

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.015

福建省域河流生态流量监管与控制目标核定

李扬¹,孙翀¹,刘涵希²

(1. 水利部水利水电规划设计总院,北京 100120; 2. 福建省水利水电勘测设计研究院,福建 福州 350001)

摘要:通过梳理福建省河流水系基本特征及提炼总结生态流量控制断面选取原则,筛选出不同控制目标需求的4个类别44处生态流量控制断面;综合河流生态保护需求与工作基础条件,采用水文学方法分析,确定各断面生态流量控制目标。对控制断面分布密度进行检验,以及根据水资源配置格局与工程调度能力对生态流量控制目标合理性进行检验,结果表明,断面设置与生态流量控制目标成果合理有效,可以满足福建省作为国家生态文明试验区的有关生态流量监管要求。

关键词:生态流量;省域河流;河流控制断面;控制目标;断面密度;入海水量;福建省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)02-0092-05

Supervision of river ecological flow and verification of control objectives in Fujian Province // LI Yang¹, SUN Chong¹, LIU Hanxi² (1. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 2. Fujian Institute of Water Resources and Hydropower Survey and Design, Fuzhou 350001, China)

Abstract: By combing the basic characteristics of river system in Fujian Province and summarizing the selection principle of ecological flow control section, four categories and 44 ecological flow control sections with different control objectives were selected. Based on the requirement and working conditions of river ecological protection, the control objectives of ecological flow in each section are determined by hydrological analysis. The distribution density of control section is tested, and the rationality of ecological flow control target is tested according to water resources allocation pattern and project dispatching ability. The results show that section setting and ecological flow control goal are reasonable and effective, which can meet the requirement of national ecological civilization experimental area in Fujian Province.

Key words: ecological flow; provincial rivers; river controlling section; control objectives; section density; quantity of water entering sea; Fujian Province

福建省位于我国东部沿海地区,陆地面积12.4万km²,东隔台湾海峡与台湾地区相望,是我国南方地区重要的生态屏障,境内多山,河谷和盆地串珠状分布其间,山地丘陵约占全省土地总面积83%,居我国东南沿海各省之首,具有“八山一水一分田”的显著特点,素有“东南山国”之称。

2016年8月,中共中央办公厅、国务院办公厅联合印发《关于设立统一规范的国家生态文明试验区的意见》及《国家生态文明试验区(福建)实施方案》,将福建省纳入全国首批生态文明试验区,要求先行先试,探索生态文明建设新模式,培育加快绿色发展新动能,开辟实现绿色惠民新路径。在全省范围内强化河流生态流量监管,合理选定控制断面,核定断面生态流量,是落实生态文明试验区涉水生态

空间管控要求的直接抓手,是合理控制用水规模与调节水文节律的重要手段,是维护河湖水系生态安全的有力保障^[1-4]。

福建省近年来围绕生态流量监管开展了一系列有关控制断面选取与生态流量核定工作。在2012年编制完成的福建大水网规划中,将莒口、棉花滩水库等4处生态流量控制断面作为规划水资源配置的边界条件,4处断面均仅考虑全年期一致的生态基流控制目标。在2014年完成的福建省水资源保护规划中,在全省选定23处控制断面,并提出了全年期一致的生态流量控制目标。福建省在水电站的生态流量监管方面也开展了大量的工作,2012年原福建省环境保护厅出台了《福建省水电站下泄流量在线监控运行考核办法》,对117座各类电站提出全

作者简介:李扬(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事水资源保护的研究和管理工作。E-mail:liyong@giwp.org.cn

年期一致的生态流量控制目标,近年来又不断扩大监管范围。然而现有监管工作中普遍存在的问题,一是监管控制断面缺乏合理分类,断面的代表性与分布密度难以实现全面监管与重点监管的协调统一;二是断面控制目标设置相对简单,全部是采用全年期一致的单一控制目标,水电站监管对象虽多,但几乎全部采取多年平均流量的10%作为生态流量控制目标,不能满足国家生态文明试验区对生态用水保障的示范性要求。

生态流量控制断面的选取、分类与分期控制目标的核定,是生态流量监管的主要工作内容。在福建省内核定的控制目标则是国家生态文明试验区生态流量监管的重要依据。本文根据落实最严格生态环境保护的有关要求,核定生态流量控制断面及其控制目标。

1 福建河流基本特征

福建省属亚热带海洋性季风气候,雨量充沛,多台风,全省范围内多年平均降水量1000~2200 mm,降水量时空分配不均,年内年际变化大,空间上内陆山区降水量高于沿海。福建省水系发育,河网密度大。境内河流总长约1.3万 km,河网密度超过0.1 km/km²。受断裂构造的控制,全省主要河流多与山脉走向垂直,支流与山脉平行,形成典型的外流区单向性的格状水系;河流属山区性河流,多峡谷险滩,河床比降大,加上境内降水量大,径流量相当丰富^[5-6]。

福建省河流除闽江、赛江部分支流发源于浙江省,龙岩汀江流入广东省,龙岩及南平部分河流流入长江、钱塘江外,其余均发源于福建省,独流入海。流域面积在50 km²以上的河流共有683条,其中流域面积在500 km²以上的一级河流有闽江、九龙江、汀江、晋江、赛江、敖江、霍童溪、木兰溪、诏安东溪、漳江、萩芦溪、龙江等12条,流域面积在5000 km²以上的重要河流有闽江、九龙江、汀江、晋江和赛江等5条。从水资源分区来看,全省7个划入水资源二级的区分为4个流域片区:闽江片区、闽南诸河片区、闽东诸河片区、韩江流域片区,另有钱塘江、鄱阳湖和台澎金马诸河占比很小,三者合计仅占总面积的1.1%。

闽江为福建省最大河流,发源于武夷山脉上游,主要支流有富屯溪、建溪、沙溪,南平以下纳尤溪、古田溪、大樟溪等支流,最后流经福州马尾入海,全长515 km,多年平均径流量为575.78亿 m³,流域面积60992 km²,占全省面积的48.3%。

闽南诸河片包括龙江、晋江、木兰溪、九龙江及

其他独流入海的较小河流,约占全省总面积的28.8%。闽东诸河片包括赛江、霍童溪、敖江及其他独流入海较小河流,约占全省总面积的12.0%。韩江流域片包括汀江干支流及中山河,约占全省总面积的9.8%。

福建省河流具有“流域完整,源短流急,水量充沛,阻隔重重”的基本特征。由于地形特点,福建省界与闽江等河流流域边界高度重合,闽江流域98.2%的流域面积位于福建省内,九龙江、晋江等河流全流域均位于福建省内;赛江、汀江为省界河流,位于福建省内的流域范围上下游衔接连续完整。由于东南丘陵区沿海分布的地貌特征,河流流域面积较小,流程短、比降大,福建省是全国小水电建设密度最高的省份之一,全省共有6600余座水电站,密布于大小河流干支流之上,生境阻隔问题突出。

2 生态流量控制断面选取

生态流量控制断面通常需要具备3个主要特征:①具有长系列水文资料,或具备通过水文比拟推导的条件;②上游有控制性枢纽工程;③有监控手段,不论是上游紧邻的工程还是本断面,应具备流量监测能力。

2.1 控制断面选取原则

a. 落实生态空间管控要求。所选生态流量控制断面可以全面覆盖纳入水生态红线管控范围的水域,通过断面流量(水量)管控以保障红线区域生态要求。红线区域的生态流量控制目标普遍高于一般管控水域空间的目标。

b. 统筹覆盖全面与突出重点。全面覆盖福建省八大水系以及流域面积500 km²以上的独流入海河流,闽江、九龙江全面覆盖主要支流,对于水生态环境敏感、水资源开发程度高的重点区域适当加密断面布控。

c. 体现有效管理与高效监控。优先利用现有水文站、重要控制节点水库或水电站以及规划大型水库作为生态流量控制断面,这类断面选取的代表性好,并有较长系列水文资料,可以充分利用现有水文资料分析制定生态流量,并且具备未来实行监管的基础条件。

2.2 控制断面分类与核定

考虑到福建省河流的基本特征,闽江、晋江、九龙江等完整较大流域需设置覆盖上中下游及干支流的控制断面,因而需要具有普遍代表意义的生态流量控制断面和入海水量控制断面。对于众多流域面积较小、河长较短的独流入海河流,可将生态流量与入海水量控制断面合并成为双控断面。由于小水电

站众多,部分电站直接关系到敏感生境保护,因而需要设置生态敏感区控制断面。本文将福建省生态流量控制断面分为生态敏感区控制断面、一般生态流量控制断面、入海水量控制断面和入海水量与生态流量双控断面4个类别。

a. 生态敏感区控制断面。对于河道内分布重要敏感生境且已建电站存在阻隔影响的河段,优先设置生态敏感区控制断面。研究梳理了河道敏感水生生境分布情况,水生生态调查表明,已划定水产种质资源保护区的河段具有明确的生境保护需求,因而选取位于3处国家级水产种质资源保护区河道范围内的4处水电站作为生态敏感区控制断面。在建溪细鳞斜颌鲴国家级水产种质资源保护区选取建溪芦上水电站和南浦溪回龙水电站作为控制断面(保护区跨越干支流,各选取一个代表电站断面),在南浦溪半刺厚唇鱼国家级水产种质资源保护区选取南浦溪太平桥水电站作为控制断面,在罗口溪黄尾鲴国家级水产种质资源保护区选取位于闽江支流沙溪罗口溪的关公凹水电站作为控制断面。

b. 一般生态流量控制断面。选取了31处具有普遍生态保护意义的断面为一般生态流量控制断面。其中在霍口水库、白濂水库、长泰枋洋等设置断面,主要考虑监管新建大型水库,以减少对河流生境的扰动;在安砂、万安、棉花滩等水库坝下设置断面,主要考虑监管未来控制合理的供水规模;在七里街、沙县、漳平等设置断面,主要考虑维护河流廊道基本生态功能;在浦南、郑店、水口水库等设置断面,主要考虑综合监管流域河流廊道生态功能维护与流域开发规模控制。从流域分布来看,闽江流域13处控制断面全面覆盖干流与主要支流;在第二大河九龙江流域设置7处控制断面,覆盖九龙江北溪、西溪干支流;在汀江及其他独流入海河流设置11处控制断面。

c. 入海水量控制断面。考虑河流径流量大、河口区生态保护需求迫切,以及断面本身位于河口区感潮段利于监控,且断面上游均有生态流量控制断面,无须此断面再控制流量的情况,选取入海水量的控制断面——赛江下白石断面、闽江竹歧断面、木兰溪宁海大桥断面、九龙江北溪桥闸断面。

d. 入海水量与生态流量双控断面。对于流域面积相对较小,河口区红树林^[7]等生态保护目标明确,且河流无其他生态流量控制断面,或虽有断面但仍需强化下泄流量保障的情况,设置入海水量与生态流量双控断面——霍童溪洋中坂断面、敖江塘坂断面、诏安东溪诏安断面、漳州鹿溪桥闸断面、漳江峰头水库坝下断面。

2.3 断面选取合理性分析

2.3.1 控制目标

选定的控制断面全面覆盖了各类涉水生态保护目标要求。对山区河段具有重要保护价值的鱼类栖息生境,均在位于其上游的电站设置控制断面。对河口区域湿地、红树林等敏感生境,设置控制断面保障生态用水,如赛江下白石断面和霍童溪洋中坂断面等。对现状重要水源地及规划未来承担重要供水任务且引水规模相对较大的水源点,包括大樟溪莒口闸、晋江东溪山美水库等重要水源地,以及棉花滩水库、万安水库、白沙水库等潜在具备大规模供水能力的水源点,从控制引水规模、保障水生态安全的角度,设置一系列控制断面。

2.3.2 断面密度

从布设断面的区域密度进行考量,在全国宏观层面,如全国水资源综合规划、全国水资源保护规划,直至近期在编的全国重要河湖生态流量保障方案等,生态流量控制断面密度均小于0.2处/万 km^2 。在省级或流域级的中观层面,相关规划或方案中划定的控制断面一般不多于1处/万 km^2 。

在生态文明建设的大背景下,近期有关流域和区域规划在划定生态流量控制断面方面有不断加密的趋势。本研究福建控制断面密度为3.55处/万 km^2 ;在海南水网规划中,断面密度为3.67处/万 km^2 。各类断面密度如表1所示。查阅有关资料,与近期开展的国内外有关工作相对照^[8-11],本文生态流量控制断面布设密度较大。

表1 生态流量控制断面密度对比

Table 1 Density contrast of ecological flow control section

区域	面积/ 万 km^2	控制断 面数	断面密度/(处· 万 km^2)	来源
福建	12.40	44	3.55	本研究
海南	3.54	13	3.67	海南水网规划
厄瓜多尔	25.65	78	3.04	李红清等 ^[9]
乌江	8.79	25	2.84	罗志远等 ^[10]

3 生态流量控制目标核定

3.1 生态流量计算方法选取

根据国内外相关研究成果^[12-20],目前生态流量计算分析方法超过200种,总体上可以分为水文学法、水力学法、生境模拟法和综合分析法4类。水文学法利用历史流量资料,根据经验设定生态目标以推求生态流量,主要包括Tennant法、7Q10法、流量历时曲线法等。水力学法根据河流断面形态,建立河流流量与鱼类栖息地指示因子间的关系,进而推求生态流量,包括湿周法、 R_2 -CROSS法等。生境模拟法根据指示物种对维持栖息生境的水力条件进行

分析,以确定生态流量,包括有效宽度法等。综合分析法从区域生态环境总体保护需求出发,集合各学科专家小组意见,综合确定生态流量,包括 DRIFT 法等。

有关敏感保护鱼类及河口区红树林需水过程及河道断面地形条件的基础数据缺乏,故难以采用水力学法、生境模拟法和综合分析法推求生态流量。本研究收集到永泰、浦南等 12 个水文站 1959—2015 年的逐日径流资料,采用水文学法,结合各断面敏感生态保护需求,计算分析确定生态流量。

3.2 断面生态流量核定

3.2.1 生态敏感区控制断面

选定的 4 处控制断面下游均为国家级水产种质资源保护区,根据保护对象产卵繁育等生态需求,每年 4—6 月作为敏感期按照各断面多年平均流量的 40% 作为生态流量,其他月份按多年平均流量 20% 泄放生态流量。4 处控制断面均有一定周期的水文资料,本研究将具有长系列数据资料的邻近水文站作为参证站,对水电站径流资料做了复核检验。

3.2.2 一般生态流量控制断面

对选定的具有普遍生态保护意义的 31 处控制断面,根据水文资料和有关规划或建设项目环评报告等确定断面汛期生态流量与非汛期生态流量。对比 Tennant 法计算的多年平均流量的 10% (无特定敏感保护目标或水库电站调节能力较低的情况) 或 20% (有敏感保护目标),采用流量历时曲线法计算 90% 保障率的最枯月均流量,并根据已有批复的流域规划、水资源保护规划或工程项目环评报告所确定的非汛期生态流量值,取其中最大值作为断面非汛期生态流量。对比已批复的汛期生态流量与 Tennant 法计算的多年平均流量的 30% (无特定敏感保护目标或水库电站调节能力较低的情况) 或 40% (有敏感保护目标),取其较大值作为汛期生态流量。

在 31 个断面中,列入流域规划或水资源保护规划的断面共 9 处,具有建设项目环评批复依据的有 2 处。对应上述计算规则,非汛期生态流量取多年平均流量 10% 的断面有东溪水库、古田四级电站、茜洋溪口、东张水库、漳平、上杭、永定、中山河省界等 8 处;按照流量历时曲线法 90% 保障率最枯月均流量核定的断面包括永泰、东游电站、七里街、洋口、池潭水库、安砂水库、街面水库、水东水库、山美水库、万安水库、白沙水库、龙门、郑店、长泰枋洋、棉花滩水库等 15 处,核定流量约为多年平均流量的 12% ~ 18%;取多年平均流量 20% 的断面 1 处,为水口水库,其余 7 处断面生态流量沿用已批复的规

划或项目环评成果,均高于多年平均流量的 10%。关于汛期生态流量,由于已批复的规划或项目环评成果均小于或等于多年平均流量的 30%,因而经计算核定后,除水口水库按照多年平均流量 40% 泄放生态流量以外,其余 30 处断面均以多年平均流量的 30% 作为汛期生态流量。

3.2.3 入海水量控制断面

考虑河口区域生态敏感程度,对改善三都澳湾区水动力条件具有决定作用的赛江下白石断面,按照多年平均径流量的 75% 作为年入海水量控制目标,其余 3 处断面按照多年平均径流量的 60% 作为年入海水量控制目标。对于 90% 来水频率以上的枯水年则不考虑入海总水量控制目标。

3.2.4 入海水量与生态流量双控断面

对于双控断面,普遍具有较高的生态保护目标需求,诏安断面、鹿溪桥闸断面非汛期和汛期分别按照多年平均流量的 20% 和 40% 设定生态流量目标,其余断面均按照非汛期 90% 保障率最枯月均流量法和汛期多年平均流量的 30% 设定生态流量目标。入海水量方面,考虑霍童溪与赛江同样注入三都澳湾区,因而洋中坂断面也按照多年平均径流量的 75% 作为年入海水量控制目标,其余 4 处断面按照多年平均径流量的 60% 作为年入海水量控制目标。

3.3 生态流量核定成果合理性检验

断面生态流量控制目标能否作为实际监管的依据还需做进一步检验,合理的检验步骤一是看成果是否与区域水资源配置规划格局相协调,二是看成果是否与断面上游控制性枢纽的调度能力相匹配。本文提出的生态流量控制目标,已作为国家生态文明试验区(福建)水利总体规划编制内容的一部分,2035 水平年及 2050 水平年的水资源配置方案均以此作为边界条件,调算结构均可以充分支撑省域经济社会的协调发展,在经济与生态之间实现平衡与稳定^[21]。

关于控制性枢纽的调度,霍口、白濂等新建水库均按照批复的生态流量开展调度,而对其他已建水库电站,经初步调算,优化调度后均可完成生态流量泄放任务目标,对其供水和发电的损失程度有限,因而合理可行。

4 结 语

本研究提出了作为生态流量控制断面应具备的基本特征要求及断面选取的原则,结合福建省河流水系特点选取了 44 处生态流量控制断面,并划分为 4 个控制类别,进而依据水文学法提出了各断面生态流量控制目标。未来工作中,还要根据对河口区

红树林生态用水需求,以及对各类保护鱼类栖息生境的生态需求,综合采用多种分析方法,复核完善福建省各控制断面的生态用水控制目标,并进一步研究优化生态流量过程监管方式。

参考文献:

[1] 王晓学,胡元明,彭树恒,等. 流域一体化下的生态文明先行示范区建设探索[J]. 水资源保护,2017,33(1):83-89. (WANG Xiaoxue, HU Yuanming, PENG Shuheng, et al. Establishment of early demonstration area of ecological civilization under integrated watershed management mode[J]. Water Resources Protection,2017,33(1):83-89. (in Chinese))

[2] 赵钟楠,张越,黄火键,等. 基于问题导向的水生态文明概念与内涵[J]. 水资源保护,2019,35(3):84-88. (ZHAO Zhongnan,ZHANG Yue,HUANG Huojian, et al. Concept and connotation of aquatic ecological civilization based on problem orientation [J]. Water Resources Protection,2019,35(3):84-88. (in Chinese))

[3] 陆志华,钱旭,马农乐,等. 生态文明理念下的水生态空间管控要求:以福建省光泽县为例[J]. 水利经济,2018,36(4):63-67(LU Zhihua,QIAN Xu,MA Nongle, et al. Management and control requirements of water ecological space under idea of ecological civilization: case of Guangze County of Fujian Province [J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(4):63-67. (in Chinese))

[4] 卢纯. “共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):283-295. (LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “Making Efforts to Protect the Yangtze River Together” project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (4): 283-295. (in Chinese))

[5] 张贤铤. 福建省水资源管理现状及对策[J]. 水资源保护,2003,(4):46-48. (ZHANG Xianyi. Present situation and countermeasure of water resources management in Fujian Province [J]. Water Resources Protection, 2003, (4):46-48. (in Chinese))

[6] 蓝志峰,肖桂荣. 基于流域要素空间关系的水污染溯源研究[J]. 水资源保护,2019,35(1):56-62. (LAN Zhifeng,XIAO Guirong. Water pollution traceability based on spatial relationship of basin elements [J]. Water Resources Protection,2019,35(1):56-62. (in Chinese))

[7] 于一雷,郭菊兰,武高洁,等. 清澜港红树林浮游植物群落结构及水质对应分析[J]. 水资源保护,2018,34(2):102-110. (YU Yilei, GUO Julan, WU Gaojie, et al. Phytoplankton community structure and water quality correspondence analysis of mangrove forests in Qinglan Harbor[J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (2):

102-110. (in Chinese))

[8] 王东升,袁树堂,杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. 水资源保护,2019,35(4):35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. Water Resources Protection,2019,35(4):35-41. (in Chinese))

[9] 李红清,林国俊,杨寅群,等. 厄瓜多尔流域综合规划适宜生态流量研究[J]. 人民长江,2017,48(22):48-52. (LI Hongqing, LIN Guojun, YANG Yinqun, et al. Analysis of suitable eco-discharge for comprehensive basin plan for Ecuador [J]. Yangtze River, 2017, 48 (22): 48-52. (in Chinese))

[10] 罗志远,杨荣芳,吴刚. 贵州省乌江流域生态基流分析及保障方案[J]. 人民珠江,2018,39(5):38-40. (LUO Zhiyuan, YANG Rongfang, WU Gang. Ecological flow analysis and guarantee scheme of Wujiang River basin in Guizhou province [J]. Pearl River, 2018, 39 (5): 38-40. (in Chinese))

[11] 李扬,孙小平. 汾河下游河道生态基流分析计算研究[J]. 山西水利科技,2018(1):1-4,38. (LI Yang, SUN Xiaoping. Research on analysis and calculation of ecological base flow in the lower reaches of Fenhe River [J]. Shanxi Hydraulics, 2018(1):1-4,38. (in Chinese))

[12] 褚俊英,周祖昊,王浩,等. 流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系[J]. 水资源保护,2019,35(1):1-5,13. (CHU Junying, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management [J]. Water Resources Protection,2019,35(1):1-5,13. (in Chinese))

[13] 张帆,徐建新,郭文献. 河流生态环境需水量计算及优化分析模型应用[J]. 人民黄河,2011,33(5):72-73,129. (ZHANG Fan, XU Jianxin, GUO Wenxian. Application of calculation and optimization analysis model of river ecological environment water demand [J]. Yellow River, 2011, 33 (5): 72-73, 129. (in Chinese))

[14] 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. (XU Zongxue, WU Wei, YU Songyan. Study on ecological base flow: progress and challenges [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (4): 1-11. (in Chinese))

[15] 褚俊英,严登华,周祖昊,等. 基于综合功能辨识的城市河湖生态流量计算模型及应用[J]. 水利学报,2018,49(11):1357-1368. (CHU Junying, YAN Denghua, ZHOU Zuhao, et al. Ecological flow calculation in urban rivers and lakes base on synthesized ecosystem service function identification: model and application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (11): 1357-1368. (in Chinese))

(1):260-266. (DANG Jianhua, WAHAP Halik, ZHANG Yuping, et al. Coupling coordinated development of population, economic and ecological system in the Turpan

Area of China [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35 (1):260-266. (in Chinese))

(收稿日期:2019-03-11 编辑:王 芳)

(上接第 84 页)

- [18] LIU C H, TIAN F L, CHEN J W. A comparative study on source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Daliao River, China: positive matrix factorization and factor analysis with non-negative constraints [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (10): 915-920.
- [19] 汪东华, 马艳梅. 多元统计分析与 SPSS 应用 [M]. 2 版. 上海: 华东理工大学出版社, 2018.
- [20] YANG L P, MEI K, LIU X M, et al. Spatial distribution and source apportionment of water pollution in different administrative zones of Wen-Rui-Tang (WRT) River Watershed, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(8): 5341-5352.
- [21] 孙立鑫, 林山杉. 基于 WASP 模型的农田退水对查干湖水水质影响的评价 [J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 88-94. (SUN Lixin, LIN Shanshan. Evaluation on impact of farmland withdrawal water on water quality of Chagan Lake based on WASP model [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 88-94. (in Chinese))
- [22] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价 [J]. 中国环境科学, 2015, 35 (10): 3187-3192. (LIU Xiao, XUE Ying, JI Yupeng, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis [J]. China Environmental Science,

2015, 35(10): 3187-3192. (in Chinese))

- [23] 孔海燕, 安国安, 史淑娟, 等. 以 PCA 分析为基础的水环境质量综合评价研究 [J]. 污染防治技术, 2019, 32 (1): 6-8. (KONG Haiyan, AN Guoan, SHI Shujuan, et al. Comprehensive evaluation of water environmental quality based on PCA analysis [J]. Pollution Control Technology, 2019, 32(1): 6-8. (in Chinese))
- [24] 向东进, 李宏伟, 刘小雅. 实用多元统计分析 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.
- [25] 李斌, 张鑫, 李娜, 等. 北京市春夏挥发性有机物的污染特征及源解析 [J]. 环境化学, 2018, 37 (11): 2410-2418. (LI Bin, ZHANG Xin, LI Na, et al. Pollution characteristics and source analysis of volatile organic compounds in spring and summer in Beijing [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37 (11): 2410-2418. (in Chinese))
- [26] 郝利霞. 城市河流的污染特性分析研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [27] 徐光宇, 柴国平, 徐明德, 等. 主成分分析法在汾河太原城区段水质评价中的应用 [J]. 环境工程, 2014, 32 (6): 122-124. (XU Guangyu, CHAI Guoping, XU Mingde, et al. Application of principal component analysis in water quality evaluation of Fenhe River in Taiyuan City [J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (6): 122-124. (in Chinese))

(收稿日期:2019-10-21 编辑:彭桃英)

(上接第 96 页)

- [16] 朱党生, 张建永, 李扬, 等. 水生态保护与修复规划关键技术 [J]. 水资源保护, 2011, 27 (5): 59-64. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, LI Yang, et al. Key technologies of water ecology protection and rehabilitation planning [J]. Water Resources Protection, 2011, 27 (5): 59-64. (in Chinese))
- [17] 徐伟, 董增川, 罗晓丽, 等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (5): 454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 454-457. (in Chinese))
- [18] 涂晶晶, 陈森林, 艾学山, 等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (1): 99-105. (TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow [J]. Water Resources

Protection, 2015, 31(1): 99-105. (in Chinese))

- [19] 陈昂. 环境流量研究的前沿问题与挑战 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (2): 1-6. (CHEN Ang. Frontiers and challenges of environmental flow research [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39 (2): 1-6. (in Chinese))
- [20] 尚松浩. 确定河流生态流量的几种湿周法比较 [J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (4): 41-44. (SHANG Songhao. Comparison of several wet-cycle methods for determining river ecological discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (4): 41-44. (in Chinese))
- [21] 黄初龙. 福建省社会经济转型期水资源供需平衡趋势分析 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (3): 13-17. (HUANG Chulong. Analysis on the trend of water resources supply and demand balance in the period of socio-economic transition in Fujian Province [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 13-17. (in Chinese))

(收稿日期:2019-08-04 编辑:彭桃英)