

基于多方法综合比较的南水北调西线工程水源区生态需水研究

王玉莲^{1,2}, 杨泽凡¹, 闫 龙¹, 刘 欢¹, 曾庆慧¹, 杨 钦¹, 闫肖瑶¹, 胡 鹏¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 针对南水北调西线工程调水需求, 以方法比选、目标修正、可行性验证为主线, 提出了一套多方法综合确定水源区生态需水过程的思路, 并制定了 10 个坝址断面枯水期和非枯水期的生态基流、敏感生态需水及年生态水量目标。结果表明: 水源区坝址断面枯水期生态基流在多年平均流量中的占比约为 20%, 非枯水期占比约为 40%; 3—6 月为鱼类集中产卵敏感期, 需要每月发生一次脉冲流量过程, 每次至少持续 10 d, 脉冲流量在多年平均流量中的占比为 48%~73%; 各坝址断面年均生态水量在多年平均径流量中的占比约为 70%, 其中丰水年、一般偏枯年、枯水年生态水量占比分别为 68%~78%、66%~75% 和 61%~70%; 研究结果符合长江流域现有管控要求, 具备较好的现实可达性。

关键词: 生态需水; 生态基流; 敏感生态需水; 年生态水量; 南水北调西线工程

中图分类号: TV121^{+.4} **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2024)04-0137-11

Research on ecological water demand in water source area of west route of South-to-North Water Diversion Project based on multi-method comprehensive comparison // WANG Yulian^{1,2}, YANG Zefan¹, YAN Long¹, LIU Huan¹, ZENG Qinghui¹, YANG Qin¹, YAN Xiaoyao¹, HU Peng¹ (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: According to practical requirements of water transfer in west route of the South-to-North Water Diversion Project, an idea of multi-method comprehensive determination of ecological water demand process in water source area was proposed based on method comparison, target adjustment, feasibility verification, and the ecological base flow in dry and non-dry periods, sensitive ecological water demand, and annual ecological water volume targets at 10 dam site sections were formulated. The results indicate that the ecological base flow at dam site sections in the water source area accounts for approximately 20% of the multi-year average flow in dry period, increasing to about 40% in non-dry period. The period from March to June is critical for fish spawning, necessitating monthly pulse flow events lasting at least 10 days each, and the pulse flow accounts for 48% to 73% of the total multi-year average flow. The proportion of the average annual ecological water volume at dam site sections to the multi-year average runoff is approximately 70%, and the proportion varies from 68% to 78% during high-flow years, from 66% to 75% during moderately dry years, and from 61% to 70% during drought years. These findings comply with current control requirements in the Yangtze River Basin, demonstrating good practical feasibility.

Key words: ecological water demand; ecological base flow; sensitive ecological water demand; annual ecological water volume; west route of South-to-North Water Diversion Project

南水北调西线工程(以下简称“西线工程”)是从长江上游调水入黄河上中游的跨流域调水工程,是解决黄河流域水资源不足和我国西北干旱地区缺水的重大战略措施^[1]。根据 2002 年国务院批复的《南水北调工程总体规划》,多年平均总调水量为 170 亿 m³,其中一期工程调水量为 80 亿 m³。近年来,在气候变化和人类活动双层胁迫下,长江上游生态环境问题日益凸显^[2-4],如何合理确定西线工程的

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3205000,2022YFC3202003); 国家自然科学基金项目(52122902,U2240202)
作者简介: 王玉莲(1998—),女,硕士研究生,主要从事河流生态水文研究。E-mail:wangyl0711@126.com
通信作者: 胡鹏(1985—),男,正高级工程师,博士,主要从事生态水文和生态水力学研究。E-mail:hp5426@126.com

调水规模成为诸多专家学者争论的焦点^[5-8]。西线工程水源区位于长江上游,野生动植物资源丰富,但生态环境极其脆弱,为尽可能降低引调水工程的生态影响,需科学制定水源区调水河段生态需水目标,为合理确定调水规模提供支撑^[9]。

20 世纪 90 年代以来,国内外生态需水相关研究逐步深入^[10],形成了一系列面向不同保护目标的生态流量计算方法^[11-13],包括水文学法、水力学法、水文-生物分析法、栖息地模拟法等^[14-15]。西线工程提出后,许多学者对西线工程水源区生态需水做了大量的研究。门宝辉等^[16-17]采用 50% 保证率下月平均流量的 30% 确定了各坝址断面的逐月最小生态流量;万东辉等^[18-19]综合采用水文学法和水力学法计算了雅砻江热巴坝址处的生态需水量;刘苏峡等^[20]提出了一种根据生物生活习性变化确定水源区坝址断面各月最小流量的习变法,可用于计算水源区河道各月的生态需水量;吴春华等^[21]应用水文学法、水力学法和同水系类比法等估算了西线工程水源区各坝址断面的河道内生态需水量;黄烈敏等^[22]构建西线工程调水区河道生态平衡系统及调控系统,以珍稀鱼类所需生态流量为目标阈值,通过调整调控系统方案满足阈值来确定各坝址断面的敏感生态需水量。以上研究成果为西线工程水源区生态需水研究奠定了扎实的基础,但研究成果年份较早,数据序列较短,研究方法相对单一。随着南水北调后续工程高质量发展目标的提出和推进,在气候变化和长江大保护战略等新形势和新要求下,有必要进一步深入研究。

本文针对西线工程水源区 10 个备选坝址断面,系统考虑水源区河流生态系统在多年尺度和年内不同时期的生态流量需求,综合运用多种水文学法确定断面生态需水目标初始值,利用水力学法、栖息地模拟法和区域类比法对初始值进行修正,并对结果的合理性和可达性进行检验。

1 研究区概况及数据来源

西线工程水源区位于青藏高原东南边缘,涉及金沙江、雅砻江及大渡河流域,水资源丰富,开发利用程度低,生态本底条件较好,分布有川陕哲罗鲑、裂腹鱼等珍稀特有鱼类栖息地^[23]。据前期研究,目前西线工程形成了“上线”与“下线”两条主要调水线路^[24-25](图 1)，“上线”方案从雅砻江干流热巴断面取水,串联雅砻江支流达曲、泥曲和大渡河支流玛柯河、杜柯河、阿柯河,调水至黄河上游支流贾曲;“下线”方案从叶巴滩水库、两河口水库和双江口水库分别取水,在甘肃省岷县入洮河。部分方案还提出了从金沙江岗拖断面抽水的“上线”补充方案,因此本文一并将岗拖断面纳入研究范围。相关断面概况见表 1。

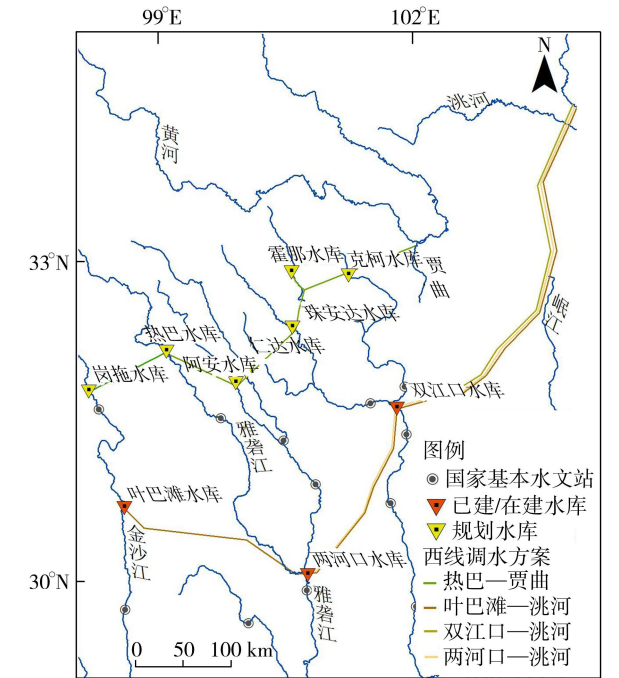


图 1 西线工程调水线路

Fig. 1 Water transfer route of West Route Project

表 1 西线工程水源区坝址断面概况

Table 1 Overview of dam site sections in water source area of West Route Project					
调水方案	调水河段	坝址断面	集水面积/km ²	多年平均径流量/亿 m ³	多年平均流量/(m ³ /s)
“上线”方案	雅砻江干流	热 巴	26 535	61.1	193.4
	雅砻江支流达曲	阿 安	3 487	10.4	32.9
	雅砻江支流泥曲	仁 达	4 650	11.8	37.2
	大渡河支流杜柯河	珠安达	4 618	14.7	46.6
	大渡河支流玛柯河	霍 那	4 035	10.9	34.5
	大渡河支流阿柯河	克 柯	1 534	6.7	21.3
	金沙江干流	岗 拖	147 451	163.2	517.3
“下线”方案	金沙江干流	叶巴滩	173 484	259.8	823.2
	雅砻江干流	两河口	65 727	217.7	689.0
	大渡河干流	双江口	39 330	158.4	502.0

由于西线工程各坝址断面均无长序列实测径流资料,故根据各坝址断面邻近的国家基本水文站不少于 30a 的实测流量数据,采用水文比拟法推算各坝址断面流量数据:

$$Q_b = (A_b/A_p)^n Q_p \tag{1}$$

式中: Q_b 为坝址逐日实测流量; Q_p 为参照水文站逐日实测流量; A_b 为坝址控制流域面积; A_p 为参照水文站控制流域面积; n 为经验性指数,一般由分析计算得出或利用以往研究进行估算确定^[26]。

坝址断面和参照水文站信息见表 2,其中,集水面积比为坝址断面与参照水文站断面集水面积的比值;多年平均流量比为坝址断面与参照水文站断面多年平均流量的比值。各水文站断面流量数据来自全国第二次水资源调查评价结果及《中华人民共和国水文年鉴》。

表 2 坝址断面和参照水文站信息

Table 2 Information of dam site sections and adjacent reference hydrological stations				
坝址断面	水文站	集水面积比	多年平均流量比	逐日流量区间
热巴	甘孜	0.81	0.71	1956—2021 年
阿安	道孚	0.32	0.26	1957—2021 年
仁达	道孚	0.24	0.23	1956—2021 年
珠安达	绰斯甲	0.31	0.25	1960—2021 年
霍那	足木足	0.20	0.15	1975—2021 年
克柯	足木足	0.08	0.09	1975—2021 年
岗拖	岗拖	0.99	1.00	1957—2021 年
叶巴滩	巴塘	0.93	0.90	1960—2021 年
两河口	雅江	1.00	1.00	1953—2021 年
双江口	大金	0.97	0.97	1956—2021 年

2 研究方法

2.1 生态需水目标制定思路

综合考虑水源区河流特点和生态保护目标,坝址断面的生态需水目标主要包括生态基流、敏感生态需水与年生态水量。生态基流指维持河流基本结构和生态功能的底限流量;敏感生态需水指维系河流生态敏感期正常生态功能的流量过程,旨在保护调水河段的特有珍稀鱼类;年生态水量指多年尺度上维持河流生态系统自恢复能力的水量目标。

水源区生态需水目标制定思路如图 2 所示。对于生态基流,划分枯水期和非枯水期,采用多种水文学法综合计算不同时期的生态基流目标初始值,并采用区域类比法对初始值进行校正。对于敏感生态需水,开展重点保护鱼类的生态习性分析,采用脉冲流量法计算敏感生态需水目标初始值,并采用水力学法和生境模拟法进行校正。对于年生态水量,采用水文学法计算不同来水条件下的生态需水量初始

值,并利用区域类比法进行校正。最后,利用长江上游已建水利水电工程运行期间实际下泄流量验证目标的合理性和可达性。其中,生态基流的设计保证率为 90%,敏感生态需水和年生态水量的设计保证率为 75%^[27]。

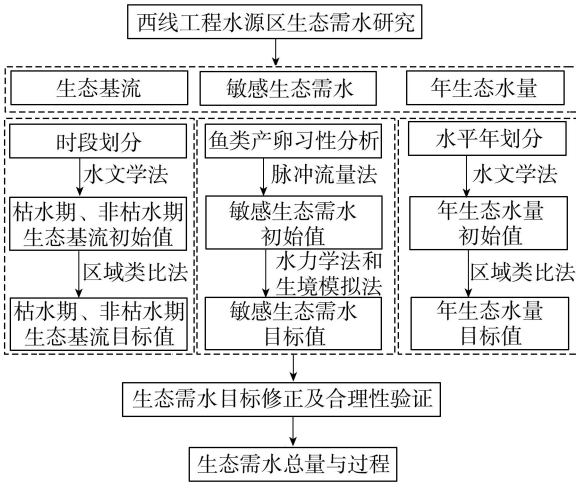


图 2 水源区生态需水目标制定思路

Fig.2 Ideas for formulating ecological water demand targets of water source area

2.2 生态基流目标制定方法

2.2.1 时段划分

采用 Q_p 法和流量历时曲线 (flow-duration curve, FDC) 法计算各坝址断面各月的生态基流在多年平均流量中的占比,基于计算结果划分坝址断面枯水期和非枯水期。经初步核算,各坝址断面 5—10 月的生态基流占比均值较高,达到 40% 以上,其余月份几乎都在 40% 以下 (图 3)。因此在制定坝址断面生态基流目标时,将 11 月至次年 4 月划分为枯水期,5—10 月划分为非枯水期。

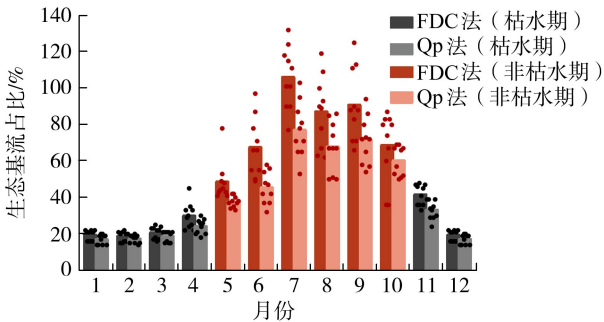


图 3 坝址断面逐月生态基流占比分布

Fig.3 Distribution of proportion of monthly ecological base flow at dam site sections

2.2.2 生态基流初始目标计算方法

计算生态基流的方法众多,各种方法所利用的基础数据、重点考虑的保护对象各不相同,综合多种方法所得的目标能够更全面有效地满足河流生态保

护需求。因此,本文分别采用目前应用最广泛的 Qp 法、最枯日流量法、7Q10 法和 FDC 法对坝址断面不同时期生态基流目标进行测算,并利用 Tennant 法进行对比和验证。Qp 法又称保证率法,取特定保证率下每年最枯月平均流量作为生态基流,本文选用 90%、95% 保证率,分别计算 Q_{90} 、 Q_{95} ;最枯日流量法以断面长系列(30 a 及以上)天然逐日流量为基础,取 90% 保证率下的每月最枯日流量作为断面生态基流;7Q10 法取断面长系列(30 a 及以上)90% 保证率下年内最枯连续 7 d 平均流量作为生态基流;FDC 法以断面长系列(30 a 及以上)逐日径流资料构建 FDC,取 90% 保证率下对应日均流量作为生态基流。

对于枯水期,为尽可能减缓调水造成的负面影响,选取各方法计算结果的最大值作为枯水期生态基流目标初始值;对于非枯水期,考虑到该时段本底流量较大,生态基流不是该时段保障重点,满足其中一种方法对应的目标要求即可,因此选取各方法计算结果的最小值作为初始值,但前提是该目标值不低于 Tennant 法规定的多年平均径流量的 30%。

2.2.3 生态基流目标修正方法

由于部分坝址断面集水面积与参照水文站集水面积差距较大,水文学法计算结果存在一定误差,因此本文提出一种区域类比法,对水文学法所得基流目标初始值进行修正。该方法的基本思想是假设同一区域、相同规模和类型的断面具有相似的生态水文特征,生态基流目标占比具有参考性^[28]。本文选取长江上游 91 个水文站断面,根据各水文站 1956—2000 年天然月径流资料,采用 Qp 法以 90% 保证率核算不同时段各站点断面生态基流占多年平均流量比值。基于各水文站断面 Q_{90} 计算结果,分别构建长江上游河流断面枯水期和非枯水期生态基流占比与断面集水面积的拟合关系,并计算其 95% 置信区间,依据置信区间对各坝址断面生态基流目标初始值进行修正,使得坝址断面的生态基流目标在 95% 置信区间内。

2.3 敏感生态需水目标制定方法

2.3.1 敏感生态保护对象与需求

对于西线工程水源区,敏感期生态保护对象主要是特有珍稀鱼类的产卵需求。结合文献[29-34]调研结果,雅砻江、金沙江、大渡河干流及部分支流中,黄石爬鮡、青石爬鮡、厚唇裸重唇鱼等鱼类分布较广,整体鱼类产卵高峰期主要集中在 3—6 月,大部分鱼类的鱼卵孵化时间为 2~8 d,而亲鱼需要经过 2 d 左右的刺激才能进行产卵行为,故认为 10 d 能满足绝大部分鱼类的产卵孵化需求。

2.3.2 敏感生态需水初始目标计算方法

以天然条件下产卵期内各月能实现的最大流量过程作为制定产卵期脉冲流量的依据,采用脉冲流量法计算敏感生态需水初始目标。即根据历史径流过程计算产卵期内各月连续 N 天(本文 N 取 10)能够满足的最大流量 Q_1 ;以 75% 作为敏感生态需水保证率要求,确定各年度产卵期内 75% 以上月份能够满足的流量 Q_2 ;取 75% 年份能够达到的特征流量为该河段初始目标流量 Q_3 ,具体公式见文献[35]。

2.3.3 敏感生态需水目标修正方法

脉冲流量法主要基于长系列水文资料进行计算,考虑到坝址断面流量过程还原的不确定性和水文学法的限制,本文采用与鱼类习性联系更为密切的水力学法(生态流速法、湿周法)和生境模拟法,通过取外包线的方式修正敏感生态需水目标,避免只考虑历史流量过程而弱化生物需求的问题。采用生态流速法时,考虑到西线工程水源区敏感期不同鱼类的适宜流速(如鱼类洄流的流速、鱼类产卵所需的流速刺激等)略有差异,且不同资料来源的适宜流速阈值结果不尽相同^[30-31,36-37],协调多目标需求后,将水源区断面生态流速目标设定为 1 m/s。湿周法通过建立断面湿周随流量的变化关系,依据曲线拐点确定坝址断面的敏感生态需水^[38]。生境模拟法根据各河段主要保护鱼类确定生境适宜度曲线,基于适宜栖息地面积模拟结果确定坝址断面敏感生态需水^[39]。

2.4 年生态水量目标制定方法

考虑到水源区生态需水目标的制定是为了支撑西线工程合理调水规模的确定,同时水生态系统在多年尺度上具有一定的抗干扰和自恢复弹性,不适宜简单制定单一的年生态水量目标。本文结合 Qp 法计算思路,提出了基于不同来水条件的年生态水量目标制定方法,其基本原则是保障调水后断面年下泄水量不低于天然情况下曾发生过的断面年最小径流量。具体计算方法为:来水频率 50% 以下的丰水年,以天然年径流量的 90% 保证率作为年生态水量目标;来水频率 50%~75% 的一般偏枯年,以天然年径流量的 95% 保证率作为年生态水量目标;来水频率 75% 以上枯水年,以天然年径流量的 99% 保证率作为年生态水量目标。

采用与第 2.2.3 节相同的思路,构建长江上游 91 个水文站断面不同来水频率下的年生态水量目标与断面规模的拟合关系,采用区域类比法对坝址断面年生态水量目标初始值进行修正。

3 结果与分析

3.1 生态基流目标制定

3.1.1 生态基流目标初始值

基于不同方法计算得到各坝址断面生态基流,其在多年平均流量中的占比如图 4 所示。对于枯水期,各计算方法所得生态基流占比差距均在 5% 以内,其中 FDC 法结果占比相对较高,根据前述方法和规则,取 FDC 法计算结果作为枯水期生态基流初始值;对于非枯水期,7Q10 法所得基流占比最低,取 7Q10 法计算结果作为非枯水期生态基流初始值。各坝址断面枯水期生态基流占比为 17% ~ 24%,非枯水期生态基流占比为 31% ~ 41%。

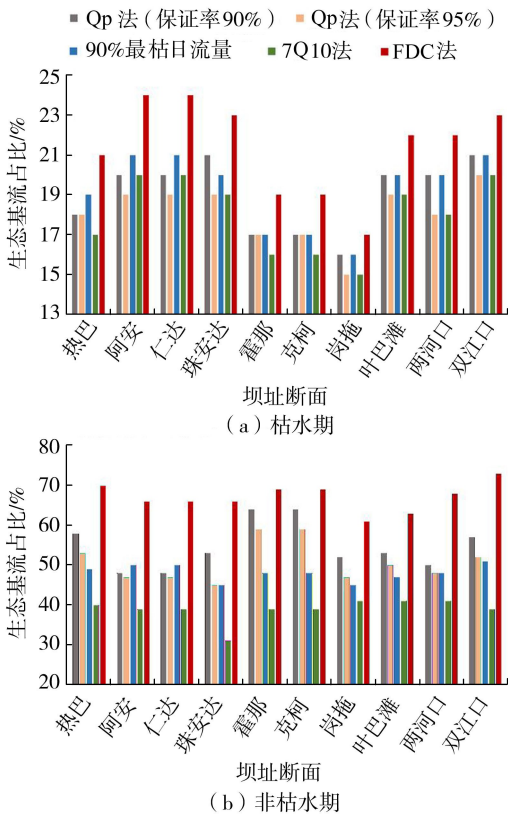


图 4 生态基流占比计算结果

Fig.4 Calculation results of ecological base flow proportion

3.1.2 生态基流目标修正

采用对数拟合模型,分别建立长江上游 91 个水文站断面枯水期、非枯水期生态基流占比与集水面积关系,并计算 95% 置信区间(图 5)。根据图 5(a)拟合曲线拐点,非枯水期生态基流占比可以集水面积 2 万 km²作为分界点,集水面积小于 2 万 km²断面生态基流占比在 95% 置信区间为 20% ~ 41%,集水面积大于 2 万 km²断面生态基流占比在 95% 置信区间为 36% ~ 46%。类似地,由图 5(b)可知,对于枯水期,集水面积小于 2 万 km²断面生态基流占

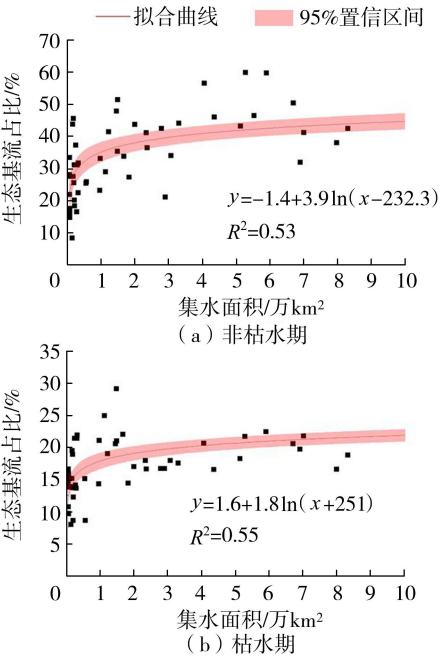


图 5 生态基流占比与集水面积回归关系

Fig.5 Regression relationship between ecological base flow proportion and catchment area

比在 95% 置信区间为 12% ~ 20%,大于 2 万 km²断面生态基流占比在 95% 置信区间为 17% ~ 23%。

将各坝址断面生态基流目标初始值与对应的 95% 置信区间进行对比,阿安、仁达、珠安达 3 个断面的枯水期生态基流占比高于置信区间的上边界,故将以上 3 个断面的枯水期生态基流占比统一修订为 20%。修正后各坝址断面生态基流目标如表 3 所示。

表 3 修正后坝址断面生态基流目标

Table 3 Ecological base flow targets at dam site sections after modification

坝址断面	多年平均流量/(m ³ /s)	枯水期		非枯水期	
		目标值/(m ³ /s)	占比/%	目标值/(m ³ /s)	占比/%
热 巴	197.60	41.30	21	79.50	40
阿 安	37.05	6.55	20	12.85	39
仁 达	508.20	7.41	20	14.53	39
珠安达	47.28	9.46	20	14.74	31
霍 那	35.79	6.75	19	13.80	39
克 柯	22.10	4.17	19	8.52	39
岗 拖	559.90	95.20	17	228.40	41
叶巴滩	822.90	179.10	22	340.30	41
两河口	667.30	144.60	22	270.90	41
双江口	32.76	114.50	23	200.20	39

3.2 敏感生态需水目标制定

3.2.1 敏感生态需水目标初始值

根据各坝址断面 1956—2020 年 3—6 月逐日流量,利用脉冲流量法计算各坝址断面敏感生态需水目标初始值,结果如表 4 所示,各坝址断面 3—6 月敏感生态需水目标在多年平均流量中的占比为 40% ~ 52%。

表 4 基于脉冲流量法的坝址断面敏感生态需水目标初始值

Table 4 Initial target values of sensitive ecological water demand at dam site sections based on pulse flow method					
坝址断面	目标初始值/ (m ³ /s)	占比/%	坝址断面	目标初始值/ (m ³ /s)	占比/%
热 巴	101.9	52	克 柯	10.7	48
阿 安	16.5	50	岗 拖	237.3	42
仁 达	18.7	50	叶巴滩	360.3	44
珠安达	19.1	40	两河口	334.4	50
霍 那	17.3	48	双江口	249.3	49

3.2.2 敏感生态需水目标修正

a. 基于生态流速法的敏感生态需水目标修正。选取距离坝址断面较近的岗拖、巴塘、甘孜、雅江和大金水文站,利用相关站点 2016—2022 年实测流速-流量数据,构建水文站断面流速-流量关系(图 6),并结合生态流速要求(1 m/s)计算各坝址断面敏感生态需水。与脉冲流量法计算结果相比,生态流速法计算的岗拖、叶巴滩、热巴断面的敏感生态流量较大,分别为 406.2、416.5、122.1 m³/s,在多年平均流量中的占比分别为 73%、50%、62%。

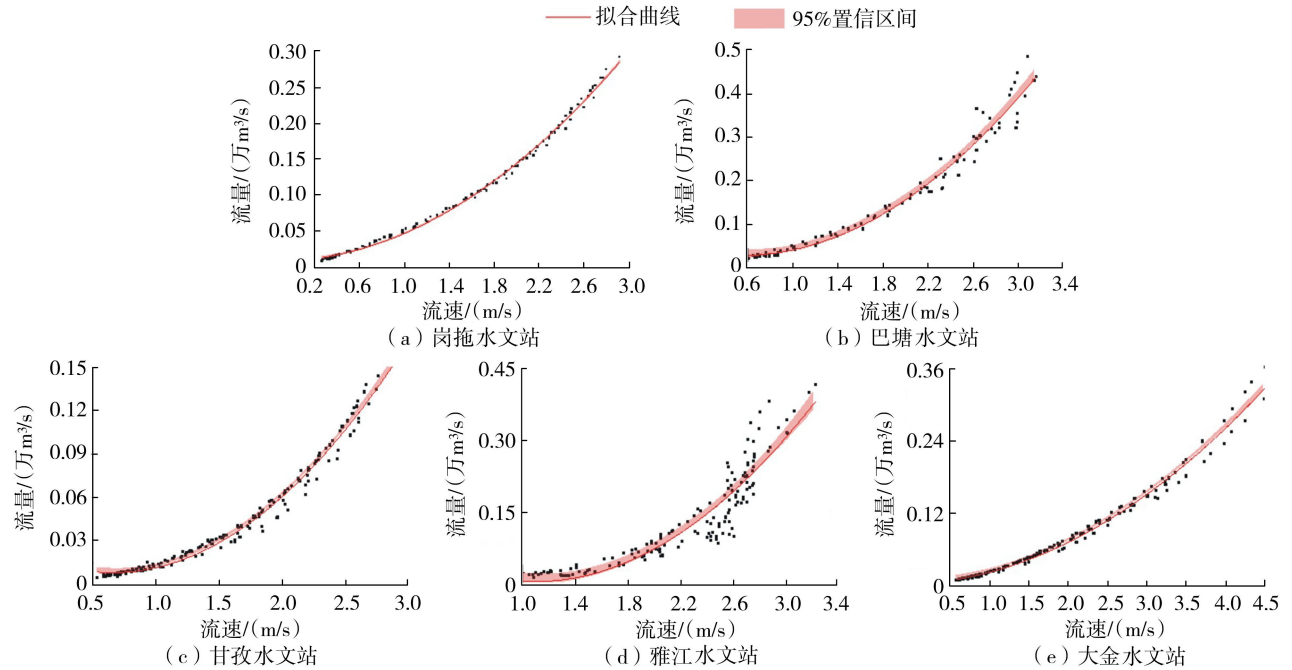


图 6 水文站断面流速-流量关系曲线

Fig. 6 Velocity-discharge relation curves at hydrological station sections

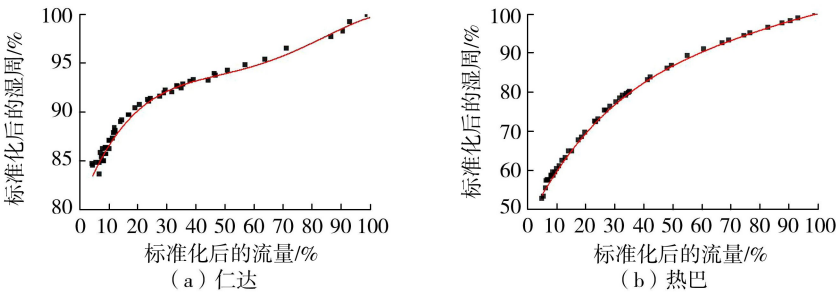


图 7 数据标准化后的坝址断面湿周-流量关系曲线

Fig. 7 Standardized wetted perimeter-discharge relation curves at dam site sections

b. 基于湿周法的敏感生态需水目标修正。考虑到湿周法主要适用于断面较为规整的宽浅型河段,经对各坝址断面形态的考察,仅对泥曲仁达和雅奢江热巴断面采用湿周法计算。利用断面 2020 年地形及水文数据,将数据标准化后构建湿周-流量关系(图 7),并根据拟合曲线拐点(曲率最大值处)确定敏感生态需水。仁达断面湿周法结果为 20.5 m³/s,热巴断面湿周法结果为 94.1 m³/s,湿周法所得仁达断面生态需水目标高于脉冲流量法和生态流速法结果。

c. 基于生境模拟法的敏感生态需水目标修正。由于地形资料限制,本文仅计算杜柯河珠安达段、达曲阿安段鱼类产卵期生态需水,其中杜柯河主要保护物种为川陕哲罗鲑、青石爬鮡等,产卵适宜水深为 0.5~2 m、适宜流速为 0.75~1.8 m/s^[26];达曲主要保护物种为软刺裸裂尻鱼、厚唇裸重唇鱼,产卵适宜水深为 0.5~2 m、适宜流速为 0.5~1.2 m/s^[22]。基于实测河道地形数据和水文数据开展水动力学模拟,并结合各河段主要保护鱼类产卵期适宜水文条

件,构建有效栖息地面积-流量的关系(图 8)。根据拟合曲线拐点,以 80% 多年平均流量对应的有效栖息地面积标准确定敏感生态需水。其中,珠安达断面鱼类产卵期生态流量为 31.2 m³/s,在多年平均流量中的占比为 66%;阿安断面生态流量为 22.7 m³/s,在多年平均流量中的占比为 69%。

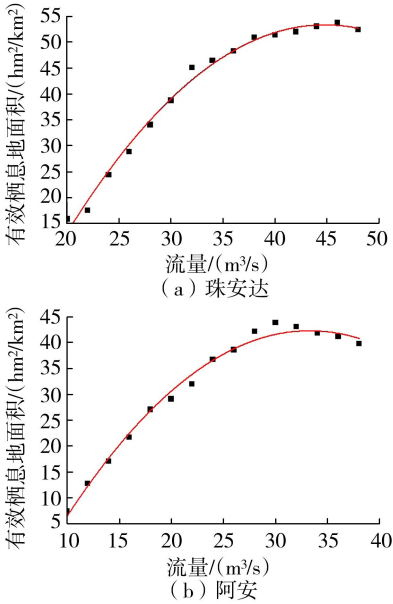


图 8 坝址断面有效栖息地面积-流量关系曲线
Fig.8 Effective habitat area-discharge relation curves at dam site sections

综合各方法计算结果,通过取外包线的方式确定敏感生态需水目标(表 5),各坝址断面敏感生态流量在多年平均流量中的占比为 48%~73%。

3.3 年生态水量目标制定

3.3.1 年生态水量目标初始值

不同来水年各坝址断面年生态水量目标初始值及在多年平均径流量中的占比如表 6 所示。根据不同来水年的年生态水量目标,计算得到了各坝址断面 1956—2020 年系列年生态水量目标均值。各坝址断面年生态水量目标均值占比为 66%~77%,其

表 6 坝址断面年生态水量目标初始值

Table 6 Initial target values of annual ecological water volume at dam site sections									
坝址断面	多年平均 径流量/亿 m ³	丰水年		一般偏枯年		枯水年		不同来水年均值	
		年生态 水量/亿 m ³	占比/%	年生态 水量/亿 m ³	占比/%	年生态 水量/亿 m ³	占比/%	年生态 水量/亿 m ³	占比/%
热 巴	62.30	45.40	73	44.10	71	42.70	68	44.40	71
阿 安	10.33	7.96	77	7.31	71	6.81	66	7.50	73
仁 达	11.68	9.01	77	8.27	71	7.70	66	8.48	73
珠安达	14.91	11.45	77	10.95	73	10.85	73	11.18	75
霍 那	11.29	8.94	79	8.32	74	8.01	71	8.59	76
克 柯	6.97	5.52	79	5.14	74	4.95	71	5.30	76
岗 拖	176.60	119.50	68	116.10	66	108.00	61	115.60	66
叶巴滩	259.50	196.30	76	181.90	70	161.50	62	183.80	71
两河口	210.40	159.80	76	153.80	73	144.40	69	154.50	73
双江口	160.30	127.10	79	121.00	76	117.00	73	123.10	77

Table 5 Sensitive ecological water demand targets at dam site sections			
坝址断面	目标值/(m ³ /s)	占比/%	确定依据
热 巴	122.0	62	生态流速法
阿 安	22.7	69	生境模拟法
仁 达	20.5	55	湿周法
珠安达	31.2	66	生境模拟法
霍 那	17.3	48	脉冲流量法
克 柯	10.7	48	脉冲流量法
岗 拖	406.0	73	生态流速法
叶巴滩	416.0	50	生态流速法
两河口	334.4	50	脉冲流量法
双江口	249.3	49	脉冲流量法

中岗拖断面最小,为 66%;双江口断面最大,达到 77%。

3.3.2 年生态水量目标修正

年生态水量目标的修正与生态基流修正过程相似,基于长江上游 91 个水文站断面天然年径流量 90%、95%、99% 保证率计算结果,用对数函数构建长江上游重点断面年生态水量占比-集水面积拟合关系,并计算其 95% 置信区间,结果如图 9 所示。以集水面积 2 万 km² 作为分界点,集水面积小于 2 万 km² 断面,基于 90%、95%、99% 保证率标准得到的年生态水量占比在 95% 置信区间分别为 63%~74%、50%~68% 和 41%~64%;集水面积大于 2 万 km² 断面,得到的年生态水量占比在 95% 置信区间分别为 68%~78%、63%~75% 和 56%~70%。

基于 95% 置信区间,对双江口、阿安、仁达、珠安达、霍那、克柯等断面年生态水量进行校正,校正后结果如表 7 所示,各坝址断面 1956—2020 年年均生态水量占比约为 70%。

3.4 目标合理性与可达性分析

水利部已颁布的 4 批全国重点河湖生态流量保障目标以及已批复的跨省江河水量分配方案中,明

确了长江上游 89 个重点断面的生态基流目标。对

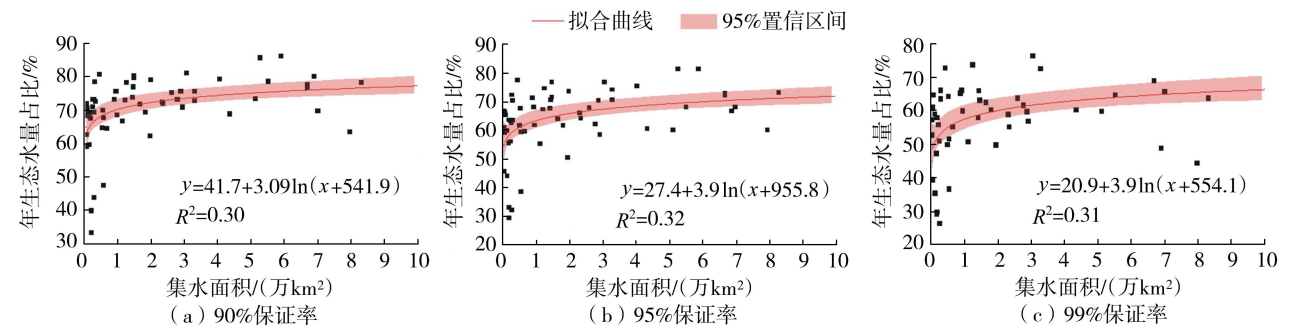


图 9 基于不同天然径流保证率的年生态水量占比与集水面积回归关系

Fig. 9 Regression relationships between annual ecological water volume proportion and catchment area under different guarantee rates of natural runoff

表 7 坝址断面年生态水量目标

Table 7 Annual ecological water volume targets at dam site sections

坝址 断面	丰水年		一般偏枯年		枯水年		不同来水年均值	
	年生态水量/亿 m³	占比/%	年生态水量/亿 m³	占比/%	年生态水量/亿 m³	占比/%	年生态水量/亿 m³	占比/%
热 巴	45.40	73	44.10	71	42.70	68	44.40	71
阿 安	7.65	74	7.03	68	6.61	64	7.23	70
仁 达	8.65	74	7.94	68	7.48	64	8.17	70
珠安达	11.03	74	10.10	68	9.54	64	10.42	70
霍 那	8.35	74	7.68	68	7.22	64	7.94	70
克 柯	5.16	74	4.74	68	4.46	64	4.91	70
岗 拖	119.50	68	116.10	66	108.00	61	127.00	72
叶巴滩	196.30	76	181.90	70	161.50	62	183.80	71
两河口	159.80	76	153.80	73	144.40	69	154.50	73
双江口	125.00	78	120.20	75	112.20	70	120.60	75

这 89 个断面的基流目标进行梳理,发现平均流量小于 100 m³/s 的断面,生态基流目标占比为 10% ~ 15%;平均流量为 100 ~ 500 m³/s 和 > 500 ~ 1000 m³/s 的断面,生态基流目标占比为 10% ~ 20%;平均流量大于 1000 m³/s 的断面,生态基流目标占比为 21% ~ 25%。本文制定的水源区断面枯水期生态基流目标均高于或至少不低于相关区间范围,且补充设置了流量更高的非枯水期生态基流目标,表明研究制定的水源区生态基流目标满足流域管控要求。

根据长江上游 35 个已建大型水电站运行期近 20 年的下泄流量,计算了水电站下游断面 90%、95% 保证率的日均下泄流量,在多年平均流量中的占比分别为 21% ~ 40%、20% ~ 34%。说明大型水利水电工程建成后,对枯水期径流过程能发挥较好的正向调控作用,95% 保证率的下泄流量基本能够达到多年平均天然流量的 20%,侧面证明了本文制定的坝址断面生态基流目标具备可达性。

在叶巴滩、巴塘和两河口水电站的环境影响评价报告中,鱼类繁殖季节最小下泄生态流量分别为 272、277、233 m³/s,均低于本文结果。此外,在制定西线工程水源区坝址断面年生态水量目标的过程

中,综合考虑了河流水生态系统在多年尺度上的需求和弹性,经过校正,各坝址断面的平均年生态水量在多年平均径流中的占比约为 70%,这与长江上游 10 条河流水量分配方案中 91 个水文站断面的 75% 保证率下泄水量目标均值(72%)基本一致,侧面证明了本文提出的敏感生态需水目标和年生态水量目标均具备合理性。

4 结 论

- a. 对于生态基流,综合利用多种常用水文学法,并根据外包线的原则确定各断面枯水期和非枯水期生态基流初值,并通过区域类比法修正,最终得到各坝址断面的生态基流目标,其中枯水期在多年平均流量中的占比约为 20%,非枯水期占比约为 40%。
- b. 对于敏感生态需水,基于水源区典型鱼类产卵习性和鱼卵孵化时间需求,提出需要在 3—6 月,每月至少保证发生一次脉冲流量过程,每次至少持续 10 d。综合脉冲流量、生态流速、湿周和栖息地模拟等方法,得到水源区坝址断面敏感生态需水在多年平均流量中的占比为 48% ~ 73%。
- c. 对于年生态水量,提出丰水年、一般偏枯年、枯水年分别按天然年径流量的 90%、95%、99% 保

证率标准制定年生态水量目标,并结合区域类比法对年生态水量进行修正,修正后得到各坝址断面年均生态水量在多年平均径流量中的占比约为70%。

d. 所得坝址断面生态基流目标值占比整体不低于现有流域管控要求,且不出长江流域现有大型水库生态基流保障现状,具备合理性和实践可行性。

参考文献:

[1] 张金良,景来红,李福生,等.南水北调西线工程总体布局及一期工程方案研究[J].人民黄河,2023,45(5):1-5. (ZHANG Jinliang, JING Laihong, LI Fusheng, et al. Study on overall layout and phase I project of west route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Yellow River,2023,45(5):1-5. (in Chinese))

[2] 杨耀先,胡泽勇,路富全,等.青藏高原近60年来气候变化及其环境影响研究进展[J].高原气象,2022,41(1):1-10. (YANG Yaoxian, HU Zeyong, LU Fuquan, et al. Progress of recent 60 years' climate change and its environmental impacts on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology,2022,41(1):1-10. (in Chinese))

[3] 傅伯杰,欧阳志云,施鹏,等.青藏高原生态安全屏障状况与保护对策[J].中国科学院院刊,2021,36(11):1298-1306. (FU Bojie, OUYANG Zhiyun, SHI Peng, et al. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(11):1298-1306. (in Chinese))

[4] 胡文韬,余钟波,陈松峰,等.长江上游卫星及再分析降水数据的适用性评估[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):15-24. (HU Wentao, YU Zhongbo, CHEN Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(3):15-24. (in Chinese))

[5] 张金良,马新忠,景来红,等.南水北调西线工程方案优化[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):109-114. (ZHANG Jinliang, MA Xinzong, JING Laihong, et al. Plan optimization of the west route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(5):109-114. (in Chinese))

[6] 王福生.南水北调西线工程的新思路与新方案:西线调水应从怒江、帕龙江或雅鲁藏布江选点的调研[J].开发研究,2020(1):1-5. (WANG Fusheng. New thought and scheme of west route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. Research on Development, 2020(1):1-5. (in Chinese))

[7] 鲍文.南水北调西线工程潜在影响及其对策[J].生态经济,2016,32(10):174-178. (BAO Wen. Potential

affects of west route of the South-to-North Water Transfer Project and its countermeasures[J]. Ecological Economy, 2016,32(10):174-178. (in Chinese))

[8] 梁书民, GREENE R. 南水北调西线工程线路设计优化方案探讨[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):133-141. (LIANG Shumin, GREENE R. Discussion on optimal route design for the west route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2018,29(5):133-141. (in Chinese))

[9] 尹炜,翟红娟,邓志民,等.南水北调西线工程水源区生态需水研究[J].人民长江,2023,54(6):41-46. (YIN Wei, ZHAI Hongjuan, DENG Zhimin, et al. Study on ecological water demand in water source area of west route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Yangtze River,2023,54(6):41-46. (in Chinese))

[10] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507-514. (WANG Xiqin, LIU Changming, YANG Zhifeng. Research advance in ecological water demand and environmental water demand [J]. Advances in Water Science,2002,13(4):507-514. (in Chinese))

[11] 张璞,刘欢,胡鹏,等.全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J].水资源保护,2022,38(2):176-182. (ZHANG Pu, LIU Huan, HU Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China [J]. Water Resources Protection,2022,38(2):176-182. (in Chinese))

[12] 黄冬菁,李一平,崔广柏,等.基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J].水资源保护,2024,40(1):142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis [J]. Water Resources Protection,2024,40(1):142-148. (in Chinese))

[13] 于子钺,张晶,赵进勇,等.考虑关键物种全生命周期的减脱水河段生态流量研究[J].水资源保护,2022,38(6):175-184. (YU Zicheng, ZHANG Jing, ZHAO Jinyong, et al. Study on ecological flow of dewatered river sections considering whole life cycle of key species [J]. Water Resources Protection,2022,38(6):175-184. (in Chinese))

[14] YANG Fucheng, XIA Ziqiang, YU Lanlan, et al. Calculation and analysis of the instream ecological flow for the Irtys River [J]. Procedia Engineering,2012,28:438-441.

[15] 高勋,陈星,卢娟娟,等.台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J].水利水电科技进展,2023,43(3):55-61. (GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban

- area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(3):55-61. (in Chinese))
- [16] 门宝辉,刘昌明,夏军,等.南水北调西线一期工程河道最小生态径流的估算与评价[J].水土保持学报,2005,19(5):135-138. (MEN Baohui, LIU Changming, XIA Jun, et al. Estimating and evaluating on minimum ecological flow of western route project of China's South-to-North Water Transfer Scheme for water exporting rivers [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5):135-138. (in Chinese))
- [17] 韩瑞光,丁志宏.南水北调西线一期工程河道内最小生态环境需水量的研究[J].水利发展研究,2009,9(1):31-33. (HAN Ruiguang, DING Zhihong. Study on the minimum ecological environmental water demand in the river channles of the first phase of the west route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Water Resources Development Research,2009,9(1):31-33. (in Chinese))
- [18] 万东辉,夏军.南水北调西线一期工程雅砻江河道内生态需水量研究[J].武汉大学学报(工学版),2007,40(6):1-5. (WAN Donghui, XIA Jun. Analysis of ecological water requirements in Yalong River of west route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2007,40(6):1-5. (in Chinese))
- [19] 万东辉,夏军,宋献方,等.基于水文循环分析的雅砻江流域生态需水量计算[J].水利学报,2008,39(8):994-1000. (WAN Donghui, XIA Jun, SONG Xianfang, et al. Evaluation of ecological water requirement based on hydrological cycle analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(8):994-1000. (in Chinese))
- [20] 刘苏峡,夏军,莫兴国,等.基于生物习性和流量变化的南水北调西线调水河道的生态需水估算[J].南水北调与水利科技,2007,5(5):12-17. (LIU Suxia, XIA Jun, MO Xingguo, et al. Estimating ecological instream flow requirements for the donating rivers in the western route South-to-North Water Transfer Project in China based on the relationship between the life habit and flow variation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2007,5(5):12-17. (in Chinese))
- [21] 吴春华,轩晓博,刘达通.调水工程河道内生态需水量研究及实例分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(5/6):524-530. (WU Chunhua, XUAN Xiaobo, LIU Datong. Ecological water demand in river channels of water division project; case study [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(5/6):524-530. (in Chinese))
- [22] 黄烈敏,刘家宏,秦大庸,等.南水北调西线调水区生态调控阈值研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2012,10(1):29-35. (HUANG Liemin, LIU Jiahong, QIN Dayong, et al. Analysis of the ecological control threshold in west route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2012,10(1):29-35. (in Chinese))
- [23] 张丰搏,胡鹏,闫龙,等.南水北调西线工程上线水源区大型底栖动物群落结构及环境驱动因子[J].水资源保护,2024,40(1):135-141. (ZHANG Fengbo, HU Peng, YAN Long, et al. Structure of benthic macroinvertebrate assemblages and environmental driving factors in water source area of upper line of South-to-North Water Diversion Project (west route) [J]. Water Resources Protection,2024,40(1):135-141. (in Chinese))
- [24] 张金良,景来红,唐梅英,等.南水北调西线工程调水方案研究[J].人民黄河,2021,43(9):9-13. (ZHANG Jinliang, JING Laihong, TANG Meiyong, et al. Study on water diversion scheme of the western route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Yellow River,2021,43(9):9-13. (in Chinese))
- [25] 景来红.南水北调西线一期工程调水配置及作用研究[J].人民黄河,2016,38(10):122-125. (JING Laihong. Research on allocation and effects of water diversion by stage I project of the west route of South-to-North Water Transfer [J]. Yellow River, 2016, 38(10):122-125. (in Chinese))
- [26] 冯国强,吴彦昭.嘉陵江干流甘肃段径流量水文比拟法指数分析[J].甘肃水利水电技术,2022,58(10):5-9. (FENG Guoqiang, WU Yanzhao. Index analysis of hydrological analogy method for runoff in Gansu section of the main stream of Jialing River [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology,2022,58(10):5-9. (in Chinese))
- [27] 王浩,胡鹏.基于二元视角的河湖生态环境复苏与生态流量保障路径[J].中国水利,2022(7):11-15. (WANG Hao, HU Peng. Recovery of eco-environment and safeguarding path of ecological flow of rivers and lakes based on binary perspective [J]. China Water Resources, 2022(7):11-15. (in Chinese))
- [28] LIU Huan, HU Peng, WANG Jianhua, et al. A flexible framework for regionalization of base flow for river habit maintenance and its thresholds [J]. Science of the Total Environment,2023,876:162748.
- [29] 武云飞.青藏高原鱼类[M].成都:四川科学技术出版社,1992:135-152.
- [30] 丁瑞华.四川鱼类志[M].成都:四川科学技术出版社,1994:289.
- [31] 危起伟.长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区科学考察报告[M].北京:科学出版社,2012.
- [32] 陈礼强,吴青,郑曙明,等.细鳞裂腹鱼胚胎和卵黄囊仔鱼的发育[J].中国水产科学,2008,15(6):927-934. (CHEN Liqiang, WU Qing, ZHENG Shuming, et al. Development of embryo and yolk-sac larva of *Schizothorax chongi* [J]. Journal of Fishery Sciences of China,2008,15(6):927-934. (in Chinese))

[33] 虎永彪,张艳萍,史小宁,等.厚唇裸重唇鱼人工繁殖技术[J].中国水产,2014(8):63-64. (HU Yongbiao, ZHANG Yanping, SHI Xiaoning, et al. Artificial breeding techniques of *Gymnodiplocheilus pachycheilus* [J]. China Fisheries, 2014(8):63-64. (in Chinese))

[34] 胡仁云,张运海,舒旗林,等.重口裂腹鱼的胚胎发育观察[J].江苏农业科学,2020,48(14):198-203. (HU Renyun, ZHANG Yunhai, SHU Qilin, et al. Observation of embryonic development of *Schizothorax davidi* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(14):198-203. (in Chinese))

[35] 杨泽凡,胡鹏,王玉莲,等.鱼类产卵敏感期河流生态流速的分区分类阈值研究[J].水利学报,2024,55(2):190-201. (YANG Zefan, HU Peng, WANG Yulian, et al. Zoning and classification of ecological flow velocity thresholds required by river fish during sensitivity spawning periods [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(2):190-201. (in Chinese))

[36] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等.基于栖息地指标法的生态流量研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):168-175. (HONG Siyang, WANG Hongrui, ZHU Zhongfan, et al. Research of ecologic flow based on habitat index method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(1):168-175. (in Chinese))

[37] 茹辉军,李云峰,沈子伟,等.大渡河流域川陕哲罗鲑分布与栖息地特征研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(10):1779-1785. (RU Huijun, LI Yunfeng, SHEN Ziwei, et al. Distribution and habitat character of *Hucho bleekeri* in the Dadu River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(10):1779-1785. (in Chinese))

[38] BARTSCHI D K. A habitat-discharge method of determining instream flows for aquatic habitat [C]// Proceedings of Symposium and Specility Conference on Instream Flow Needs II. Bethesda: American Fisheries Society, 1976:285-294.

[39] THARME R E. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research and Applications, 2003, 19(5/6):397-441.

(收稿日期:2023-12-15 编辑:施业)

+++++

(上接第98页)

[36] LUO Lifeng, WOOD E F. Monitoring and predicting the 2007 US drought[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(22):L22702.

[37] 孙昭敏,吴志勇,何海,等.基于改进VIC模型的岔巴沟流域水沙耦合模拟研究[J].水电能源科学,2020,38(3):30-33. (SUN Zhaomin, WU Zhiyong, HE Hai, et al. Coupled flow-sediment simulation of Chabagou River Basin based on improved VIC model [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(3):30-33. (in Chinese))

[38] 吴志勇,徐征光,肖恒,等.基于模拟土壤含水量的长江上游干旱事件时空特征分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):176-184. (WU Zhiyong, XU Zhengguang, XIAO Heng, et al. Spatio-temporal analysis of drought events in the upper reaches of Yangtze River Basin based on simulation of soil moisture [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(1):176-184. (in Chinese))

[39] 吴志勇,白博宇,何海,等.珠江流域1981—2020年水文干旱时空特征分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1):1-9. (in Chinese))

[40] XU Huating, WU Zhiyong, HE Hai, et al. Quantitative analysis of the uncertainty of drought process simulation based on atmospheric - hydrological coupling in different climate zones [J]. Water, 2023, 15(18):3286.

[41] SUN He, SU Fengge, YAO Tandong, et al. General overestimation of ERA5 precipitation in flow simulations for high mountain Asia basins [J]. Environmental Research Communications, 2021, 3(12):121003.

[42] HANSEN M C, DEFRIES R S, TOWNSHEND J R G, et al. Global land cover classification at 1km spatial resolution using a classification tree approach [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6/7):1331-1364.

[43] REYNOLDS C A, JACKSON T J, RAWLS W J. Estimating soil water-holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions [J]. Water Resources Research, 2000, 36(12):3653-3662.

[44] LU Guihua, LIU Jingjing, WU Zhiyong, et al. Development of a large-scale routing model with scale independent by considering the damping effect of sub-basins [J]. Water Resources Management, 2015, 29(14):5237-5253.

[45] 刘扬李,周祖昊,刘佳嘉,等.基于水热耦合的青藏高原分布式水文模型: II. 考虑冰川和冻土的尼洋河流域水循环过程模拟[J].水科学进展,2021,32(2):201-210. (LIU Yangli, ZHOU Zuhao, LIU Jiajia, et al. Distributed hydrological model of the Qinghai Tibet Plateau based on the hydrothermal coupling: II. simulation of water cycle processes in the Niyang River Basin considering glaciers and frozen soils [J]. Advances in Water Science, 2021, 32