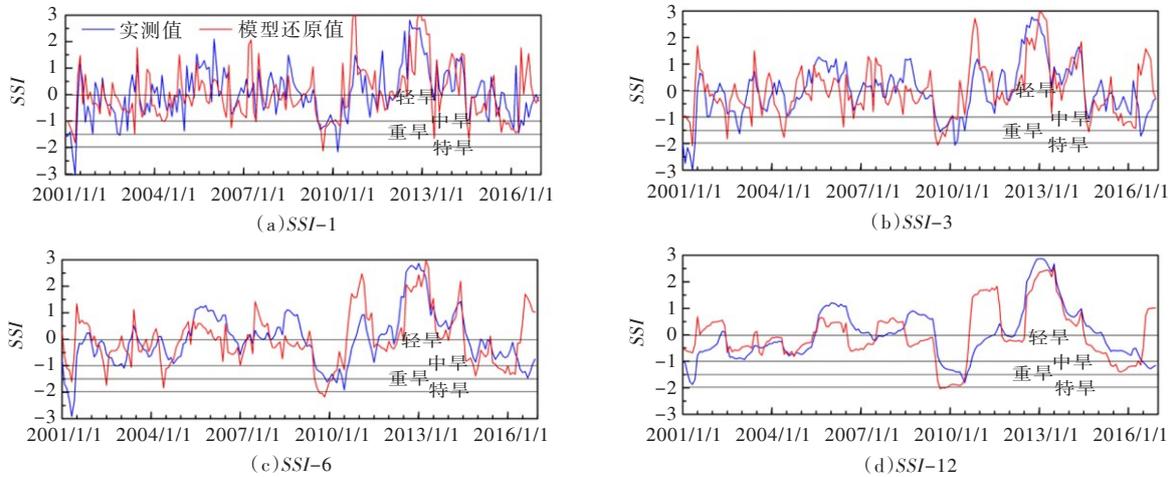


图5 2000—2016年凌海站基于实测流量和模型还原流量的  $SSI$  值变化情况

#### 4.4 人类活动影响下季尺度水文干旱演变分析

**4.4.1 干旱事件频率分析** 为了进一步分析人类活动对季节性干旱频率的影响，本文基于季尺度的水文干旱指标  $SSI-3$ ，进一步计算了不同等级和不同月份干旱发生频率。从不同等级干旱频率的整体分布情况(图6)来看，天然状态下大凌河流域的干旱分布以轻旱、重旱为主。在人类活动的影响下，轻旱和中旱的频率下降，而重旱和特旱的频率上升。进一步对比中游(朝阳站)和下游(凌海站)的干旱频率分布，结果发现中游的变化更加明显，其中轻旱的频率降低了10%。下游地区的中旱旱情受人类活动影响较大(降低5%)，其他级别干旱频率变化不明显。

从干旱频率的月份分布可以看出(图7)，人类活动显著改变了天然状态下水文干旱的季节性分布特征。天然状态下，秋、冬季节是大凌河流域水文干旱高发季节，尤其是夏转秋(8—10月份)期间，汛期一过，流域降水量迅速减少，上游来水量随之锐减，此时极易发生秋旱。旱情等级以轻旱、中旱为主，重旱和特旱比较少见。中游(朝阳站)与下游(凌海站)相比，下游的秋、冬季节干旱频率较

中游高，而中游的夏季干旱频率更高。在人类活动的影响下，冬、春季的干旱频率降低，而秋季干旱频率则出现了上升。尤其是中游朝阳站，9月和10月的干旱频率提升了7%~13%。从干旱等级来看，在人类活动影响下，特旱和重旱频率增加，尤其是下游地区，冬季和春季连续出现特旱旱情。

大凌河流域最为显著的人类活动是水库调节，其干流建有4座大型水库，对流量的自然节律性产生了很大的影响。由于水库的调度以防洪为主要目标，在非汛期放水腾空库容，增加了河道流量，导致冬、春季水文干旱频率降低；汛期拦蓄洪水，减少下游来水量，使得夏、秋旱频率增加。

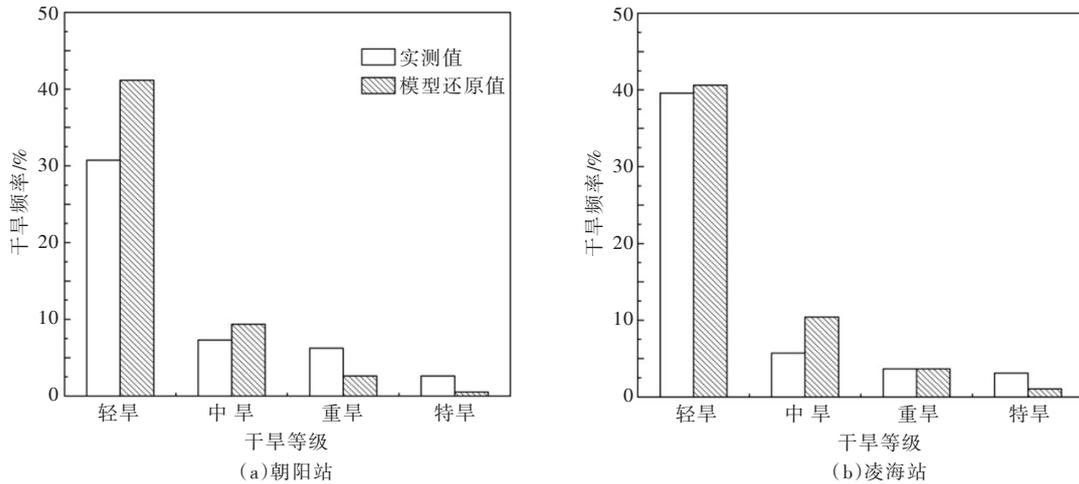


图6 基于实测值和模型还原值不同等级干旱发生频率

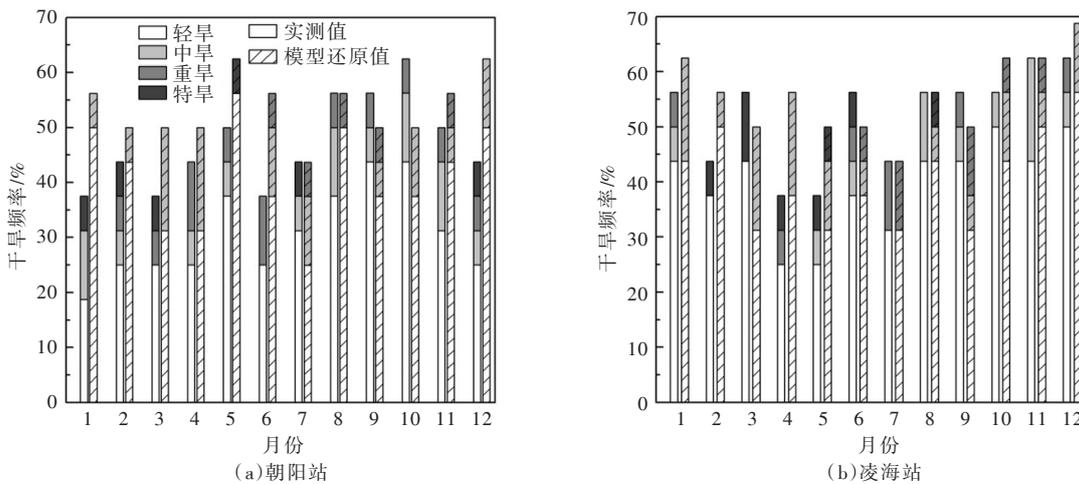


图7 基于实测值和模型还原值的各月不同等级干旱发生频率

4.4.2 干旱事件特征分析 为了进一步评价人类活动影响下的水文干旱特性，本文基于季尺度的水文干旱指标  $SSI-3$ ，采用游程理论提取干旱事件，分析大凌河流域天然状态和人类活动影响下干旱历时和干旱烈度(图8)。结果表明，总体上人类活动对干旱历时和干旱烈度呈现增强的作用，即延长了干旱历时，提升了干旱烈度。其中对中游(朝阳站)的影响较下游(凌海站)更加明显，朝阳站的平均干旱历时延长了约1个月，干旱烈度增加了约2个单位。从干旱特征的统计分布区间来看，人类活动增加了水文干旱特性的不确定性，干旱历时和干旱烈度的分布范围扩大了，其中朝阳站天然状态下的干旱历时最大为11个月，人类活动使干旱历时延长了近一倍(20个月)。下游干旱历时的分布范围变化不大，但烈度的分布范围也扩大了近一倍。

## 5 结论

本文以辽西北大凌河流域为例，利用SWAT水文模型重建天然状态下的历史水文序列，并采用

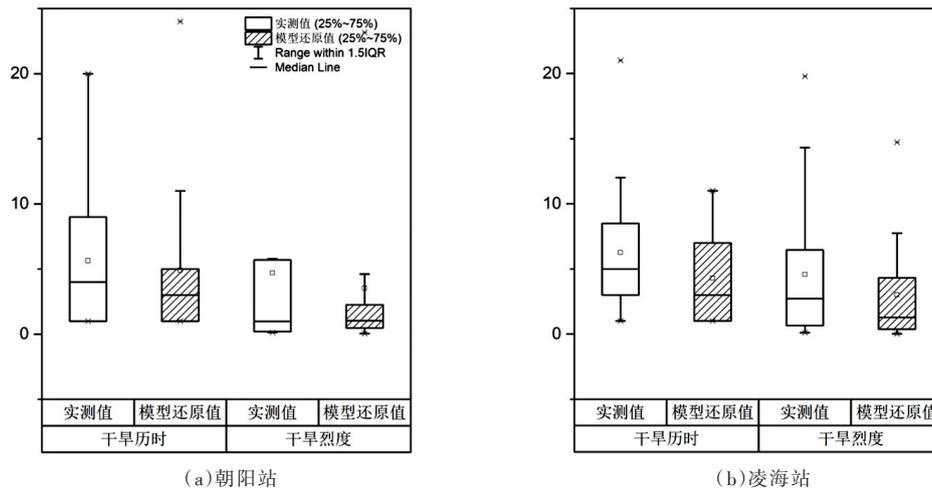


图8 基于实测值和基于模型还原值的2000—2017年干旱历时和干旱强度箱型图

多时间尺度的标准化径流指数( $SSI$ )，对比评估天然状态和人类活动影响下的流域水文干旱演变特征，揭示人类活动干扰对不同时空尺度水文干旱的影响。主要结论如下：

(1)大凌河流域月平均降水、气温均呈上升趋势且无明显突变，月径流量总体呈上升趋势。1980—1999年和2000—2017年两阶段的径流序列变化趋势及降水径流双累计曲线表明，大凌河流域径流序列在2000年发生了显著突变。

(2)应用SWAT模型对人类影响期的流域天然径流进行还原，发现人类活动导致径流量的明显衰减，受水库蓄水和退耕还林的影响，汛期峰值削减了63.4%以上。

(3)以 $SSI$ 为水文干旱指标，评价了代表性站点的多时间尺度水文干旱演变特征，结果表明，人类活动对短时间尺度(月尺度、季节尺度)的干旱影响更明显，对同期水文干旱的发生有一定的推迟作用。

(4)对季尺度干旱的频率和特征分析表明，人类活动显著改变了天然状态下水文干旱的季节性分布特征，导致冬、春季干旱发生频率降低，而秋季干旱频率则呈现上升；就空间分布而言，人类活动对中游季尺度干旱频率的干扰更加显著，导致中游轻旱频率降低了10%。此外，人类活动增加了季尺度干旱的历时和烈度。尤其是中游，平均干旱历时延长了约1个月，干旱烈度增加了约2个单位，并增加了其离散程度。

上述系列分析表明，人类活动干扰增加了大凌河流域水文干旱事件的不确定性。为此，未来的干旱模拟预报研究需充分考虑人为因素对流域极端水文事件形成过程的影响。不过，需要指出的是，本文仅仅是针对各类潜在的人类活动(水利工程、农业灌溉、取用水和下垫面变化等)对水文干旱的影响作了总体概化式的评估，在精细化评估各类人类活动对水文干旱演变的驱动作用方面仍然存在不足。未来依据人类活动取用水和水利工程监测数据，更准确、精细地区分不同人类活动对水文干旱的贡献。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 董前进, 谢平. 水文干旱研究进展[J]. 水文, 2014, 34(4): 1-7.
- [ 2 ] 孙荣强. 干旱定义及其指标评述[J]. 灾害学, 1994(1): 17-21.
- [ 3 ] HE X, WADA Y, WANDERS N, et al. Intensification of hydrological drought in California by human water management[J]. Geophysical Research Letters, 2017. doi:10.1002/2016GL071665.
- [ 4 ] 翟家齐, 赵勇, 裴源生, 等. 气候变化与人类活动对流域水文干旱的影响评估——以海河北系为例[C]//第十二届中国水论坛. 福州, 2014.
- [ 5 ] ZHANG Q, LIU J, SINGH V P, et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on stream-flow in the Poyang Lake basin, China[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(14): 2562-2576.

- [ 6 ] 袁星, 马凤, 李华, 等. 全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 225-237.
- [ 7 ] 任立良, 沈鸿仁, 袁飞, 等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 492-500.
- [ 8 ] RANGE CROFT S, VAN LOON A F, MAUREIRA H, et al. Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region[J]. Earth System Dynamics, 2016(11): 1-32.
- [ 9 ] 吴立君. 基于径流量Z指数的辽宁省水文干旱特征分析[J]. 水利规划与设计, 2020(2): 67-69.
- [ 10 ] 张学君, 马苗苗, 苏志诚, 等. 基于卫星降雨的辽宁省气象干旱实时监测研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(1): 40-47.
- [ 11 ] 刘峰. 大凌河流域水资源动态承载力研究[J]. 地下水, 2019, 41(3): 145-147.
- [ 12 ] 屈艳萍, 吕娟, 苏志诚, 等. 基于干旱事件过程的农业旱灾风险评估研究——以辽西北为例[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(5): 329-337.
- [ 13 ] MAURER E P, WOOD A W, ADAM J C, et al. A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the Conterminous United States[J]. J. Climate, 2002, 15: 3237-3251.
- [ 14 ] PAN M, SAHOO A K, TROY T J, et al. Multisource estimation of long-term terrestrial water budget for major global river basins[J]. Journal of Climate, 2012, 25(9): 3191-3206.
- [ 15 ] ZHANG X, TANG Q, PAN M, et al. A long-term land surface hydrologic fluxes and states dataset for China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(5): 2067-2084.
- [ 16 ] 王中根, 黄友波, 刘昌明. SWAT模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86.
- [ 17 ] WU J, CHEN X, YU Z, et al. Assessing the impact of human regulations on hydrological drought development and recovery based on a 'simulated-observed' comparison of the SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123990.
- [ 18 ] 黄清华, 张万昌. SWAT分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004(2): 22-26.
- [ 19 ] 刘昌明, 李道峰, 田英, 等. 基于DEM的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2003(5): 437-445.
- [ 20 ] 魏怀斌, 王明娜, 周祖昊, 等. 基于分布式水文模型水文还原的地表水资源评价[J]. 人民黄河, 2009, 31(3): 28-29.
- [ 21 ] MORIASI J G A M. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 3(50): 885-900.
- [ 22 ] WEN L, ROGERS K, LING J, et al. The impacts of river regulation and water diversion on the hydrological drought characteristics in the Lower Murrumbidgee River, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 382-391.
- [ 23 ] ZHANG D, ZHANG Q, QIU J, et al. Intensification of hydrological drought due to human activity in the middle reaches of the Yangtze River, China[J]. Science of The Total Environment, 2018(637/638): 1432-1442.
- [ 24 ] 许怡然, 鲁帆, 谢子波, 等. 潮白河流域气象水文干旱特征及其响应关系[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 220-228.
- [ 25 ] 李玲萍, 卢泰山, 刘明春, 等. 基于标准化流量指数(SDI)的石羊河流域水文干旱特征[J]. 中国沙漠, 2020(4): 1-10.
- [ 26 ] GUENANG G M, KAMGA F M. Computation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and Its Use to Assess Drought Occurrences in Cameroon over Recent Decades[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(10): 2310-2324.
- [ 27 ] 孙鹏, 孙玉燕, 姚蕊, 等. 基于标准化径流指数的水文干旱特征分析: 以塔里木河为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 261-268.
- [ 28 ] 焦阳, 袁星, 杨大文. 黄河中游无定河流域水文干旱特征与变化分析[C]//第34届中国气象学会年会. 郑州, 2017.
- [ 29 ] 侯陈瑶, 朱秀芳, 肖名忠, 等. 基于游程理论和Copula函数的辽宁省农业气象干旱特征研究[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 222-227.

(下转第164页)

## Water quality response characteristics and cause analysis of thermal stratification of large reservoirs

LI Budong, LIU Chang, LIU Xiaobo, WANG Shiyan

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Department of Water Ecology and Environment Beijing 100038, China)

**Abstract:** To study the response characteristics and causes of water quality during thermal stratification of large reservoirs, a continuity vertical monitoring of water temperature, dissolved oxygen (DO), ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), total phosphorus, phosphate, and Fe and Mn were taken in front of the dam of Daheiting Reservoir. The seasonal thermal stratification changes of Daheiting Reservoir and the response characteristics of various water quality indicators to thermal stratification were analyzed, and the causes of vertical changes in water quality were further explored. The results show that the thermal stratification of Daheiting Reservoir is a typical single-cycle mixing model; the mixing period is from October to December and April, and the stable thermal stratification period is May–September (except August); the stable thermal stratification period is from May to September (except August); the vertical distribution of dissolved oxygen also shows seasonal changes; the stratification of DO is one month later than the formation of thermal stratification; the bottom water body became severe hypoxia from June to October (except August); under the effects of thermal stratification and anoxic environment, the contents of ammonia nitrogen, total phosphorus and phosphate in the Daheiting Reservoir during the period from May to July appear as bottom layer > middle layer > surface layer, and the iron and manganese in June and July show the same trend. The research shows that thermal stratification will change the vertical distribution structure of DO, and further lead to a release of nitrogen, phosphorus nutrients and iron, manganese and other pollutants from sediment to water, which will adversely affect the normal operation and management of the reservoir.

**Keywords:** thermal stratification; hypoxia phenomenon; nutrients reductive; metals; water quality

(责任编辑: 王学风)

(上接第 155 页)

### Characterizing the hydrological drought evolutions under human interventions: A case study in the Daling River Basin in Liaoning Province

SU Zhicheng<sup>1, 2</sup>, MA Miaomiao<sup>1, 2</sup>, XING Zikang<sup>1, 3, 4</sup>,

LÜ Juan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Xuejun<sup>1, 2</sup>, YU Zhongbo<sup>3, 4</sup>, YI Peng<sup>3, 4</sup>

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

2. Center of Flood and Drought Disaster Reduction of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. State Key Laboratory of Hydrology–Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To reveal the impact of human disturbance on hydrological drought at different spatiotemporal scales, this paper took the Daling River Basin in northwestern Liaoning as a case study area, and used SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model to reconstruct historical hydrological series under natural conditions. Based on Standardized Streamflow Index (SSI) at multiple time scales, we compared and evaluated hydrological drought evolution characteristics under the influence of human activities. The results show that the disturbance of human activities is the main reason for the significant abrupt change of the runoff sequence in 2000. In term of time scale, the impact of human activities on hydrological drought is mainly reflected in the monthly and seasonal scales, and the impact on the annual and multi-year scales is relatively small. In term of spatial distribution, the hydrological drought in the middle reaches is more disturbed by human activities than in the lower reaches. The analysis of seasonal changes in drought shows that human activities led to a decrease in the drought frequency in winter and spring, while the autumn drought frequency increased. In addition, due to the interference of human activities, the average and dispersion of the duration and intensity of seasonal droughts both rise.

**Keywords:** hydrological drought; Daling River Basin; SWAT model; human activities; drought index

(责任编辑: 王学风)