#### DOI: 10.5846/stxb202112173586

齐文华,金艺华,尹振浩,朱卫红.基于 SWAT 模型的图们江流域蓝绿水资源供需平衡分析.生态学报,2023,43(8):3116-3127. Qi W H, Jin Y H, Yin Z H, Zhu W H.Analysis of blue and green water scarcity based on SWAT model in the Tumen River Basin.Acta Ecologica Sinica, 2023,43(8):3116-3127.

# 基于 SWAT 模型的图们江流域蓝绿水资源供需平衡 分析

齐文华1,金艺华1,\*,尹振浩2,朱卫红2

1 延边大学农学院,延吉 133002
 2 延边大学地理与海洋科学学院,延吉 133002

摘要:随着经济快速发展和工农业各类用水量大幅增加,对河流的开发程度随之加强,流域水资源可持续利用受到不利影响。 从蓝绿水视角出发,基于 SWAT 模型量化了图们江流域 2015—2020 年不同时间尺度下的蓝绿水资源并探讨了研究区水资源供 需平衡情况。结果表明:研究时段内流域蓝绿水资源均具有明显的季节特征,年均蓝绿水资源量为 117.16 亿 m<sup>3</sup>,其中蓝水资源 量 30.14 亿 m<sup>3</sup>,绿水资源量 87.02 亿 m<sup>3</sup>,绿水占水资源量的 74.27%。以年为尺度,蓝水资源供需评估指数>1,可利用蓝水资源 量基本不能满足其需求量,降水少的年份蓝水资源供需矛盾突出,而绿水资源可以达到供需平衡,其供需评估指数集中在 0.1— 0.2 之间。在月尺度分析中研究区蓝水供需评估指数出现极端值的频率较高,表明该地区蓝水供需不平衡,尤其是可利用蓝水 资源一般在每年的 7—8 月才较为丰富,而蓝水需求用水集中分布于作物生长期,导致蓝水供应与蓝水需求在时间分配上不均 衡,且在实际水资源分配中忽略了生态用水;月尺度绿水供需评估指数集中在 0.1—0.4 之间,有明显的季节变化特征,整体上绿 水资源供需平衡安全性较高。

关键词:水资源;供需评估;蓝水绿水;SWAT模型;生态用水;水源涵养

# Analysis of blue and green water scarcity based on SWAT model in the Tumen River Basin

QI Wenhua<sup>1</sup>, JIN Yihua<sup>1,\*</sup>, YIN Zhenhao<sup>2</sup>, ZHU Weihong<sup>2</sup>
1 College of Agriculture, Yanbian University, Yanji 133002, China
2 College of Geography and Ocean Sciences, Yanbian University, Yanji 133002, China

**Abstract**: With the rapid economic development, the amount of water used for industry and agriculture has significantly increased, most rivers were blind developed and affected the sustainable utilization of water resources. This study quantified water resources from the perspective of blue and green water. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to simulate the natural runoff in the Tumen River Basin from 2015 to 2020, quantitatively analyzed the change trend of blue water and green water resources at different time scales, and discussed the balance of water supply and demand in the study area. The results showed that the blue and green water resources of the Tumen River Basin presented significantly seasonal characteristics from 2015 to 2020. The average annual amount of blue and green water resources was 11.716 billion m<sup>3</sup>. The blue and green water resources of the study river basin from 2015 to 2020 were 3.014 billion m<sup>3</sup>/a and 8.702 billion m<sup>3</sup>/a, respectively. The study area had different degrees of water scarcities in different time scales. At the annual scale, the supply and demand index of blue water resource was greater than 1, which indicated the supply of blue water basically could not

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0409104035679);国家自然科学基金项目(42061042)

收稿日期:2021-12-17; 网络出版日期:2022-12-22

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jinyh2018@ ybu.edu.cn

satisfy the demand. The imbalance degree of supply and demand of blue water resource was evident in less precipitation years. In contrast, the balance of supply and demand of green water resource was relatively stable, the index concentrated between 0.1 and 0.2. At the monthly scale, the blue water supply and demand balance index put up high frequency of extreme value, illustrated there was an imbalance appearance between the blue water supply and demand in this region. Especially the blue water availability in annual July to August had the maximum values. However, the blue water withdrawal intensively distributed in the crop growth period, there had a time mismatch between the supply and demand of blue water in the river basin. Moreover, the ecological water was neglected in actual water resources allocation. The monthly green water supply and demand index concentrated between 0.1 and 0.4, with prominently seasonal variation characteristics. Overall, the balance between the supply and demand of green water resource was relatively safe.

Key Words: water resource; supply and demand assessment; blue and green water; SWAT model; ecological water use; water conservation

受全球变暖及城市化进程快速发展的影响,多地区发生极端降水的频率显著增加,加之人类生产生活干扰着大部分流域的水文循环过程<sup>[1-3]</sup>,蓝绿水资源分析可以将江河湖泊或含水层的水与降水转化的地表水、地下水以及其它部分的水结合起来进行综合性评价<sup>[4]</sup>。蓝绿水概念最初由 Falkenmark<sup>[5]</sup>提出,蓝水主要是人们可以直接利用的地表水和地下水,一般储存于江、河、湖泊中的地表径流、土壤中流和地下径流;绿水包括储存在非饱和土壤中并被植物吸收利用的水和土壤水分蒸发导致的非生产性水<sup>[6-8]</sup>,是雨养农业的主要水资源,对粮食作物和生态系统健康起着至关重要的作用<sup>[9]</sup>。蓝绿水资源供需平衡的定量评价有助于提高地区的水资源管理水平,已成为国际水资源管理研究的新视角<sup>[10]</sup>。

蓝水资源量的估算即为通常意义上的水资源评价,通过收集研究区的详细资料,如气象数据、水利工程资 料、水文地质参数及社会用水等资料综合统计蓝水资源量,或采用水文模型法估算蓝水资源量[11,16,35]。绿水 资源量计算方法有:(1)水量平衡法,即使用计算方程结合实测气象数据计算潜在蒸散发,通过土壤水分运动 方程估算土壤储水量。但水量平衡法对检测设备要求较高且所需资料较多,具有一定的局限性:(2)生物学 方法,利用生态系统单位干物质生产所需的蒸散发量与陆地生态系统的净初级生产力数据相乘估算绿水量, 或结合生态系统蒸散发资料及空间信息进行估算。但是获取长时段的野外监测数据工作量相对较大;(3)水 文模型模拟是基于流域内土地利用、水文气象、土壤等数据构建模型并估算流域尺度的蓝绿水资源量[11-12]。 由于水文模型可以揭示流域水文过程的机理,因此被认为是模拟水文过程以及评价水资源时空变化特征的有 效工具[13-14]。综合蓝水绿水的估算方法可知,相较于其他方法,水文模型法可以同时评价蓝水和绿水资源量 时空变化特征。SWAT 分布式水文模型基于物理机制对研究区的子流域和水文响应单元进行划分,模拟流域 水文过程的时空变化,可设置年、月、日等多时间尺度直接输出水资源中各部分的量,在流域水资源评价与资 源量估算等方面具有一定优势[15-16]。国内外基于此模型在蓝绿水资源的空间分布特征以及预测未来情景下 的水资源变化趋势等领域已做多数研究。如徐宗学和左德鹏<sup>[17]</sup>整理了蓝水和绿水的概念并对蓝绿水的评价 方法进行总结与分析后,认为 SWAT 模型可有效评价蓝绿水资源量的时空变化特征。Cuceloglu 等<sup>18</sup>利用分 布式水文模型对伊斯坦布尔及其周围流域的水资源进行评价,表示该模型可以突出城市在当前环境下的水资 源潜力和该地区水资源的时空分布特征。Zang 与 Liu<sup>[19]</sup>通过建立黑河流域的 SWAT 模型,对流域蓝绿水资 源量、总流量进行了总结,并预测了流域未来蓝绿水资源的变化趋势。

然而长期以来的研究主要关注年尺度下的蓝绿水资源量分析,无法反映蓝绿水资源在年内的变化趋势。 已有研究表明,在不同时间尺度的降雨径流对蓝绿水资源供应量和需求量的响应不同<sup>[20]</sup>。且随着蓝绿水概 念的提出,蓝绿水资源供需平衡评估也为区域水资源管理提供了新的视野和评价方法。基于此,本研究以图 们江流域(中国一侧)为研究对象,借助 SWAT 模型模拟流域水文过程并对研究区 2015—2020 年蓝绿水资源 进行定量研究,以不同的时间尺度进行蓝绿水供需评估,甄别不同时间尺度下蓝绿水资源供需平衡特征,以期 为流域水资源优化配置以及区域水资源可持续资源利用提供科学依据。

#### 1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据

1.1.1 研究区

中国一侧的图们江流域地处中朝俄三国交界地带,在东北亚生态网络中占据着重要的地位,具有丰富的 生物多样性,是《全国生态功能区划》中"长白山森林生态功能区"的重要组成部分,该流域的自然环境和生态 安全保障是跨境地区社会经济可持续发展的基础。

图们江是吉林省五大水系之一,其干流全长约 525 km。流域总面积 3.32 万 km<sup>2</sup>,其中约 2.26 万 km<sup>2</sup>的流 域在我国境内。流域属温带大陆性季风气候,季节变化明显,多年平均径流量 51.15 亿 m<sup>3</sup>,多年平均降水量 131.86 亿 m<sup>3</sup>,降水有年内分布不均的特点,每年 6—9 月降水较为集中,易导致洪涝灾害,冬季与春季降水较 少,枯水期为 1—3 月和 11—12 月,易发生湖泊萎缩、河道萎缩等水生态系统服务失衡的现象。据统计,研究 时段内每年 6—9 月的降水量约占年降水量的 50%—80%,而枯水期降水量约占年降水量的 5%—18%。土壤 类型主要有火山灰土、暗棕壤土、白浆土、黑土等。土地利用类型主要为林地,林地面积约占研究区的 79.95%。研究区概况见图 1,分别反映研究区高程图(包括用于率定的流域出口水文站)和土地利用分布 状况。



图 1 研究区数字高程及土地利用示意图 Fig.1 DEM and land use situation of the study area

#### 1.1.2 数据

如表1所示,数字高程数据来源于美国地质调查局(USGS)数据中心,空间分辨率30m×30m。土地利用 数据由Landsat8OLI遥感影像解译。土壤数据来源于联合国粮农组织(FAO)联合维也纳国际应用系统研究 所(IIASA)构建的世界土壤数据库(HWSD),其中中国地区的土壤数据源自中科院南京土壤研究所(ISSCAS) 为该组织提供的1:100万"第2次全国土壤调查"数据集;通过土壤分析软件(SPAW)计算土壤的水文属性。 气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)提供的敦化、罗子河、汪清、东岗、和龙和延吉6个气象 站2015—2020年的日值数据,包括日平均气温、平均气压、平均风速、日照时数、大型蒸发与小型蒸发、降水、 平均相对湿度等。2016—2019年流域出口水文站日径流数据从水资源公报中获取。 主 1

新田米町日本酒

次1						
Table 1   Type and source of data						
数据类型 Data types	数据分辨率 Data resolution	数据来源 Data sources				
数字高程模型 Digital elevation model(DEM)	30 m×30 m	美国地质调查局				
土地利用数据 Land use	30 m×30 m	Landsat 卫星遥感解译				
土壤数据 Soil data	1 km×1 km	中国科学院南京土壤研究所				
气象数据 Meteorological data	日 Daily	中国气象数据网				
水文站数据 Hydrologic data	日 Daily	水资源公报				

# 1.2 SWAT 模型的构建及评价

# 1.2.1 SWAT 模型构建

(1)通过基础空间或属性数据处理,建立运行模型所需的土壤数据库和气象数据库,应用 AreGIS10.2 对 土地利用数据和土壤数据进行重分类,本研究依据中国土地利用现状分类标准,将研究区土地利用类型分为 耕地、林地、草地、水域、建设用地和裸地6类,研究区土壤类型最终分为15类;完成流域水文模型设置,统一 定义流域数字高程影像数据、土地利用和土壤类型等输入数据的地理坐标系和投影坐标系,通过数字高程模 型(DEM)地形底图确定流域边界范围。

(2)将土地利用、土壤及高程数据进行叠加分析,设定合理集水面积阈值形成子流域,本研究中将中国一 侧图们江流域划分为 26 个子流域;在子流域基础上分别对土地利用、土壤及坡度设定合理阈值,完成河网的 生成,并进一步生成具有相同属性特征与水文响应过程的水文响应单元(HRUs),实现流域水循环模拟。选 取 2015 年为预热期,基于构建的气象数据库完成模型的初步运行。

#### **1.2.2** SWAT 模型评价

研究采用 SWAT-CUP 校准工具对 SWAT2012 模型运行结果进行参数敏感性分析和率定校准。基于 t 检验 与全局参数敏感性分析方法(LH-OAT)进行参数敏感性分析,从21个参数中筛选出与研究区蓝绿水资源模拟值 密切相关的13个敏感性参数变量。各参数计算代码与含义、参考变量初始范围值与最佳值等如表2所示。

Table 2         Results of the sensitivity analysis and parameters calibration for blue and green water in the river basin								
物理意义 Physical significance	参数名称 Parameter name	初始范围 Initial range	最佳值 Optimal value	敏感性排序 Sensitivity order				
SCS 径流曲线数 SCS runoff curve number	R_CN2	-0.50-0.50	0.28	1				
平均坡长 Average slope length/m	V_SLSUBBSN	10—150	61.65	2				
基流 α 因子 Baseflow alpha factor/(1/d)	V_ALPHA_BF	0—1	0.58	3				
土壤饱和水力传导系数 Soil saturated hydraulic conductivity/(mm/h)	R_SOL_K	0—1	0.01	4				
浅层地下水汇流深度 Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur/mm	V_GWQMN	0—5000	1460.35	5				
地表径流滞后时间 Surface runoff lag time/h	V_SURLAG	0.05—24	10.03	6				
地下水蒸发系数 Groundwater "revap" coefficient	V_GW_REVAP	0.02-0.20	0.15	7				
河道水力传导系数 Effective hydraulic conductivity in the main channel/(mm/h)	V_CH_K2	0.01—500	163.97	8				
土壤有效持水量 Soil available water storage capacity/(mm/mm soil)	R_SOL_AWC	0—1	0.42	9				
植被蒸发补偿系数 Plant uptake compensation factor	V_EPCO	0—1	0.33	10				
土壤蒸发补偿系数 Soil evaporation compensation factor	V_ESCO	0—1	0.23	11				
植物截留能力 Maximum canopy storage/mm	V_CANMX	0—100	41.42	12				
地下水延迟时间 Groundwater delay time/d	V_GW_DELAY	0—500	190.84	13				

表 2 流域蓝绿水参数敏感性分析及参数率定结果

R\_:表示模型初始值的相对变化值,参数的变化方式为×(1+x%);V\_:表示参数被赋予给定值;SCS-CN:径流曲线数 Soil conservation service curve number/mm;SCS:Soil Conservation Service 产流模型

#### http://www.ecologica.cn

使用确定性系数(*R*<sup>2</sup>)与 Nash-Sutcliffe 纳什效率系数<sup>[21]</sup>(NSE)评价模型模拟结果的有效性。*R*<sup>2</sup>可表现观测径流量与模拟径流量之间变化趋势的一致性,*R*<sup>2</sup>值越接近于 1,则两者趋势越吻合。NSE 可表现观测径流量与模拟径流量之间的偏离程度,NSE 值越接近于 1,则两者越相近。*R*<sup>2</sup>和 NSE 计算式分别为

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i} (Q_{\text{obs},i} - \overline{Q}_{\text{obs}}) (Q_{\text{sim},i} - \overline{Q}_{\text{sim}})\right]^{2}}{\sum_{i} (Q_{\text{obs},i} - \overline{Q}_{\text{obs}})^{2} \sum_{i} (Q_{\text{sim},i} - \overline{Q}_{\text{sim}})^{2}}$$
(1)

NSE = 1 - 
$$\frac{\sum_{i} (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{sim},i})^{2}}{\sum_{i} (Q_{\text{obs},i} - \overline{Q}_{\text{obs}})^{2}}$$
 (2)

式中,  $Q_{obs}$  为观测径流量;  $Q_{sim}$  为模拟径流量;  $\overline{Q}_{obs}$  是观测径流量平均值;  $\overline{Q}_{sim}$  为模拟径流量平均值; i 为模拟 序列长度。取  $R^2$ >0.6, NSE>0.5 为模拟结果的临界评价标准<sup>[22-23]</sup>。

绿水系数(*I*<sub>cwc</sub>)是指区域绿水资源与该地区各项水资源总量之比,用于评估流域内绿水资源量分配状况<sup>[24]</sup>。绿水系数*GW*<sub>searcity(x,t)</sub>的计算公式为:

$$I_{\rm GWC} = \frac{GW}{BW + GW} \times 100\% \tag{3}$$

式中, I<sub>cwc</sub> 绿水系数, BW 为蓝水资源量, GW 为绿水资源量。

1.3 蓝绿水资源量化与评价

根据 SWAT 模型的输出结果,蓝水资源量包括两部分:子流域产水量以及地下水补给量<sup>[18,25-28,33]</sup>,产水量即指从 HRU 流向主河道中的水。绿水资源量包括绿水流与绿水储量。蓝水、绿水量化计算方法为:

$$BW = WYLD + DA_RCHG$$
(4)

$$GW = ET + SW \tag{5}$$

式中, BW 为蓝水资源量, WYLD 为产水量, DA\_RCHG 表示模拟时间步长内的地下水补给量; GW 为绿水资源量, ET 为模拟时间步长 HRU 内的实际蒸散发, 在数值上等于绿水流; SW 为土壤处于植物凋萎系数之上的初始土壤含水量<sup>[20,29]</sup>。

# 1.4 蓝绿水供需平衡评估

利用蓝水需求量与可利用蓝水资源量的比值计算出蓝水供需评估指数在一定时间内的变化情况,有助于 对蓝水资源有计划地存储和调配。蓝水需求量包括生活用水需求量、工业用水需求量、农业用水需求量,本研 究引用 2015—2020 年水资源公报各行业用水量统计中年农田灌溉、工业及居民生活用水总量的三者月均量 之和为每月蓝水需求量,其中农田灌溉用水因其需要迎合作物发育的时间区间,根据当地农作物生长特征以 一般作物生长期(5—10月)为农田灌溉用水区间,工业用水和居民生活用水则以全年为用水区间进行计算。 每月可利用的蓝水资源量为减去环境流的蓝水资源量。蓝水供需评估指数计算公式如下<sup>[30]</sup>:

$$BW_{\text{scarcity}(x,t)} = BW_{\text{footprint}(x,t)} / BW_{\text{availability}(x,t)}$$
(6)

式中,  $BW_{\text{scarcity}(x,t)}$  为 x 地区 t 时段蓝水资源供需评估指数,  $BW_{\text{footprint}(x,t)}$  为蓝水需求量,  $BW_{\text{availability}(x,t)}$  为可利用 蓝水资源量。

维持生态所需的蓝水资源量被称为环境流。采用 Richter B 等<sup>[31]</sup>提出的方法对环境流进行计算,环境流 占总径流的 80%,剩余的 20%的径流量将作为可利用的蓝水资源供人们使用。环境流与可利用蓝水资源量 之间存在的计算关系为:

$$\mathrm{EFR}_{(x,t)} = 0.8Q_{(x,t)} \tag{7}$$

$$BW_{\text{availability}(x,t)} = Q_{(x,t)} - \text{EFR}_{(x,t)}$$
(8)

式中,  $EFR_{(x,t)}$  为 x 地区 t 时段内环境流量,  $Q_{(x,t)}$  为自然径流量,  $BW_{availability(x,t)}$  为可利用蓝水资源量。

绿水供需平衡评估通过比较绿水的消耗量(即绿水需求量)与绝对绿水的供应量(即初始土壤湿度)可评估某地域内可用的绿色水资源被占用程度<sup>[20]</sup>。SWAT模拟结果得出的初始土壤水含量被视为可利用的绿水

资源量,由分析结果中的 SW 得出;存储于土壤根部,被植物用于蒸发蒸腾的水量视为绿水需求量,可从 HRU 输出结果中获取实际蒸发产量 ET<sup>[30,32-33]</sup>。绿水供需评估指数计算公式如下:

$$GW_{\text{scarcity}(x,t)} = GW_{\text{footprint}(x,t)} / GW_{\text{availability}(x,t)}$$
(9)

式中,  $GW_{\text{scarcity}(x,t)}$  为 x 地区 t 时段内绿水资源供需评估指数,  $GW_{\text{footprint}(x,t)}$  为绿水需求量,  $GW_{\text{availability}(x,t)}$  可利用 绿水资源量。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 SWAT 模型的验证

通过 SWAT-CUP 流域出口水文站月尺度和日尺度下的径流量实测值与 SWAT 模拟径流值进行率定和验证后,结果如图 2 和表 3 所示,两种时间尺度的模拟结果均达到可信程度,径流参数满足模型模拟适用性评价标准。可见,构建的 SWAT 模型可较好模拟图们江流域径流变化状况,可进一步应用于蓝绿水资源的研究。 2.2 蓝绿水资源特征

2.2.1 蓝绿水年资源量

表 3 水文站在校准期和验证期的模拟结果

图 3 年际蓝绿水资源量与降水量图中,年蓝水资源 <sup>T</sup> 量平均值为 30.14 亿 m<sup>3</sup>,其中最大值出现在 2016 年,为 35.56 亿 m<sup>3</sup>,最小值为 2015 年的 23.02 亿 m<sup>3</sup>。绿水资 源量比较稳定,平均值为 87.02 亿 m<sup>3</sup>,2020 年绿水资源 量有最大值 98.85 亿 m<sup>3</sup>,最小值出现在 2016 年,为 82.14 亿 m<sup>3</sup>。

图们江流域蓝绿水资源量年平均值为 117.16 亿

able 3	The simulati	ion results in	n calibration	n and valida	tion period
		月尺度 Monthly		日尺度 Daily	
		$R^2$	NSE	$R^2$	NSE
率定期	]	0.92	0.92	0.77	0.77

0.87

0.82

0.74

NSE:纳什效率系数 Nash-Sutcliffe

0.94

Calibration period

Validation period

验证期







m<sup>3</sup>,其中绿水资源量占74.27%,蓝水资源量占25.73%,年均绿水资源量为蓝水资源量的2.89倍,可见绿水资 源是图们江流域水资源的主要组成部分。这与东北温带季风气候区的汤河流域<sup>[34]</sup>、细河流域<sup>[35]</sup>和太子河流 域<sup>[36]</sup>的绿水资源量相似。将绿水资源纳入流域水资源管理系统可以有效拓宽区域可利用水资源的范围。 2.2.2 蓝绿水月资源量

在图 3 的月尺度蓝绿水资源量变化趋势图中可以看出不同月份蓝绿水资源量有显著差异,且均具有明显的季节性变化特征。研究时段内月尺度下的蓝水资源量与降水量的变化趋势大体一致,每年蓝水资源的峰值出现在不同的月份,一般在每年丰水期的 7—8 月有最大值,2020 年出现在 9 月;蓝水资源量最小值常在枯水期的 1 月份出现,2015 年和 2020 年最小值出现在 4 月。但其中 2017 年 10 月份到次年 2 月,出现了长期的蓝水资源量极端值,连续 5 个月的蓝水资源量的平均值仅为 5.44 mm,这受当年降水量少的因素影响较大。

绿水资源量最大值出现在9月份,最小值出现在枯水期的12月份至次年1月份。绿水资源量呈现明显的先上升后下降的年内变化趋势,进入夏季丰水期绿水资源量达到峰值后开始下降,且与绿水流的变化趋势基本一致。这是因为绿水资源的主要成分绿水流和绿水储含量与土地覆被和气候有关,夏季植物蒸腾作用较强使绿水流出现较高值,又图们江流域植被覆盖率高,林地对水源有一定的涵养和保护作用,绿水储量较多且随季变化。







#### 2.3 蓝绿水资源供需平衡评估

#### 2.3.1 年蓝绿水资源供需平衡评估

水资源供需平衡评估可以判断需求量与供应量之间的关系,有助于水资源的有效调配。图4中研究区 2015—2020年蓝水资源的供需评估结果显示,研究时段内蓝水需求量均大于可利用蓝水资源量,且降水量较低的年份蓝水稀缺程度较高,降水量最高的年份蓝水稀缺程度最低,研究期内降水较少的2015年和2017年 蓝水供需评估指数均大于2,2020年蓝水供需评估指数接近于2,为1.83;降水量最多的2018年蓝水供需评估 指数最低,为1.43。这是由于蓝水资源量与降水量相关,降水量多则流域产水量多,可利用蓝水资源量的增加 使蓝水供需评估指数降低。

从图 4 中 2015—2020 年绿水资源供需评估结果可见,绿水供需评估指数多集中在 0.1—0.2 之间,说明可利用绿水资源量普遍高于绿水需求量,且变化趋势较为平稳,这与研究区植被覆盖率较高有关<sup>[37]</sup>。结合图 2 中的土地利用图可知,图们江流域内森林覆被和农业用地是主要的土地利用类型,林地占地 79.95%,耕地占地 14.45%。森林和农地对水源的涵养作用及降水截留功能使地表径流更多地转变成绿水储量,可利用绿水资源较为丰富。

2.3.2 蓝绿水资源月供需平衡评估

蓝水资源的月供需评估结果(图5)显示图们江流域内蓝水资源严重短缺,导致频繁的可利用蓝水资源量



Fig.4 The yearly blue and green water supply and demand balance from 2015-2020 in the study area

少于需求量的情况,甚至 2017 年 10 月到 2018 年 2 月发生连续 5 个月的缺水现象,而且在研究时段内极端值 发生频率较高,枯水期的时间普遍较长。研究区年内蓝水资源量在整体上呈现先升高后降低的变化特征,在 每年的 7 月或 8 月份达到最高的可利用蓝水资源量,此时蓝水资源供需接近平衡。而在 10 月到次年 2 月期 间的枯水期出现可利用蓝水资源量最低值,满足不了该月份的蓝水需求量。



图 5 2015—2020 年研究区月尺度蓝水资源供需平衡评估 Fig.5 Assessment of monthly blue water supply and demand balance in the study area from 2015 to 2020

图们江流域降水集中发生在丰水期,且研究期间的丰水期较为短暂(6—9月),但春季到夏季却是农作物 生长的关键时期,需要大量的农业用水,这时候的蓝水需求量会增多。由于可利用蓝水资源量多集中在7月 或8月,导致可利用蓝水资源量与蓝水需求量在时间分配上的不均衡,引起水资源分配不合理。在实际的水 资源管理中为了减少生活、农业与工业用水的压力,用于生态用水的水量仅为4%,这会影响到该流域的生态 安全。

研究区的绿水供需评估指数集中在 0—0.4 区间(图 6),表明可利用的绿水资源量高于绿水需求量。绿水供需评估指数呈现较明显的季节性变化特征,2015—2020 年每年的供需评估指数高峰期稍有不同,但是趋势大致相似。在每年 11 月到次年 3 月,流域内的绿水需求量普遍偏低,主要是由于该季节不处于作物集中生育期,蒸散发消耗量很低,此时绿水需求量小于可利用绿水资源量,导致整个研究区供需评估指数较低。随着气温回升、降水增多,植物逐渐进入生长期,植物的蒸腾作用加强使蒸散发量增加,绿水需求量随之增加。每年的 6 月份绿水供需评估指数会有回落,这与进入汛期,此阶段植物蒸散发量的消耗程度较降水的增加程度相对较弱有关。绿水供需评估指数在 8—9 月达到峰值后随着植物蒸腾作用的慢慢减弱导致绿水需求量减

少,使绿水供需评估指数开始呈现递减趋势。整体上图们江流域的绿水资源供需平衡安全性较高,有较大的

绿水需求量 可利用绿水资源量 供需评估指数 Green water resource/( $\times 10^6 \text{m}^3$ ) 4500 3600 Green water scarcity 绿水资源量 绿水供需评估指 2700 1800 900 2016-07 2016-09 2016-09 2016-11 2017-01 2017-03 2017-07 2017-05 2017-09 2017-09 2018-09 2017-09 2018-0 2019-03 2019-05 2019-07 2019-07 2019-09 2015-09 2016-05 2018-11 2019-01 5-1 2016-03 2016-0 2020-0 2019-1 201 时间 Time (年-月)

图 6 2015—2020 年研究区月尺度绿水资源供需平衡评估



# 3 讨论

#### 3.1 多时间尺度供需特征比较分析

流域蓝绿水资源在不同时间尺度下呈现不同的供需平衡状态。以年为研究尺度时,水资源总量随着降水 量的变化而变化。其中蓝水资源受降水量影响较大,而绿水资源年际变化较小,与研究区森林覆被面积较大 有关。这与在黄河源区<sup>[38]</sup>,南方地区北江流域<sup>[39]</sup>、东江流域<sup>[22]</sup>,北方地区细河流域<sup>[35]</sup>、太子河流域<sup>[36]</sup>,以及 南非的林波波河(Limpopo)流域<sup>[40]</sup>,伊斯坦布尔内流域<sup>[18]</sup>等相关研究中的观点一致。在蓝绿水资源供需评 估结果中,年降水量较低的2015年、2017年、2020年的蓝水供需不平衡现象更为明显。与在湘江流域的相关 研究中,气候变化情景下降水的增多缓解了当地农业灌溉用水,减轻了蓝水资源利用的压力[41],使蓝水稀缺 程度下降的分析相似。而绿水资源的供需较为稳定,一方面与研究区林地面积广使可利用绿水资源量较为稳 定有关;另一方面地区农业生产并不密集,即使在生育期绿水储量相较于作物的蒸散发消耗来说尚足。这与 萨凡纳河(Savannah)流域<sup>[30]</sup>和皮拉西卡巴河(Piracicaba)流域<sup>[32]</sup>内受密集的农业耕作影响而导致区域绿水 供需不平衡现象较为显著的研究结果类比具有相似性。

以月为时间尺度时,图们江流域降水量以及蓝水绿水资源量年内起伏较大,降水量最高的月份可达240 mm,最低的月份降水量仅为 0.09 mm,降水主要集中在每年的 7 月、8 月或 9 月。每年蓝水资源峰值出现在降 水量最大的月份,与同是北方流域的卢氏流域<sup>[42]</sup>和细河流域<sup>[35]</sup>的蓝水资源量峰值变化趋势相似。研究区可 利用蓝水资源与蓝水需求较大的时期并不匹配,导致蓝水供需在时间分配上的不均衡,可利用蓝水资源量少 于其需求量的情况频繁发生。绿水资源的年内变化与植被生长有一定的关系,林地对水源有一定的涵养和保 护作用,绿水储量较多且有季节性变化趋势,绿水供需平衡安全性较高。相似地,在林地占比约为60%的太 子河流域<sup>[36]</sup>绿水储量相较于绿水和绿水流年内分配较为均匀。在 Savannah 流域<sup>[30]</sup>的季度分析结果中,地区 夏季和秋季初是绿水供需不平衡相对显著的区间,与本研究的研究结果相似。相较于以季节为尺度,以月度 为尺度的水资源供需平衡评估更有利于地区的农业规划,通过月尺度的分析可以体现年内蓝绿水资源的变化 特征,有助于全面评价流域内蓝绿水供需平衡。图们江流域是延边州内城市生活用水和工农业用水的主要来 源之一,近年来却时常发生河流断流现象。目前对于图们江地表径流的研究较为集中,而有关蓝绿水资源的 相关研究尚浅,本文以蓝绿水资源为切入点为研究区水资源综合管理提供材料和建议,望未来可以结合不同 学科对地区蓝绿水资源开展更丰富的研究。



资源利用潜力。



#### 3.2 蓝绿水资源的合理利用

在蓝水利用方面,当没有把维持河流生态环境的生态用水计算到供需评估时蓝水资源量基本能够满足图 们江流域的农业、生活、工业用水需求。本研究的蓝水资源量供需评估考虑到了生态用水需求,可利用蓝水资 源量满足不了地区蓝水资源需求量,导致蓝水资源供需严重失衡。且研究区地处我国北方,淡水资源仅为南 方水资源的 1/4<sup>[43]</sup>,在实际的水资源管理当中,为了满足用水需求,大部分蓝水资源贮存在水库,用于储备枯 水期用水,实际生态用水量仅为每年水资源总量的 5%,导致部分支流的干枯。图 7 显示了图们江流域中游开 山屯和南坪水文站的 2015—2019 年河流流量实测值与多年平均河流流量比较结果。与过去 30 年平均流量 相比,除了 2016 年外,2015—2019 年均出现了丰水期河流流量低于多年平均值的情况,导致河道狭窄,生态 环境受到严重的威胁。在 Cachoeira 水库<sup>[32]</sup>的相关研究中更是探讨了每月的环境流量需求以及忽视生态用 水的风险,以期在社会用水需求和河流保护现状之间达到适当平衡。

生态用水是水资源管理中用以保障恢复与维持生态系统健康发展所需的水量<sup>[44]</sup>。图们江流域是"长白山森林生态功能区"的重要组成部分,具有丰富的生物多样性,图们江支流的生态流量与流域生态环境息息相关<sup>[45]</sup>。因此,依据地区的农业灌溉现状和经济可行性评估,建议制定地区生态用水标准。同时可以通过合理调整农作物种植结构提高蓝水资源利用率。





研究区内绿水资源较为丰富且供需平衡安全性较高,但绿水资源的开发潜力还没有受到重点关注。绿水 主要成分绿水储存在于土壤非饱和层,属于难以移动性资源,相较于可移动性资源蓝水相比其机会成本较低。 研究区内林地面积约占研究区的 4/5,耕地面积约为 1/8,植物的蒸腾作用及林地涵养水源功能都会影响流域 内绿水资源的变化。因此,可以通过保护自然林地的同时植树造林增加林地覆被、促进农田连片提高降水下 渗率与土壤渗透性、应用地膜覆盖控制无效蒸发、增施有机绿肥保持土壤健康等措施加强对绿水资源的 管理<sup>[46]</sup>。

地区水资源管理应更新传统的水资源管理思维,加快绿水资源纳入水资源管理的步伐。优化管理并合理 开发蓝绿水资源,使蓝绿水需水量与供应量保持平衡,促进实现人与自然和谐共生的远景目标。

# 4 结论

本文以中国一侧图们江流域为研究对象,基于 SWAT 模型对 2015—2020 年流域的水文过程进行模拟,以 年和月的不同时间尺度分析研究区蓝绿水资源量以及供需平衡评估,主要结论如下:

(1)图们江流域 2015—2020 年年均蓝绿水资源量为 117.16 亿 m<sup>3</sup>,年均蓝水资源量 30.14 亿 m<sup>3</sup>,占年均 总水资源的 25.73%。年均绿水资源量 87.02 亿 m<sup>3</sup>,绿水系数达 74.27%,绿水资源是图们江流域水资源的主要组成部分,年内蓝绿水资源均具有明显的季节性变化特征。

(2)年尺度下的蓝水资源供需评估结果显示研究时段内大部分年份的蓝水供需评估指数集中在 1—2 之

3125

间,可利用蓝水资源量难以满足其需求量。在月尺度的分析中出现蓝水供需在时间分配上的不均衡现象。

(3)年尺度下绿水供需评估指数多集中在 0.1—0.2 之间,可利用绿水资源量普遍高于绿水需求量,且变 化趋势较为平稳。在月尺度的分析中绿水资源供需平衡安全性较高,受降水及蒸腾作用影响,有明显的季节 性变化趋势。

(4)图们江流域在水资源分配方面为了满足生活、农业、工业用水需求量,几乎忽略生态用水,导致部分 支流的干枯,影响到流域的生态安全。因此,应合理开发利用蓝绿水资源,加大对生态用水的投入,提升水资 源用水效率。

#### 参考文献(References):

- [1] 夏军,翟金良,占车生.我国水资源研究与发展的若干思考.地球科学进展,2011,26(9):905-915.
- [2] 田晶, 郭生练, 刘德地, 陈启会, 王强, 尹家波, 吴旭树, 何绍坤. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响. 地理学报, 2020, 75 (11): 2307-2318.
- [3] 郝璐, 孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述. 生态学报, 2021, 41(1): 13-26.
- [4] Veettil A V, Mishra A K. Potential influence of climate and anthropogenic variables on water security using blue and green water scarcity, Falkenmark index, and freshwater provision indicator. Journal of Environmental Management, 2018, 228: 346-362.
- [5] Falkenmark M. Coping with water scarcity under rapid population growth. Pretoria: Conference of SADC Ministers, 1995: 23-24.
- [6] Falkenmark M. Growing water scarcity in agriculture: future challenge to global water security. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2013, 371(2002): 20120410.
- [7] Rockström J. On-farm green water estimates as a tool for increased food production in water scarce regions. Physics and Chemistry of the Earth B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 1999, 24(4): 375-383.
- [8] Falkenmark M, Rockström J. The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(3): 129-132.
- [9] Faramarzi M, Abbaspour K C, Schulin R, Yang H. Modelling blue and green water resources availability in Iran. Hydrological Processes, 2009, 23 (3): 486-501.
- [10] Douglas-Mankin K R, Srinivasan R, Arnold J G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: Current Developments and Applications. Transactions of the ASABE, 2010, 53(5): 1423-1431.
- [11] 许炯心. 黄河中游绿水系数变化及其生态环境意义. 生态学报, 2015, 35(22): 7298-7307.
- [12] 林长清,周天逸,任立良,江善虎,刘懿,龚露燕.绿水评估方法研究进展.水资源保护,2014,30(3):85-89.
- [13] Guevara-Ochoa C, Sierra A M, Vives L. Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains. Science of the Total Environment, 2020, 722; 137886.
- [14] 祖拜代・木依布拉,师庆东,普拉提・莫合塔尔,张润.基于 SWAT 模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响. 生态学报, 2018,38(14): 5149-5157.
- [15] 王中根,朱新军,夏军,李建新. 海河流域分布式 SWAT 模型的构建. 地理科学进展, 2008, 27(4): 1-6.
- [16] 冯畅. 变化环境下涟水流域蓝水绿水资源的响应特征分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018.
- [17] 徐宗学, 左德鹏. 拓宽思路, 科学评价水资源量——以渭河流域蓝水绿水资源量评价为例. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 12-16, 49.
- [18] Cuceloglu G, Abbaspour K, Ozturk I. Assessing the Water-Resources Potential of Istanbul by Using a Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrological Model. Water, 2017, 9(10): 814.
- [19] Zang C F, Liu J G. Trend analysis for the flows of green and blue water in the Heihe River basin, northwestern China. Journal of Hydrology, 2013, 502: 27-36.
- [20] Xie P X, Zhuo L, Yang X, Huang H R, Gao X R, Wu P T. Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: a case for the Yellow River Basin. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125222.
- [21] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [22] 吕乐婷, 王晓蕊, 江源, 孙才志. 基于 SWAT 模型的东江流域蓝水、绿水时空分布特征研究. 水资源保护, 2017, 33(5): 53-60.
- [23] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.

- [24] 杨柏. 辽河流域蓝水绿水时空分布特征探究. 水利技术监督, 2019(3): 167-170.
- [25] Schuol J, Abbaspour K C, Yang H, Srinivasan R, Zehnder A J B. Modeling blue and green water availability in Africa. Water Resources Research, 2008, 44: W07406.
- [26] Zhao A Z, Zhu X F, Liu X F, Pan Y Z, Zuo D P. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China. CATENA, 2016, 137: 318-327.
- [27] 杨肖丽,李文婷,任立良,高甜,马慧君.渭河流域蓝绿水对土地利用变化的响应模拟.农业工程学报,2021,37(11):268-276.
- [28] Du L Y, Rajib A, Merwade V. Large scale spatially explicit modeling of blue and green water dynamics in a temperate mid-latitude basin. Journal of Hydrology, 2018, 562: 84-102.
- [29] DeLiberty T L, Legates D R. Interannual and seasonal variability of modelled soil moisture in Oklahoma. International Journal of Climatology, 2003, 23(9): 1057-1086.
- [30] Veettil A V, Mishra A K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts. Journal of Hydrology, 2016, 542: 589-602.
- [31] Richter B D, Davis M M, Apse C, Konrad C. A presumptive standard for environmental flow protection. River Research and Applications, 2012, 28(8): 1312-1321.
- [32] Rodrigues D B B, Gupta H V, Mendiondo E M. A Blue/Green Water-based Accounting Framework for Assessment of Water Security. Water Resources Research, 2014, 50(9): 7187-7205.
- [33] Abbaspour K C, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, Kløve B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology, 2015, 524: 733-752.
- [34] 韩月驰. 气候变化与人类活动对汤河流域蓝水绿水资源的影响[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2021.
- [35] 王晓蕊. 细河流域蓝水绿水时空变化研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2019.
- [36] 苑晨. 基于 SWAT 模型的太子河流域景观格局对绿水资源影响研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2021.
- [37] Glavan M, Pintar M, Volk M. Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments—lessons for the future. Hydrological Processes, 2013, 27(26); 3964-3980.
- [38] 李文婷,杨肖丽,任立良,高甜,顾玉娇.基于 SWAT 模型的黄河源区蓝/绿水资源时空分布特征研究.中国农村水利水电,2021(8): 59-66.
- [39] 高艺桔,周月英,刘祖发,符洪恩,黄婕茵,冯莹莹.基于 SWAT 的北江流域蓝绿水评估及其干旱响应.长江科学院院报,2021,38(6): 18-26.
- [40] Mosase E, Ahiablame L, Srinivasan R. Spatial and temporal distribution of blue water in the Limpopo River Basin, Southern Africa: A case study. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, 19(2): 252-265.
- [41] Liang J, Liu Q, Zhang H, Li X D, Qian Z, Lei M Q, Li X, Peng Y H, Li S, Zeng G M. Interactive effects of climate variability and human activities on blue and green water scarcity in rapidly developing watershed. Journal of Cleaner Production, 2020, 265: 121834.
- [42] 甄婷婷,徐宗学,程磊,王洁.蓝水绿水资源量估算方法及时空分布规律研究——以卢氏流域为例.资源科学,2010,32(6):1177-1183.
- [43] 朱达, 唐亮, 谢启伟, 马梅, 饶凯锋. 基于数据包络分析方法的城市水资源利用效率研究. 生态学报, 2020, 40(6): 1956-1966.
- [44] Covich A. Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Resources. Water and Ecosystems. New York: Oxford University Press, 1993: 40-55.
- [45] 李连侠. 图们江流域主要支流生态环境需水量研究[D]. 延吉: 延边大学, 2013.
- [46] 冯畅, 毛德华, 杨柳, 周慧, 胡光伟. 绿水资源研究进展及评述. 中国农业资源与区划, 2020, 41(1): 173-184.