

王子尧, 左其亭, 巴音吉, 等. 基于 SWAT 和 STIRPAT 模型的沁河流域生态基流保障及人为影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1119-1128. WANG Z Y, ZUO Q T, BA Y J, et al. Ecological base flow guarantee and human influencing factors in Qinhe River basin based on SWAT and STIRPAT models[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1119-1128. (in Chinese)

# 基于 SWAT 和 STIRPAT 模型的沁河流域生态基流保障及人为影响因素

王子尧<sup>1</sup>, 左其亭<sup>1,2</sup>, 巴音吉<sup>3</sup>, 程琰<sup>1</sup>, 纪义虎<sup>1</sup>

(1. 郑州大学水利与交通学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院, 郑州 450001;  
3. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 在新型人水关系下, 人为因素对生态基流的影响逐步加大, 正确分析人为影响因素对流域生态基流保障的影响, 并尽快制定流域生态基流保障程度的量化方法对流域生态保护具有重要意义。利用土壤和水评估工具(soil and water assessment tool, SWAT)模拟河流径流量, 进一步计算生态基流保障指数(ecological base flow guarantee index,  $I_{EBFG}$ ), 以反映生态基流保障程度, 在此基础上采用随机回归影响模型(stochastic impacts by regression on population affluence and technology, STIRPAT)从人口规模、经济发展水平、技术发展水平、城镇化水平以及各行业用水水平等方面分析 2008—2016 年沁河流域生态基流保障指数影响因素。结果表明: 沁河流域生态基流保障程度在年尺度上呈现“N”型增加趋势, 2015 年因干旱导致大幅下跌, 在月尺度上与沁河汛期、早期同步变化; 从上游至下游, 流域生态基流保障程度逐渐变好, 干流流经的子流域生态基流保障程度比支流好; 全流域范围内生态基流保障程度“差”与“较差”区域占比高于 50%, 仅 2014 年出现“一般”, 流域生态基流保障程度亟待提升; 城镇化水平对沁河流域生态基流保障程度影响最大, 农业、工业、生活用水量影响程度较大且贡献率相似, 技术发展水平次之, 人口规模与经济发展水平对沁河流域生态基流保障程度的影响相对较小。研究结果可为沁河流域生态基流保护、流域协调发展提供基础支持, 并可为其他流域的生态基流保障程度计算以及评价提供思路。

**关键词:** 沁河流域; SWAT 模型; 生态基流保障; STIRPAT 模型; 影响因素分析

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0111

水资源作为地球上最宝贵的资源之一, 扮演着维持生态平衡、保障人类生存和促进经济社会发展的关键角色, 是我国一项重要的战略性资源<sup>[1]</sup>。然而, 在全球极端自然灾害频发以及人类对水资源过度开发利用的环境下, 部分河流年内水量分布不均, 无法常年满足生态基本用水量<sup>[2]</sup>, 生态环境问题日渐成为流域高质量发展、可持续发展的关键问题<sup>[3]</sup>。生态基流作为维持生态健康所需的水量, 可以作为定量分析生态基流保障程度的重要因素, 是衡量流域生态健康程度、辨别生态系统能否长期正常运行的关键<sup>[4]</sup>。

为解决流域生态问题并推动流域高质量发展, 国内外学者提出众多河道生态基流类似概念, 如最小河流需水量<sup>[5]</sup>, 即河流满足生态需求保持的最小流量; 后来, 人们通过对低流量、高流量脉冲以及洪水等天然水文要素的研究, 发现天然水文情势对河流生态系统的完整性同样起到重要作用<sup>[6]</sup>, 由此提出环境流量概念。然而, 不同研究对环境流量存在不同解释, 有专家认为环境流量一方面要从水量与水质两方面保障河流生物生态系统健康, 另一方面要能防治海水入侵等自然灾害影响。大自然保护协会(the Nature Conservancy, NC)则将环境流量定

收稿日期: 2024-03-20 修回日期: 2024-09-24 网络出版时间: 2024-09-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240926.1158.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200201); 中国工程科技发展战略河南研究院战略咨询研究项目(2024HENYB01); 中国地质调查局项目(DD20220885)

作者简介: 王子尧(2001—), 男, 河南郑州人, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: [wziyao2023@163.com](mailto:wziyao2023@163.com)

通信作者: 巴音吉(1989—), 男, 山东东营人, 工程师, 主要从事自然资源综合调查与要素综合观测研究。E-mail: [Geobayinji@163.com](mailto:Geobayinji@163.com)

义为维持淡水生态系统的物种、功能和弹性以及河流下游维持人类生计用水所需要的径流条件<sup>[7]</sup>,生态基流则由环境流量衍生而来。由此可见,生态基流及其相关概念研究历史悠久,内涵不断完善,然而诸多相关概念并未提及人类整体性影响与其河道内径流条件本质。因此,将生态基流定义为自然条件下维持河道内生态系统健康,受人类活动影响的河道径流条件,基于生态系统健康是河流健康的最高目标<sup>[8]</sup>,为达成此目标,生态基流量应满足河道生态完整性、物种多样性等需求,本文将该部分流量称之为生态基流。生态基流的计算一直是国内外学者的研究热点,如: Bianucci 等<sup>[9]</sup>利用水资源分配模型(water allocation and planning assessment, WAAPA)来估计水资源可得性,进而计算生态基流; Mussehl 等<sup>[10]</sup>构建生态学模型模拟不同生态基流下的生态保持状况,并利用贝叶斯条件概率网络(conditional probability network, CPN)分析生态因基流量不同造成的影响;田沉等<sup>[11]</sup>利用改进的 Tennant 法计算汾河流域生态基流;刘欢等<sup>[12]</sup>根据中国河流的不同分区以及分类确定生态基流占比阈值。尽管计算生态基流至关重要,但为了更好地满足现实需求、解决实际问题,学者们开始对其影响因素展开研究,如: Stucchi 等<sup>[13]</sup>通过分析不同流速、泥沙量影响下的生态基流量对环境的影响;陈浩等<sup>[14]</sup>考虑海水入侵河道内水体盐度改变对漳卫新河河口段生态基流的影响;李凯轩等<sup>[15]</sup>通过分析大型水利工程对生态基流的影响,计算洞庭湖全年生态基流最佳值。然而,如何具体量化生态基流保障程度、综合考虑多重因素对生态基流保障程度的影响仍然有待进一步研究。

基于此,提出生态基流保障指数(ecological base flow guarantee index,  $I_{EBFG}$ )来表示流域生态基流保障程度,通过土壤和水评估工具(soil and water assessment tool, SWAT)的输出数据计算沁河流域  $I_{EBFG}$ ,量化沁河流域生态基流保障程度;在此基础上,结合随机回归影响模型(stochastic impacts by regression on population affluence and technology, STIRPAT)和岭回归方法分析人为因素对沁河流域生态基流保障程度的影响,以期对沁河流域生态保护和高质量发展提供理论支持。

## 1 流域概况及数据来源

### 1.1 沁河流域概况

沁河属黄河一级支流,发源于山西省沁源县西

北太岳山东麓的二郎神沟,地处  $34^{\circ}54'N\sim 36^{\circ}57'N$ 、 $111^{\circ}58'E\sim 113^{\circ}29'E$ ,其流经山西、河南 2 个省并最终于武陟县方陵村汇入黄河,以沁河流域 5 个地市为研究区,分别为焦作、济源、晋城、临汾、长治。沁河全长 485 km,流域面积  $13\,535\text{ km}^2$ <sup>[16]</sup>,见图 1。沁河为周边生态环境的保护起到了重要支撑作用,其早期汛期分明,是极具代表性的北方河流,但近年来沁河流域内存在生态环境恶化现象<sup>[17]</sup>,无法长时间保障沁河流域生态基流。

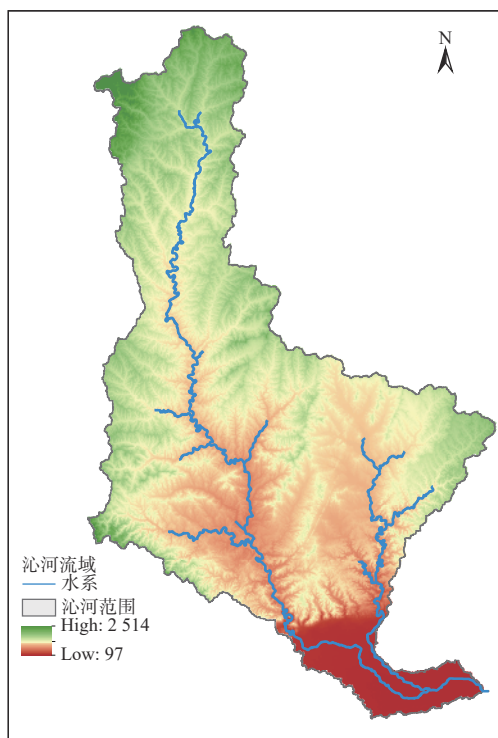


图 1 沁河概况图及子流域划分

Fig. 1 General map of Qinhe River

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 SWAT 模型相关数据

SWAT 模型可以通过数字高程(DEM)、土地利用、土壤、气象数据进行构建,并利用 SWAT-CUP 软件结合实测水文数据进行模型的率定与验证<sup>[18]</sup>。各数据来源见表 1。

#### 1.2.2 STIRPAT 模型相关数据

随机回归影响模型(STIRPAT 模型)可选取多种因素,包括经济层面、人口层面、技术层面等对分析对象进行相关性分析<sup>[19]</sup>,本文结合沁河流域 5 个地市年鉴资料以及水资源公报中的各地级市 GDP、人口、城镇化率、万元 GDP 用水量、农业用水量、工业用水量以及生活用水量进行影响因素分析。各数据来源见表 2。

表 1 SWAT 模型输入数据

Tab. 1 SWAT model input data

数据名称	数据描述	数据来源
DEM数据	分辨率90 m	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
土地利用数据	分辨率1 km	中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
土壤数据	分辨率1 km	中国科学院资源环境科学数据中心( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )
气象数据	2008—2016年中国大气同化驱动数据集	国家青藏高原科学数据中心( <a href="https://westdc.westgis.ac.cn/">https://westdc.westgis.ac.cn/</a> )
水文数据	2008—2016年孔家坡、润城、武陟、五龙口水文站月平均径流量实测数据	中华人民共和国水文年鉴

表 2 STIRPAT 模型输入数据

Tab. 2 STIRPAT model input data

数据名称	数据来源
GDP/亿元	河南省统计年鉴、山西省统计年鉴
年末人口数/万人	河南省统计年鉴、山西省统计年鉴
城镇化率/%	河南省统计年鉴、山西省统计年鉴
万元GDP用水量/m <sup>3</sup>	河南水资源公报、山西水资源公报
农业用水量/亿m <sup>3</sup>	河南水资源公报、山西水资源公报
工业用水量/亿m <sup>3</sup>	河南水资源公报、山西水资源公报
生活用水量/亿m <sup>3</sup>	河南水资源公报、山西水资源公报

## 2 研究方法

研究思路如下:第一部分,根据表 1 中相关数据构建沁河流域 SWAT 模型并对其进行率定与验证;第二部分,利用模型进行数据模拟,并利用所得数据计算沁河流域  $I_{EBFG}$  以量化沁河流域生态基流保障程度;第三部分,选取不同人为影响因素,结合 STIRPAT 模型与岭回归方法对沁河流域生态基流保障程度进行人为影响因素分析。具体研究框架见图 2。

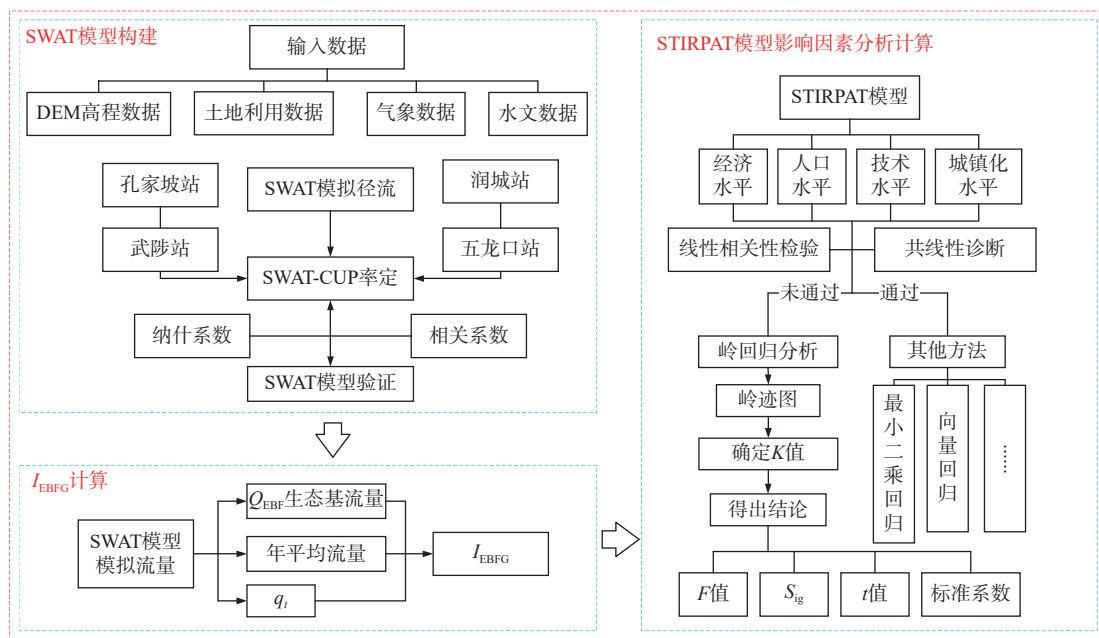


图 2 研究框架

Fig. 2 Research framework

### 2.1 SWAT 模型构建

SWAT 模型在水文模拟领域应用广泛,优势突出。首先,其介于分布式模型和集总模型之间,既考虑到流域内空间异质性,又避免了分布式模型复杂的数据需求与计算负担。其次,将流域划分为若干水文响应单元(HRUs),进而详细地模拟子流域内部的水文过程。综合来说,SWAT 模型在数据要求、

计算效率、空间异质性以及适用性方面展现出显著优势<sup>[20]</sup>,并有模拟精度高、应用灵活、开源且易与其他模型耦合等特点,被广泛应用于水文模拟<sup>[21]</sup>,其建立步骤包括 DEM 数据的处理、土壤数据库的构建、气象数据库的构建以及 SWAT-CUP 软件的率定和验证。利用 SWAT 模型模拟沁河流域 2008—2016 年径流量,其中将 2008—2009 年设定为预热期,选



取 2010—2014 年为率定期,划分 23 个子流域与 617 个水文响应单元(HRUs),利用 SWAT-CUP 软件结合实测水文数据,对 13 个参数进行率定并迭代并选取最优参数,选取 2015—2016 年为验证期,验证模型;采用相关系数  $R^2$ 、纳什效率系数  $E_{NS}$  检验模型模拟效果。

### 2.2 $I_{EBFG}$ 计算方法及保障程度划分

$I_{EBFG}$  是由平均径流量与生态基流的比值与平均径流量满足生态基流量的次数之间的关系计算所得,该指数的大小决定生态基流能否受到保障并实现其生态作用,见公式(1),其取值范围为 0~1,数值越大表示生态基流保障程度越高。生态基流保障指数的生态效益主要通过生态基流表现,而生态基流的生态效益主要表现为自然条件下维持河道内生态系统健康、满足河道生态完整性、物种多样性等需求。

根据 SWAT 模型输出结果计算生态基流保障指数,公式为

$$I_{EBFG(x,t)} = 1 - \frac{Q_{avg(x,t)}/Q_{EBF(x,t)}}{(Q_{avg(x,t)}/Q_{EBF(x,t)}) + q_t/m_t} \quad (1)$$

式中: $I_{EBFG(x,t)}$ 为时间  $t$  期间  $x$  子流域的生态基流保障指数; $Q_{avg(x,t)}$ 和  $Q_{EBF(x,t)}$ 是  $x$  子流域在时间  $t$  期间的多年平均径流量和生态基流量,两者的比值为多年平均径流量与生态基流的倍数,倍数越大保障程度越高,从而以量的角度描述生态基流保障程度; $q_t$ 是径流量大于  $Q_{EBF}$  的次数, $m_t$ 为研究期内总月数,假设生态基流完全未受到保障,则  $Q_{EBF}$  皆大于径流量,即  $q_t=0$ 、 $q_t/m_t=0$ ,表现为对生态基流的破坏,两者比值从数的角度描述生态基流保障程度。将 2 种比值结合,从数、量两方面提出复合指数  $I_{EBFG}$  以表征区域、流域生态基流保障程度。结合生态基流概念与沁河流域现状,左其亭等<sup>[22]</sup>将沁河流域生态基流量化为多年平均径流的 64.1%,即  $Q_{EBF}=0.641Q_{avg}$ 。

结合  $I_{EBFG}$  指数计算结果及其具体内涵,将  $I_{EBFG}$  指数划分为 8 个等级,见表 3。

表 3  $I_{EBFG}$  等级划分

Tab. 3  $I_{EBFG}$  classification

$I_{EBFG}$ 指数	[0, 0.05)	[0.05, 0.10)	[0.10, 0.20)	[0.20, 0.30)	[0.30, 0.40)	[0.40, 0.60)	[0.60, 0.80)	[0.80, 1.00]
等级	很差	差	较差	一般	较好	好	很好	非常好

### 2.3 STIRPAT 模型计算方法

IPAT 模型最早由 Ehrlich 和 Holdren 提出,用于分析经济、人口等因素对环境的影响<sup>[22]</sup>。且已有部分学者<sup>[23]</sup>利用 IPAT 模型解决水资源问题,其表达式为

$$W = PTA \quad (2)$$

式中: $W$ 为分析对象; $P$ 为人口规模; $A$ 为经济发展水平; $T$ 为技术发展水平。

由公式(2)可知,如果仅将  $P$ 、 $T$ 、 $A$  这 3 个因子简单相乘,则表示  $P$ 、 $T$ 、 $A$  三因素对  $W$  的影响程度等价,三者之间为同比线性关系,忽略了各影响因素的非单调、不同比例变化,或者说各因素之间的弹性过于单一,存在不合理性<sup>[24]</sup>。因此, Dietz 等<sup>[25]</sup>提出了其改进形式,即 STIRPAT 模型,它提供了一种灵活且广泛适用的框架,对模型的扩展与综合分析起到极大帮助;其次, STIRPAT 模型采用回归分析方法,能够处理复杂的非线性关系和多重交互作用,适用于不同环境变量的研究;此外,该模型具备随机性特点,减少数据需求量并增强模型的鲁棒性。综合而言, STIRPAT 模型在灵活性、适用性、处理复杂关系和不确定性等方面展现出显著优势,其表达式为

$$W = aP^bT^cA^de \quad (3)$$

式中: $W$ 、 $P$ 、 $T$ 、 $A$  意义同公式(2),  $a$  为模型的系数; $b$ 、 $c$ 、 $d$  为各自变量指数; $e$  为误差。针对沁河流域生态基流保障指数分析,将 STIRPAT 模型扩展为

$$I_{EBFG} = aP^bT^cA^dU^fN^hG^iS^je \quad (4)$$

为减小数量级以及波动的影响,对等式两边同取对数:

$$\ln I_{EBFG} = \ln a + b \ln P + c \ln T + d \ln A + f \ln U + h \ln N + i \ln G + j \ln S + \ln e \quad (5)$$

式中: $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $f$ 、 $h$ 、 $i$ 、 $j$  为方程回归系数,分别反映人口因素  $P$ 、经济发展因素  $A$ 、技术发展因素  $T$ 、城镇化水平  $U$ 、农业用水  $N$ 、工业用水  $G$ 、生活用水  $S$  对  $I_{EBFG}$  的影响程度。若回归系数为正值则表示自变量对因变量起正向促进作用,若为负值则表示起负向抑制作用<sup>[26]</sup>。人口因素直接影响水资源需求,促进各用水要素之间的竞争,从而对生态基流构成压力;经济发展通常伴随资源消耗,对水资源需求的加剧导致挤占生态用水;技术发展应用高新技术产业减少水资源浪费的同时可能带来水污染与水资源过度开发等问题,从而对生态环境构成威胁;城镇化一方面通过集中管理和现代化设施提高水

资源利用效率,改善水资源分配,有助于生态基流保障,另一方面增加了生活和工业用水需求,改变了自然水循环,可能对生态基流造成不利影响;农业用水、工业用水与生活用水与生态用水之间体现为竞争关系,分析各部门用水关系有利于制定公平的水资源分配制度,促进生态基流保障。综上,这些因素通过不同途径影响水资源的使用和管理,综合考虑这些因素有助于全面理解和分析生态基流保障程度的人为影响。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 SWAT 模型率定与验证结果

选取沁河流域孔家坡、武陟、润城和五龙口 4 个水文站的月径流量数据进行模型的率定与验证,通过 SWAT-CUP 对参数进行反复率定迭代并验证,结果表明 4 个水文站的  $R^2$  和  $E_{NS}$  符合模型评估标准(表 4),模型模拟效果较好。

表 4 沁河流域不同水文站月径流模拟率定与验证结果

Tab. 4 Simulation and verification results of monthly runoff from different hydrological stations in Qinhe River basin

水文站	率定期		验证期		模型评估
	$R^2$	$E_{NS}$	$R^2$	$E_{NS}$	
孔家坡	0.76	0.60	0.80	0.66	可信
武陟	0.77	0.51	0.85	0.61	可信
润城	0.55	0.52	0.87	0.83	可信
五龙口	0.66	0.48	0.87	0.77	可信

#### 3.2 $I_{EBFG}$ 时空特征分析

##### 3.2.1 时间变化趋势

基于沁河流域旱涝分明,径流量年内、年际变化大的特点,结合本文的计算结果,从不同时间尺度以及保障程度等级划分方面分析沁河流域生态基流保障程度的变化。图 3 表示沁河流域  $I_{EBFG}$  指数时间变化趋势以及生态基流保障程度等级划分。

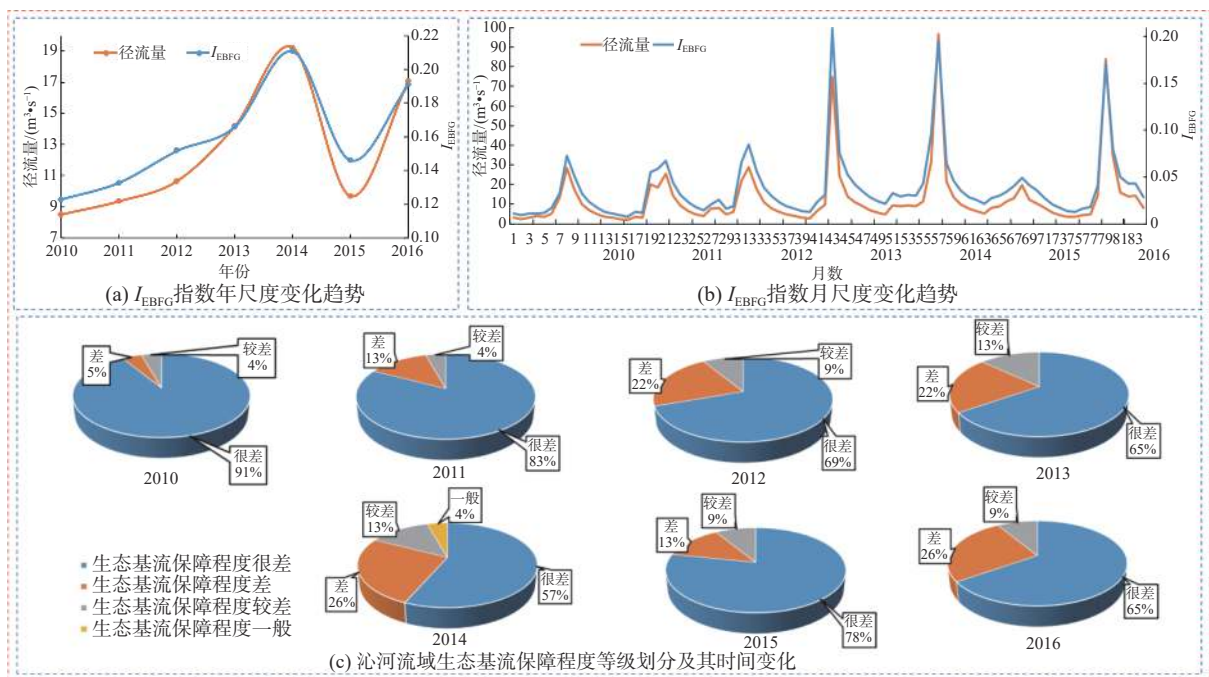


图 3  $I_{EBFG}$  时间变化趋势以及等级划分

Fig. 3  $I_{EBFG}$  time change trend and grade division

由图 3(a)可知,2010—2016 年沁河流域  $I_{EBFG}$  指数与径流量呈强正相关关系,且两者的时间变化趋势均整体呈“N”字型。具体来看, $I_{EBFG}$  从 2010 年的 0.12,逐年增长至 2014 年的 0.21 达到峰值,2015 年出现严重下跌,此后又呈增长趋势。沁河流域生态基流保障程度整体呈现上升趋势的原因可能为其流域整体协调发展使整体生态基流保障程度向好,而 2015 年沁河流域发生干旱现象,且气象干旱为主要因素<sup>[27]</sup>,导致沁河流域 2015 年生态

基流保障程度大幅减小。由图 3(b)可知,沁河流域  $I_{EBFG}$  指数在年内呈现周期性波动。每年 7—10 月为汛期,沁河流域河道内水量较大,能够满足生态用水,生态基流保障程度较高;反之,每年 1—6 月为旱期,河道内水量较小,生态基流保障程度较小,导致沁河流域生态系统受到破坏。由图 3(c)可得,7 年来,沁河流域生态基流保障程度处于很差与差的区域占比一直高于 50%。其中,2010 年生态基流保障程度很差与差的区域共占比 91%,

仅 2014 年出现生态基流保障程度一般状况, 占比仅为 4%, 生态基流保障程度堪忧。其主要原因: 沁河流域经济生态发展不平衡加剧导致生态恶化、水源涵养量较少<sup>[28]</sup>, 加之人类活动以及对水资源的持续开采不断冲击原有的生态环境, 导致沁河流域本就不充裕的水资源难以满足生态需求, 导致生态基流保障程度偏低。

### 3.2.2 空间分布特征

为体现沁河流域生态基流保障指数的空间分布差异, 基于公式(1)计算 2010—2016 年  $I_{EBFG}$  指数结果, 利用 SWAT 模型中划分的子流域模块, 将沁河流域分成 23 个子流域, 进一步计算各子流域的生态基流保障指数, 利用 ArcGIS 10.2 绘制年尺度  $I_{EBFG}$  空间分布图, 见图 4。

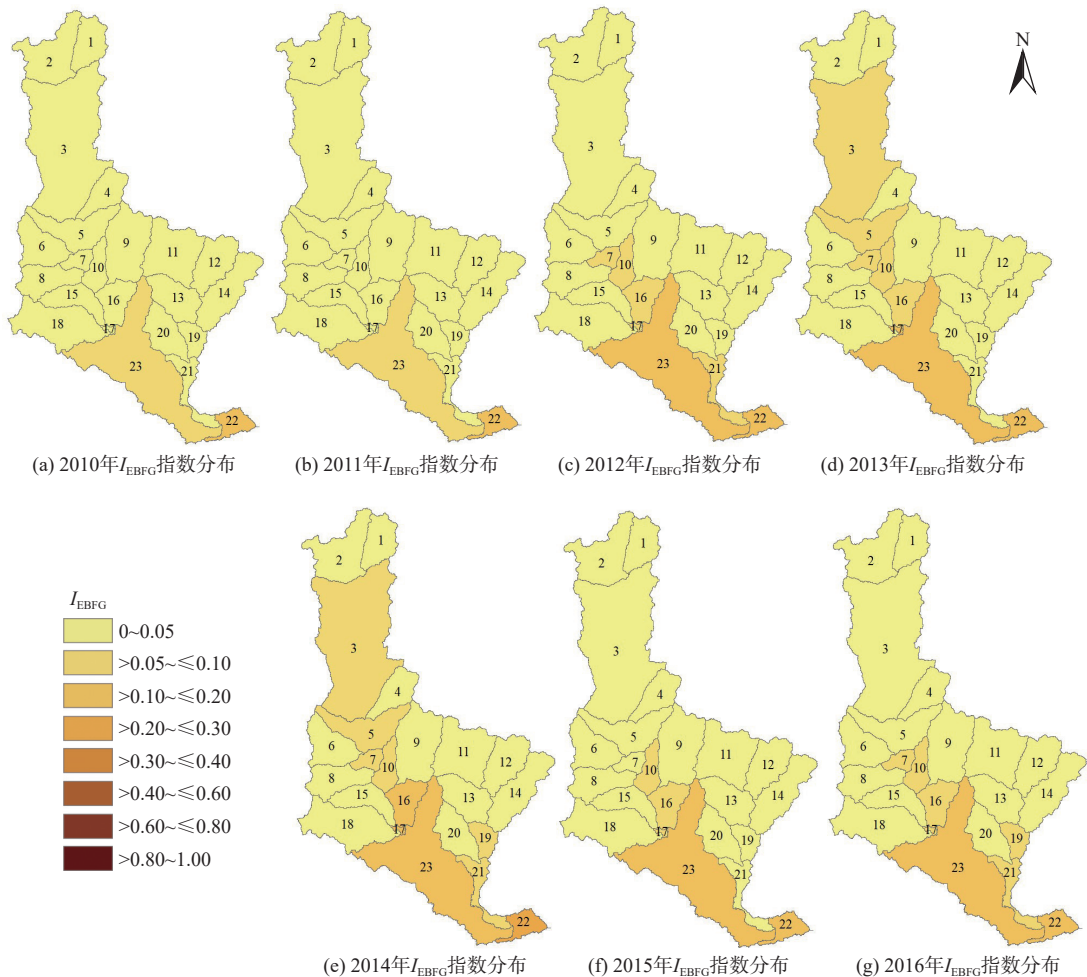


图 4  $I_{EBFG}$  空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of  $I_{EBFG}$

图 4(a)~(g) 分别为 2010—2016 年  $I_{EBFG}$  空间分布图, 由图可知, 整体上, 沁河流域  $I_{EBFG}$  在空间上表现为自上游至下游生态基流保障程度逐渐增加, 自干流至支流逐渐减小, 其主要原因为上游地区以及中游东西部地区河道内流量较小, 难以满足该地区的生态基本用水。具体而言, 沁河流域上游 1、2 号子流域长期处在生态基流保障程度较低水平, 而邻近的 3 号子流域生态基流保障程度却远大于 1、2 号子流域, 其主要原因为 3 号子流域内包含汾河、沁河两大水系, 水量较为丰富, 能在一定程度上满足生态基流。9、12、15、20 号子流域为沁河流域生

态基流保障程度较差的子流域, 其  $I_{EBFG}$  范围为 0.01~0.03, 分析原因可知, 这些子流域地处山西省境内, 山西省是全国最缺水的省份之一<sup>[29]</sup>, 一方面, 降水量少是导致干旱的主要原因, 间接影响该地区的生态系统保障程度, 另一方面, 山西省过量的煤炭资源开采导致水资源结构型污染, 加剧生态恶化和生态功能型缺水, 生态基流保障程度低。此外, 沁河流域河南段位于流域下游, 生态基流保障程度相对较好, 其主要原因为河南省整体气候较好, 水土保持程度较高。然而, 河南省焦作市境内的 21 号子流域生态基流保障程度相对较差, 其主要影响因



素为焦作市庞大的人口规模以及人口密度造成较大的人口压力,导致环境压力增加,使生态基流保障程度减小<sup>[30]</sup>。

### 3.3 基于 STIRPAT 模型的影响因素分析

#### 3.3.1 变量相关性检验及线性诊断

变量之间的相关性表示两个或多个变量之间的密切程度,通常用相关系数来衡量。相关系数绝对值越接近 1,表明变量之间的相关性越强,相关系数绝对值越接近 0,表明变量之间的相关性越弱,不适合进行相关性分析<sup>[31]</sup>。多重共线性是指多元回归中

多个预测变量之间的高度线性相关现象,会导致回归模型参数差异较大,使回归模型的稳定性降低<sup>[32]</sup>。因此,为正确地估计模型的参数,需对每个变量进行相关性检验以及多重共线性诊断,可以通过衡量变量间的相关系数与方差膨胀因子( $V_{IF}$ )来检验:如果相关性系数绝对值小于 0.5,说明变量间存在不相关性;如果变量存在  $V_{IF}$  大于 10,则说明存在多重共线性<sup>[33]</sup>。利用 SPSS 27 软件进行相关性分析以及共线性诊断,结果见表 5、表 6。

表 5 相关性检验结果

Tab. 5 Correlation test result

变量	$\ln I_{EBFG}$	$\ln A$	$\ln P$	$\ln T$	$\ln U$	$\ln N$	$\ln G$	$\ln S$
$\ln I_{EBFG}$	1							
$\ln A$	0.805	1						
$\ln P$	0.778	0.837	1					
$\ln T$	-0.816	-0.660	-0.583	1				
$\ln U$	0.802	0.877	0.995	-0.637	1			
$\ln N$	-0.675	0.613	0.501	0.421	0.483	1		
$\ln G$	-0.401	-0.600	-0.929	0.573	-0.894	-0.511	1	
$\ln S$	0.553	0.780	0.964	-0.560	0.962	0.683	-0.897	1

表 6 共线性诊断结果

Tab. 6 Collinear diagnosis results

变量	容差	$V_{IF}$
$\ln A$	0.053	18.853
$\ln P$	0.001	839.375
$\ln T$	0.187	5.355
$\ln U$	0.001	1 115.859
$\ln N$	0.004	560.250
$\ln G$	0.002	1 012.898
$\ln S$	0.001	3 986.200

由表 5 可知,各变量之间相关性较强,表示各变量之间存在紧密关系,存在分析价值;由表 6 可知,其中除  $\ln T$  外,其余变量  $V_{IF}$  值均大于 10,说明这几组变量之间存在严重的多重共线性,若此时直接进行回归分析,精确度将会大幅降低,估计值稳定性变差,导致回归结果不可信<sup>[34]</sup>,因此使用岭回归方法进行回归计算。

#### 3.3.2 岭回归分析 STIRPAT 模型拟合结果

岭回归方法的本质是改良版的最小二乘法<sup>[35]</sup>,该方法通过为不同变量增加非负因子  $K$ ,从而减小各变量间的共线性关系,提高回归计算的稳定性。

岭回归方法作为一种用于处理共线性数据的有偏估计回归方法,关键在于合理地确定岭回归系数  $K$ ,结合各变量间的岭迹图发现,当岭回归系数  $K$  取 0.16 时 7 个变量相对稳定。岭回归拟合具体结果见表 7。

表 7 岭回归计算结果

Tab. 7 Ridge regression results

变量	回归系数 $B$	标准误差	标准系数 $B_{sta}$	$t$ 值	$S_{ig}$
$\ln A$	0.104 5	0.033 5	0.103 7	3.120 2	0.052 5
$\ln P$	0.110 6	0.024 5	0.108 9	4.520 3	0.020 2
$\ln T$	-0.131 6	0.016 9	-0.129 9	-7.783 2	0.004 4
$\ln U$	0.172 0	0.020 9	0.168 9	8.242 0	0.003 7
$\ln N$	-0.151 3	0.015 9	-0.147 7	-9.521 7	0.002 5
$\ln G$	-0.160 8	0.023 7	-0.158 9	-6.775 8	0.006 6
$\ln S$	0.166 4	0.019 3	0.163 1	8.620 4	0.003 3

从表 7 可知,7 个变量  $S_{ig}$  值最大值为 0.052 5,表明岭回归结果至少通过了 94.75% 水平的显著性检验,决定系数  $R^2$  为 0.963,表明 7 个自变量拟合所得方程可以解释 96.3% 的生态基流保障指数变化。由此可知,模型拟合效果较好,回归方程解释性显著,基于岭回归模拟的 STIRPAT 模型具体形式为

$$\ln I_{\text{EBFG}} = -0.1 + 0.10 \ln A + 0.11 \ln P - 0.13 \ln T + 0.17 \ln U - 0.15 \ln N - 0.16 \ln G + 0.16 \ln S \quad (6)$$

从系数大小来看,城镇化率对  $I_{\text{EBFG}}$  的影响程度最大,农业用水量、工业用水量以及生活用水量对  $I_{\text{EBFG}}$  影响较大且三者的影响程度相似,技术发展水平、经济发展水平与人口规模对沁河流域生态基流保障程度影响相对较小,经济水平、人口规模、城镇化率以及生活用水对  $I_{\text{EBFG}}$  的影响趋势为正向,技术发展、农业用水以及工业用水对  $I_{\text{EBFG}}$  指数的影响趋势为负向。因此,当其他影响因素不变时,年末人口数每增加 1%,  $I_{\text{EBFG}}$  相应增加 0.11%, 人口规模的增加表示更多人才的输入以及对生态基流保护的关注度提高,有利于流域生态基流保障程度提高。GDP 每增加 1%,  $I_{\text{EBFG}}$  相应增加 0.10%, 经济发展水平的提高表示对生态保护的经济投入提高,更好地保护生态基流。万元 GDP 用水量每减小 1%,  $I_{\text{EBFG}}$  相应增加 0.13%, 万元 GDP 用水量减小代表用水效率增加,侧面反映技术水平提高,技术水平的提高能够促进生态环境的可持续发展,增强生态韧性,提高生态基流保障程度。城镇化率每增加 1%,  $I_{\text{EBFG}}$  相应增加 0.17%, 城镇化进程会促进农村结构转型,农业产业结构以及农业生产方式的改变会减少用水浪费与水资源面源污染,使更多水量用于维护流域生态环境,生态基流保障程度增加。农业用水量每减少 1%,  $I_{\text{EBFG}}$  相应增加 0.15%, 工业用水量每减少 1%,  $I_{\text{EBFG}}$  相应增加 0.16%, 农业与工业为用水量较高的产业,二者的增加会挤占生态用水,导致生态基流保障程度受到威胁。生活用水量每增加 1%,  $I_{\text{EBFG}}$  相应增加 0.16%, 生活用水量的提高侧面反应生活水平的提高、个人节水意识的提高与水资源浪费的减少,从而促进生态基流保护,使生态基流保障程度提高。综上所述,城镇化率与各行业用水量对沁河流域生态基流保障程度的影响要比人口规模、GDP 以及技术水平发展的影响程度要大,因此在解决沁河流域生态基流保障程度较差问题时应重点关注技术与科技进步、各行业节约集约用水等相关问题。

## 4 结论

本文利用 SWAT 模型对沁河流域的径流进行模拟,然后进一步计算  $I_{\text{EBFG}}$ , 以此反映沁河流域生态基流保障程度,最后利用 STIRPAT 模型从人口规模、经济水平、技术水平、城镇化水平等方面对  $I_{\text{EBFG}}$  进

行影响因素分析,主要结论如下:

由  $I_{\text{EBFG}}$  时间变化可知:沁河流域生态基流保障指数年际变化呈“N”字型,年内变化与汛期、早期变化同期;沁河流域大部分时段生态基流保障程度为“较差”与“差”,仅 2014 年出现“一般”。

由  $I_{\text{EBFG}}$  空间分布可知,沁河流域生态基流保障程度从上游至下游逐渐变好,沿干流向支流逐渐变差,不同省市之间差距较大,且沁河流域整体生态基流保障程度相对较差,生态问题亟须解决。

由岭回归分析结果可知,城镇化率对沁河流域生态基流保证程度影响最大,农业、工业、生活用水影响程度较大且相似,技术发展水平次之,人口规模与 GDP 对沁河流域生态基流保障程度的影响相对较小。

## 参考文献:

- [1] 左其亭,吴青松,金君良,等. 区域水平衡基本原理及理论体系 [J]. *水科学进展*, 2022, 33(2): 165-173. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.001.
- [2] 左其亭,王骄阳,杨峰,等. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(2): 13-19. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2022.02.003.
- [3] 樊霖,严婷婷,孙天合,等. 敦煌水资源合理利用与生态保护规划实施效果评价研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(8): 140-151. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.08.014.
- [4] 徐宗学,武玮,于松延. 生态基流研究: 进展与挑战 [J]. *水力发电学报*, 2016, 35(4): 1-11. DOI: 10.11660/slfdbx.20160401.
- [5] GLEICK P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use [J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 571-579. DOI: 10.2307/2641249.
- [6] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity [J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507. DOI: 10.1007/s00267-002-2737-0.
- [7] POFF N L R, MATTHEWS J H. Environmental flows in the Anthropocene: Past progress and future prospects [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 667-675. DOI: 10.1016/j.co-sust.2013.11.006.
- [8] 孙然好,魏琳沅,张海萍,等. 河流生态系统健康研究现状与展望: 基于文献计量研究 [J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3526-3536. DOI: 10.5846/stxb201903250560.
- [9] BIANUCCI P, SORDO-WARD A, LAMA-PE-



- DROSA B, et al. How do environmental flows impact on water availability under climate change scenarios in European basins? [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 911: 168566. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168566.
- [10] MUSSEHL M, WEBB J A, HORNE A, et al. Balancing observational data and experiential knowledge in environmental flows modeling [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 173: 105943. DOI: 10.1016/j.envsoft.2024.105943.
- [11] 田沉, 付兴涛. 基于改进 Tennant 法的汾河生态基流研究 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40(9): 44-47. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212396.
- [12] 刘欢, 胡鹏, 王建华, 等. 中国河流分区分类生态基流占比阈值确定 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 748-756. DOI: 10.13476/j.cnki.ns-bdqk.2022.0076.
- [13] STUCCHI L, BOCCHIOLA D. Environmental flow assessment using multiple criteria: A case study in the Kumbih River, West Sumatra (Indonesia) [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 901: 166516. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166516.
- [14] 陈浩, 徐宗学, 侯昕玥, 等. 考虑海水入侵影响的漳卫新河河口生态基流研究 [J]. *水力发电学报*, 2019, 38(7): 11-20. DOI: 10.11660/slfdx.20190702.
- [15] 李凯轩, 李志威, 胡旭跃, 等. 洞庭湖区三口水系生态基流研究 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(8): 19-24. DOI: 10.11988/ckyyb.20200549.
- [16] 纪义虎, 左其亭, 马军霞. 基于 Tapio 和 LMDI 模型的沁河流域碳排放与水资源利用脱钩关系分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 94-101. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.012.
- [17] 秦西, 张羽, 马军霞, 等. 基于 SWAT 的沁河流域水资源生态足迹计算及承载程度分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(6): 1-9. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2023.06.01.
- [18] ARNOLD J G, WILLIAMS J R, MAIDMENT D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1995, 121(2): 171-183. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1995)121:2(171).
- [19] 张娜, 赵琳, 商文颖, 等. 基于 STIRPAT 模型的大连市全流程碳足迹溯源 [J]. *中国电力*, 2024, 57(1): 133-139. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202310008.
- [20] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. *地理科学进展*, 2003(1): 79-86. DOI: 10.11820/dlkxjz.2003.01.010.
- [21] 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. DOI: 10.11820/dlkxjz.2003.05.001.
- [22] 左其亭, 全志森, 吴青松, 等. 经济社会与生态用水平衡计算规则与方法 [J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 1-10. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2024.03.001.
- [23] 王康. 基于 IPAT 等式的甘肃省用水影响因素分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(6): 148-152. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2011.06.024.
- [24] POUMANYVONG P, KANEKO S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO<sub>2</sub> emissions? A cross-country analysis [J]. *Ecological Economics*, 2010, 70(2): 434-444. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.09.029.
- [25] DIETZ T, ROSA E A. Effects of population and affluence on CO<sub>2</sub> emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(1): 175-179. DOI: 10.1073/pnas.94.1.175.
- [26] 张鑫, 费可可. 基于 log 鲁棒核岭回归的子空间聚类算法 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023, 53(6): 26-34. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.284.
- [27] 许拯民, 林睿, 左向菊, 等. 基于 SWAT 模型的沁河流域短中长期综合干旱指数构建及适用性分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(6): 76-83.
- [28] 张乐开, 左其亭, 钟涛, 等. 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析及其预测 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 862-872. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0084.
- [29] 岳江, 王红霞, 王馨茹, 等. 山西省 7 条河的流域水生态承载力评估 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1235-1248. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0122.
- [30] 李文忠, 马志林, 张玉顺, 等. 焦作市水资源的优化配置研究 [J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(6): 12-17. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.06.003.
- [31] 韦晓伟, 张洪波, 辛琛, 等. 变化环境下流域气象水文要素的相关性演化 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 17-26. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0112.
- [32] DORMANN C F, ELITH J, BACHER S, et al. Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance [J]. *Ecography*, 2013, 36(1): 27-46. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x.
- [33] 黄蕊, 王铮. 基于 STIRPAT 模型的重庆市能源消费碳排放影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2013, 33(2): 602-608. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2013.02.029.
- [34] 杨楠. 岭回归分析在解决多重共线性问题中的独特作用 [J]. *统计与决策*, 2004, 20(3): 14-15. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6487.2004.03.007.

[35] 郭卫华, 周永章, 阚兴龙. 1990—2012 年广东省废水排放特征及其驱动因素: 基于 STIRPAT 模型和

脱钩指数的研究 [J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 7-10. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2015.02.002.

## Ecological base flow guarantee and human influencing factors in Qinhe River basin based on SWAT and STIRPAT models

WANG Ziyao<sup>1</sup>, ZUO Qiting<sup>1,2</sup>, BA Yinji<sup>3</sup>, CHENG Yan<sup>1</sup>, JI Yihu<sup>1</sup>

( 1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China )

**Abstract:** It is of great significance to accurately analyze the influence of human factors on the ecological base flow guarantee of watershed and to develop the quantitative method of ecological base flow guarantee degree. Soil and water assessment tool (SWAT) was employed to simulate river flows, and to compute the ecological base flow guarantee index ( $I_{EBFG}$ ) for assessing the extent of ecological base flow protection. The analysis was underpinned by the stochastic impacts by regression on population affluence and technology (STIRPAT) model, thus, evaluating the effects of population size, economic development level, technological development level, urbanization level and water consumption level of various industries. In the methodological approach, the SWAT model was utilized to simulate the river runoff within the Qin River basin. While the subsequent calculations of the  $I_{EBFG}$  provided a quantifiable measure of the ecological base flow's security. Additionally, the STIRPAT model facilitated an in-depth analysis of the driving factors affecting ecological base flows, categorizing them into demographic, economic, technological, and urban metrics.

Results revealed a N-shaped increase trend in the ecological base flow guarantee level within the basin on an annual scale, with a notable decrease in the year 2015, attributed to severe drought conditions. Monthly variations were found to correspond with the seasonal cycles of floods and dry periods within the Qin River. An improvement in ecological base flow guarantee levels were observed from the upstream to downstream sections of the basin. Mainstream sub-basins demonstrated superior ecological base flow protection compared to their tributary counterparts. More than half of the regions within the Qin River basin were classified under "poor" or "relatively poor" categories concerning ecological base flow protection, with an exception in the year 2014, which showed a "normal" status. Among the studied factors, urbanization exhibited the most significant impact on ecological base flow security, followed by technological development, on the other hand the population size and economic growth had less pronounced effects.

It is concluded that the urbanization level along with agricultural, industrial and domestic water use has the greatest influence on the ecological base flow guarantee degree, followed by the technological development level, and the population size and economic development level which have relatively little influence on the ecological base flow guarantee degree in the Qinhe River basin. The findings underscore the necessity for integrated approaches in river basin management to balance developmental and ecological needs. The research results provide a basis for ecological base flow protection and coordinated development of the Qinhe River basin, and also provide a way to calculate and evaluate the ecological base flow guarantee degree of other river basins.

**Key words:** Qinhe River basin; SWAT model; ecological base flow guarantee; STIRPAT model; influencing factor analysis