

海河流域典型湿地水环境时空变化规律与生态系统交互作用机理专题

序

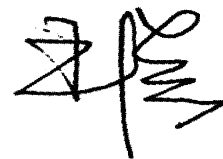
海河流域既在全国经济社会发展格局中占有十分重要的战略地位,也是我国水资源最为紧缺的地区,水资源供需矛盾异常突出,海河流域作为人类活动扰动强度大和复杂性高的区域,湿地生态系统结构与功能退化。

流域是由不同生态系统组成的异质性区域和巨型复合生态系统,其完整性意义非同一般。流域湿地生态系统可以分为河流、湖泊、水库、城市湿地和河口等典型生态单元。流域生态系统具有3大特殊功能:维持流域水循环过程,保障陆地生态系统完整性和与海洋生态系统平衡,满足流域各类生态系统的生态需水,为人类提供一定质与量的水资源用于生产、生活 and 经济发展。

流域水环境管理已经呈现由污染物末端管理转向基于生态和健康的环境风险管理的国际趋势,海河流域水环境风险源包括工业风险源(采矿业和污染型工业)、农业风险源(种植业、畜牧业和水产养殖业)、生活风险源(生活污水和城镇化)和水利工程风险源等,在流域尺度下以典型湿地生态单元为案例明晰水环境质量与生态系统健康交互作用机理和时空变化规律,是实现流域水环境安全和生态健康的前提和保证。

本专题希望以海河流域及典型单元水环境演化机理的研究成果为主题,以国家973项目海河流域水循环演变机理与水资源高效利用(2006CB403400)等为科研支撑,面向科研单位和管理部门,征集学术论文,多角度、全方位地广泛探索本研究领域中的科学本质与管理问题,反映海河流域水环境及其相关领域最新的科研成果和技术创新,以期海河流域的水环境质量改善和管理水平提升提供新的理论、方法和有效途径。

首席科学家



2010年9月8日

流域生态需水学科维度方法研究与展望

刘静玲,任玉华,杨志峰,崔保山

(水环境模拟国家重点实验室,北京师范大学环境学院,北京 100875)

摘要:综合运用专家调查问卷、比较分析和统计学方法,系统研究了流域生态环境需水方法论与维度问题,分析了不同特征的流域如何选取和优化学科方法,从学科维度探讨了方法特征、使用范围、优选和发展趋势。结果表明,流域生态需水方法论可以从方法、学科、空间维度和程序维度4个方面进行研究。根据发展阶段和问题需求,目前学科维度重要性居于首位,重要性顺序为:学科维度(46%)>方法维度(33%)>空间维度(12%)>程序维度(8%)。学科各子维度方法数量依次为:水文学方法(31%)>生态学方法(28%)>其他方法(21%)>水力学方法(12%)>综合法(8%)。比较不同学科方法计算同流域的生态需水量结果相对标准偏差均大于0.25,差异性较大。流域生态环境需水方法在学科维度层面呈现从单学科分析向多学科综合发展、从局部过程向全流域水文循环过程发展、从传统技术向数字流域技术发展的趋势。建议以流域水环境问题为导向,以流域生态系统管理和系统优化理论为指导,以生态优先和保证基流为基本原则,对于生态参数和科学方法进行科学筛选、整合与优化。

关键词:流域;生态需水;学科维度;方法研究

中图分类号:X144 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)10-1845-12

收稿日期:2010-06-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB403400);科技部创新方法工作专项项目(2008IM020700);长江学者和创新团队发展计划资助(IRT0809)

作者简介:刘静玲(1962—),女,吉林人,教授,博士生导师,主要从事流域水环境与水生态安全研究。E-mail:jingling@bnu.edu.cn

Prospect on Environmental Flow Methodology of River Basin from Subject Dimension

LIU Jing-ling, REN Yu-hua, YANG Zhi-feng, CUI Bao-shan

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Study on the environmental flows methodology is an important challenge for the watershed ecosystem management and water environmental recovery. In this paper, the issues of research methodology and dimension were conducted systematically, then the characteristics, range of application and development trends of environmental flows methodology were expounded from subject dimension, and it was discussed how to adopt and optimize methods for the different river basin based on expert questionnaire and statistical analysis. The results showed that environmental flows methodology is made up of methods, space, subject dimensions and process, of which subject is the core, and importance order was: Subject(46%)> Methodology(33%)> Space(12%)> Process(8%). The order of the number of sub-dimensions approach is hydrology method(31%)> ecological method(28%)> other methods(21%)> hydraulic method(12%)> holistic method(8%). After compared calculation results of water demand for the same river basin using different methods, the SD of calculated results for the same area using different methods were greater than 0.25, indicating that the variation is large. There are being three evolution trends of environmental flows methodology in subject dimension: changing from single discipline to multi-disciplines, changing from the local process to the whole hydrological cycle, and changing from traditional technology to digital technology. The suggestion is which method chosen for the real river basin study depends on the rule of priority for ecology and basic flows according to the key problems and ecological recovery target. The ecological parameter and methodology should be chosen, integrated and optimized.

Keywords: river basin; environmental flow; subject dimension; methodology

流域是一个受自然和人为影响的巨型复合生态系统,人为干扰的强度、频度和持续时间不断加剧是导致流域生态退化和生态安全风险的根本原因。流域水资源过度开发与科学管理缺乏,已开始成为阻碍流域可持续发展战略的瓶颈^[1]。流域生态需水研究是合理配置流域水资源、实现流域水环境安全和生态系统健康的根本保证^[2],流域生态需水方法和理论的创新对流域生态系统管理和水资源的科学配置具有重要的理论意义和应用价值。

生态环境需水的研究始于 20 世纪 40 年代,针对水资源的过度开发带来流域水环境危机,以保证水生生态系统健康和水环境安全为目标确定某一河流的生态需水量^[3],很快引起学术界和流域水管理部门的广泛关注。我国生态需水的研究始于 20 世纪 80 年代,汤奇成等针对西北干旱地区水资源与绿洲建设提出了生态环境用水的概念^[4]。刘昌明以水力学为基础提出了水热平衡、水盐平衡、水沙平衡与水量平衡的“四大平衡”理论,王西琴等针对河流生态环境需水的不同内容提出了具体的研究方法^[5]。R. E. Tharme 按照各种方法提出的时间和地点顺序比较分析了不同国家在生态环境需水研究方面的差异,并计算出发达国家与发展中国家提出的生态环境需水评估方法数量比例为 7:3^[6]。Mike Acreman 将生态环境需水评估方法划分为四类:Look-up tables(查表法)、Desk-top analysis(台式分析法)、Functional analysis(功能分析法)和 Hydraulic habitat modeling(水力生境模拟法)^[7]。

Louise Korsgaard 将生态环境需水方法分为水文指数法、水力学法、生境模拟法和整体功能法四类^[8]。王让会应用植被耗水和定额法估算了塔里木河流域生态需水量^[9]。刘静玲等建立了流域生态环境需水研究的理论框架^[10]。杨志峰等建立了流域生态环境需水分析方法、分区理论体系和整合方法^[11]。王浩通过计算机模型模拟了二元水循环下的流域生态环境需水^[12]。张丽等比较分析了河道生态系统、城市生态系统和湖泊湿地生态系统的生态环境需水计算方法^[13]。

流域生态需水研究侧重于不同流域和生态单元生态需水量的计算,探索建立完整的流域生态环境需水方法体系已经成为本研究领域的热点和难点。本文综合运用专家调查问卷、比较分析和统计学方法,拟研究流域生态环境需水方法论与维度问题,从学科维度探讨流域生态需水方法特征、使用范围、优选和发展趋势。旨在整合和优化流域生态需水方法,为解决流域水生态环境问题提供方法论的指导和新思路。

1 调查问卷设计

流域生态需水方法研究调查问卷全部以此领域的知名学者和专家为调查对象,从需水研究的理论、方法、问题本质 3 部分进行调查,为搭建方法体系框架奠定理论基础(图 1)。

1.1 设计目的

流域生态环境需水方法研究调查问卷旨在综合专家意见的基础上,明确目前此领域研究中的理论问

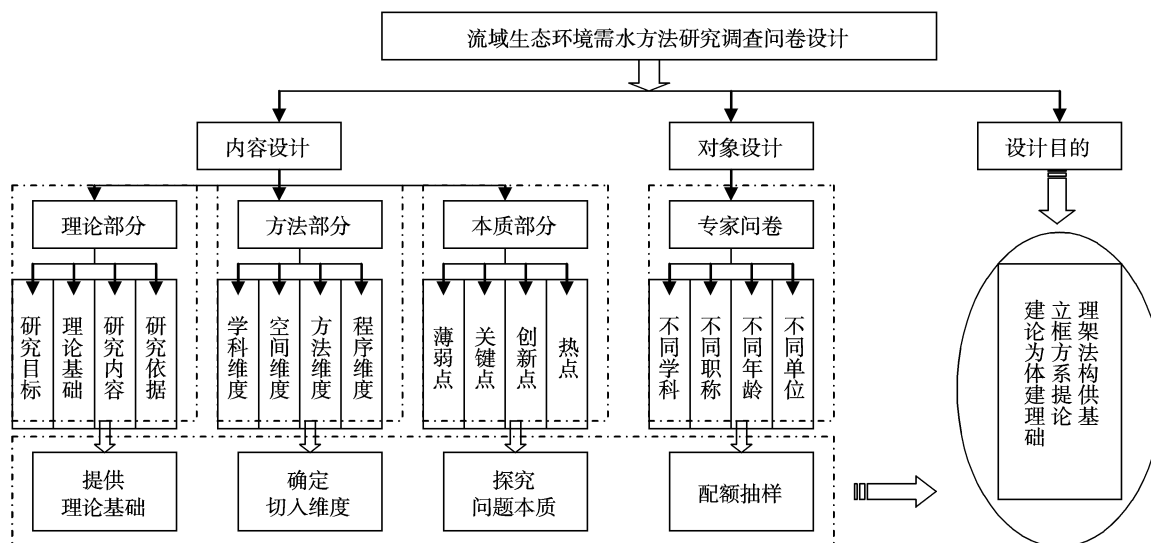


图 1 流域生态需水理论框架设计示意图

Figure 1 Theoretical framework design of environmental flow in river basin

题,搭建流域生态环境需水方法体系框架,为流域生态环境需水研究奠定理论和方法基础。

1.2 设计思路

调查问卷共 16 个问题,其中不定项选择问题 12 个,开放式问题 4 个。基本内容分为 3 部分:

(1)流域生态环境需水理论部分:旨在确定流域生态环境需水研究的目标、理论基础和研究内容。

(2)流域生态环境需水问题本质探究部分:通过集成各位专家的智慧结晶,探究流域生态环境需水问题的本质。此部分多为开放式问题,可采用特尔菲法总结。

(3)流域生态环境需水方法部分:旨在确定流域生态环境需水研究应从何种维度切入,为方法体系构建奠定基础。

1.3 调查对象设计

鉴于问卷内容专业性较强,调查问卷采用配额抽样方式,以不同科研单位和高校的 24 位具有不同职称、不同年龄阶段和不同学科背景的流域生态环境需水专家为调查对象。

(1)专家所在单位性质配额抽样设计:科学研究所占 37.5%,高校占 37.5%,环境管理部门占 25%。

(2)专家学科背景配额抽样设计:所选专家均具有环境科学专业背景,其中环境生态学专业背景占 25%,水文学专业背景占 25%,环境水力学专业背景占 25%,其他环境学科专业背景占 25%。

(3)专家职称配额抽样设计:教授占 50%,副教授占 17%,讲师占 8%,高级研究员占 17%,工程师占

8%。

(4)专家年龄结构配额抽样设计:老年占 8%,中年占 84%,青年占 8%。

截至 2010 年 8 月 10 日,回收问卷 63 份,回收率达 96%。

2 调查问卷分析方法

(1)态度和观点属于复杂概念,在测量时对顺序级变量加以数字化,对不同的等级按顺序赋值,借助物理学上计算物质分布重心的方法,通过计算被调查者意见的重心作为该问题的综合意见。具体计算公式为:

$$L = \sum i X_i / \sum X_i$$

式中: i 为等级数, X_i 为等级 i 中投票的被调查者数目, L 为指标对应的总体位置。

(2)此次问卷选项大部分为名义级变量,由于各选项之间具有独立性和排他性,因此在测量时可用直接比较法。

3 结果与分析

3.1 流域生态需水理论

此部分主要包括 5 个问题:流域生态需水研究范畴、研究依据、研究目标、研究内容和理论基础。

表 1 中的变量是顺序型变量,运用公式 $L = \sum i X_i / \sum X_i$,可得 $L=1.21$,说明几乎所有流域都需要进行生态环境需水研究。其他问题为名义级变量,因此可用直接比较法。根据表 2 调查结果统计表分析可得:专

表1 流域生态需水研究范畴统计表

Table 1 Statics of study scope of environmental flow in river basin

内容	顺序变量		
	1	2	3
是否所有的流域都需要需水研究	所有流域 20人	其他 1人	仅缺水流域 2

家认为流域生态需水研究依据主要是生态健康评价等级,并应综合考虑各方面因素;研究目标主要是维持生态系统健康,促进社会和环境和谐发展;需水内容主要包括生态系统健康评价、需水量评估、水资源优化和管理;理论基础包括环境科学、生态学、水文学、水力学和系统论,专家认为环境科学和生态学是流域生态需水研究的主要理论基础。

3.2 流域生态需水问题本质

由于此部分全部为开放式问题,因此采用特尔菲法在综合专家意见的基础上,进行多轮专家问卷调查,最终总结归纳得出流域生态需水研究的问题本质、薄弱点、关键点、创新点和热点等问题。专家认为:流域生态需水研究薄弱点是生态-水分的耦合作用机理研究;流域生态需水研究关键点是生态目标的科学确定;流域生态需水研究创新点是需水分区与整合;流域生态需水研究热点包括流域生态系统与水循环的互动-适应性机制研究、流域生态需水和生态用水的相关性分析、基于水资源配置的生态需水合理调控与管理。

3.3 流域生态环境需水方法

此部分主要考察专家对4个维度:学科维度、空间维度、程序维度和方法维度及各子维度的看法,并对需水研究程序中用到的科学方法进行调查,旨在确定流域生态需水方法研究的维度体系。

根据表3统计分析结果可以得出:(1)专家对不同研究维度的投票比例顺序为:学科维度(46%)>方法维度(33%)>空间维度(12%)>程序维度(8%);(2)其中方法维度中实验方法和逻辑推理方法较为重要;(3)学科维度中各子维度重要性相差不大;(4)空间维度中河道生态系统最为重要;(5)程序研究维度中选题方法最为重要。

根据专家调查问卷统计结果,流域生态需水方法体系应从学科维度、空间维度和方法维度3个方面构建(图2)。本文将学科维度划分为水文学方法、水力学方法、生态学方法、综合法和其他方法5个子维度;空间维度分为旱地生态系统、河道生态系统、湿地生态系统和河口生态系统4个子维度,其中河道生态系统是研究的重点;方法维度从科学方法论层面分为选题方法、实验方法、观察方法、逻辑推理方法和科学思维,其中实验方法是基础,逻辑推理方法和科学思维是关键。目前研究较为成熟的学科维度层面对流域生态需水方法进行梳理和归纳,探索流域生态需水方法

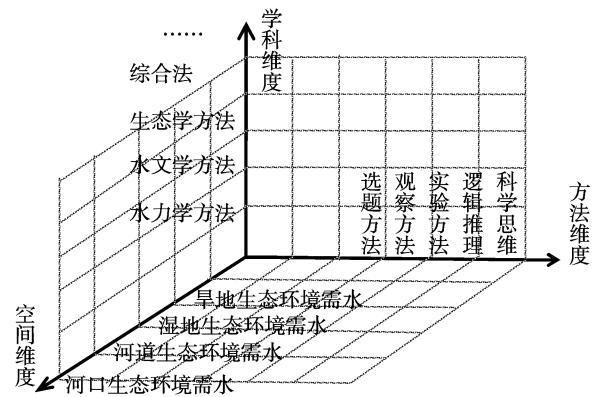


图2 流域生态环境需水方法维度示意图

Figure 2 Dimension of environmental flow methodology

表2 流域生态需水理论问题统计表

Table 2 Statics of theory issues of environmental flow in river basin

问题内容	研究依据			研究目标			研究内容				理论基础					
	生态健康评价等级	水资源规划	其他	维持生态健康	合理规划水资源	其他	生态健康评价	生态需水量计算	水资源优化配置	其他	生态学	水文学	水力学	系统论	环境科学	其他
专家投票数	20	12	3	23	11	2	20	21	20	5	20	19	15	14	20	0

表3 流域生态需水研究维度及子维度调查统计表

Table 3 Statics of research dimension and sub-dimension of environmental flow in river basin

被调查者	方法维度				空间维度				学科维度				程序维度			
	观察方法	实验方法	逻辑推理方法	科学思维	旱地生态需水	河道生态需水	湿地生态需水	河口生态需水	水文学方法	水力学方法	生态学方法	综合法	选题	设计研究方案	实施研究方案	总结归纳
专家投票数	10	10	12	11	2	8	3	3	10	17	17	16	6	5	0	0
合计/占百分比	43/33%				16/12%				60/46%				11/8%			

的特点和发展趋势,具有可行性。

4 流域生态需水学科维度方法

4.1 方法分类

目前全世界提出了 220 多种不同的、相互独立的河道生态环境需水评估方法。这些方法大致有 4 种不同的分类体系(表 4),本文将流域生态环境需水方法从学科角度分为水文学方法、水力学方法、生态学方法、综合法和其他方法 5 大类,其中水文学方法所占比例最大(图 3),不同国家所提出的各学科方法的数量不同(图 4,表 5)。

(1)水文学方法

水文学方法主要依靠历史水文流量数据计算环境需水量,计算数据通常以每年、每季度或每月的河流平均径流量或流量曲线表示。国内外生态环境需水计算水文学方法大概有 60 多种,最常用的有 7Q10 法、Tennant 法、Texas 法等,目前针对所研究河流的特

点在原有方法的基础上提出了一些改进的方法如改进 Tennant 法^[15]和动态生态需水计算方法^[16]。

(2)水力学方法

水力学方法首先是在美国评估河道内鱼类生态需水量时提出的,主要基于历史流量数据或生境较为脆弱敏感地区的水文数据,通过水力学模型假定河

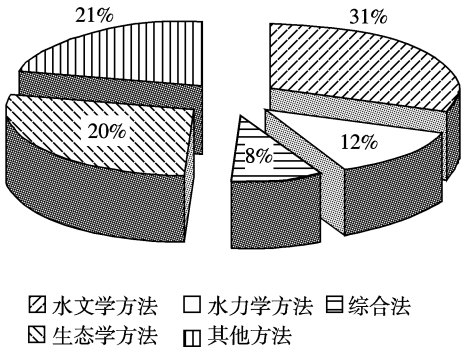


图 3 不同学科方法比例

Figure 3 Proportion of sub-subject methods

表 4 生态环境需水方法分类列表

Table 4 Classification of environmental flow methods

分类机构	分类	子分类	举例
国际自然与自然资源保护联合会 IUCN ^[8]	Methods	Look-up tables	Q95 Index;Tennant 法
		Desk-top 分析法	Richter 法;湿周法
		功能分析法	BBM 法;专家组评估法;
		生境模拟法	PHABSIM
		Expert Team Approach;Stakeholder Approach(包括专家和非专家)	
World Bank ^[9]	approaches	IFIM;DRIFT	
	Prescriptive 方法	水文指数法	Tennant 法
		水力学方法	湿周法
		专家组法	Flow events method
		整体功能法	BBM
国际水资源管理研究所 IWMI ^[8]	Interactive 方法	IFIM;DRIFT	
	水文指数法		Tennant 法
	水力学方法		湿周法
	生境模拟法		IFIM
	综合法		BBM;DRIFT;Benchmarking Methodology
杨志峰等 ^[1]	环境功能设定法	生态基流计算方法	Tennant 法、月保证率法
		输沙需水计算方法	最大月含沙量法、泥沙动力学法
		自净需水计算方法	最枯月流量法、水质模型法
		水面蒸发消耗需水	直接计算法
		渗漏消耗需水计算方法	水文分析法、地下水动力学法
		植物需水计算方法	间接计算法
	生态水文模型 ^[14]	经验模型	Rutter 模型、Gash 模型、Dalton 模型
		机理模型	Penman-Monteith 模型、Horton 模型
		确定性模型	Darby-Richards 模型、Boussinesque 模型、
		集总模型	SWAT 模型、HYDROM 模型、SWIM V.2.1 模型、SHE 模型、系统动力学模型

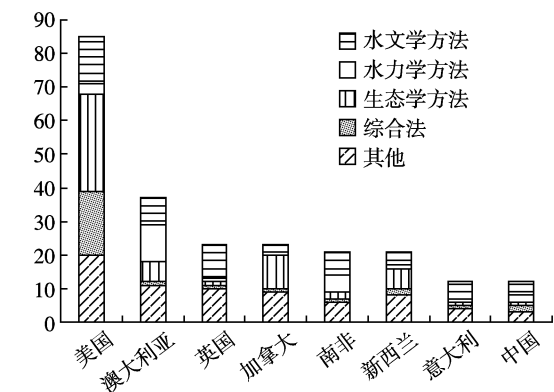


图 4 不同国家所提出的各学科方法数量示意图
Figure 4 Numbers of subject methods for different countries

流水力参数(湿周、深度、流速等)和保护物种的关系计算需水量,计算结果通常用理想的最小生态环境需水量(低于此水量生态系统将会恶化或退化)来表示。代表性方法有:湿周法,R2CROSS 法,生态水力半径法^[17]和流量恢复法^[18]。

(3)生态学方法

生态学方法以生态学理论为基础,注重流域的生态水文过程和生态系统的整体性,从生态健康角度出发计算流域生态需水量。典型代表方法有生态功能法^[1]。

(4)综合法

综合法融合了水文学、水力学和生态学的模型和方法,是生态环境需水计算方法中将生态系统整体考虑到环境流量测定中的方法。包括 Building Block Method(BBM)、Downstream Response to Imposed Flow

表 5 不同国家所提出的各学科方法数量列表
Table 5 Numbers of environmental flow methodologies of different types for different countries

国家	水文学方法	水力学方法	生态学方法	综合法	其他
美国	20	19	29	3	14
澳大利亚	11	1	6	11	8
英国	10	1	1	1	10
加拿大	9	1	10	1	2
南非	6	1	2	5	7
新西兰	8	2	6	1	4
意大利	4	1	1	1	5
中国	3	2	1	2	4

Transformation(DRIFT)、Benchmarking Method 和 Flow Events Method(FEM)。

(5)其他方法

由于流域尺度生态系统的复杂性,在需水量研究中需要针对研究区域的特点提出更符合研究条件的方法或将两种或几种方法融合,使计算结果更精确。如:生境模拟法、环境功能设定法、生态模型方法等。

4.2 方法比较

同学科方法比较见表 6。

水文学方法的优点是若所研究区域的水文数据比较充足,生态需水量计算结果可快速得出,缺点是不能完全得出河流的水文指数与生态过程之间的关系,一般适用于流域尺度的水资源规划。水力学方法

表 6 同学科方法比较列表
Table 6 Comparison of environmental flow methods of the same subject dimension

分类	计算方法	方法概述	适用范围/优点	局限性
水文学方法	7Q10 法 ^[19]	采用 90%保证率下最枯连续 7 d 的平均水量,作为满足污水稀释功能的河流所需流量	适合于大型水利功能的环境影响评价	低估河流流量需求,未考虑河流形状
	Tennet 法 ^[19]	年平均流量的 10%作为水生生物生长下限,年平均流量的 30%作为水生生物满意流量	简单快速	未考虑流量的季节变化和河流形状
	Texas 法 ^[19]	将 50%保证率下月流量的特定百分率作为最小流量	适合于流量变化主要受融雪影响的河流	其他类型河流应用 Texas 法需要对标准做进一步研究
	月(年)保证率法 ^[20]	不同的月(年)保证率前提下的天然月(年)径流量不同百分比,设定不同的等级河道生态环境需水量	水资源利用程度大的河流	不能反映河流的自然变化规律
	基本流量法 ^[20]	根据河流流量变化状况确定所需流量,将相对流量变化最大处点的流量设定为河流所需基本流量	能反映年平均流量相同的季节性河流和非季节性河流差别,计算容易	缺乏生物学依据资料证明
	基本生态环境需水量法 ^[20]	以河流最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流的基本需水量	选用人类影响较小时的河流状态	受时空和人为影响限制
	NGPRP 法 ^[19]	将年份分为干旱年、湿润年、标准年,取标准年组 90%保证率流量作为最小流量	综合了气候状况以及可接受频率因素	缺乏生物学依据
水力学方法	湿周法 ^[20]	依据湿周和流量的变化关系确定河流流量	适用于宽浅矩形河道和抛物线型河道	受河道形状的影响

续表 6

分类	计算方法	方法概述	适用范围/优点	局限性
	R2Cross 法 ^[20]	采用河流宽度、平均水深、平均流速以及湿周率等指标来评估河流栖息地的保护水平,从而确定河流目标流量	应用于受人类影响较小的河流	相对复杂,容易产生误差
	RCHARC ^[6]	根据水深和流速与鱼类种群变化的关系,对河流的生态可接受流量状态进行研究河流栖息地的保护水平	应用于受人类影响较小的河流	容易受到生物数据的限制,计算结果不精确
	生态水力半径法 ^[17]	将水力半径赋予生物学意义,再通过生态水力半径推求过水断面的流量	以生物保护为主要目标的生态环境需水研究	计算结果不精确
	流量恢复法 ^[18]	根据生态目标建立水力学模型,确定生态需水的范围和阈值	水资源规划的河道、流域	需要数据较多
生态学方法生态功能法 ^[1]		将所研究区域根据一定的原则划分为若干个生态单元,根据每个生态单元的主要生态功能计算需水量,再将其整合得出整个研究区域的生态环境需水量。	适用于以某种生态功能为主导的研究区域或大尺度流域;计算结果相对精确	所需资料较多,耗时长
综合法	BBM ^[21]	组成多学科专家小组,根据实地调查结果,通过情景模拟和水文流量分析,建立生态环境需水量评估与水资源开发的工程设计模型	适用于已规划、未规划或正处在生态恢复中的河流生态环境需水量评估	未考虑临界条件下河流的水文状况
	DRIFT ^[6]	以典型河流断面的水文数据资料为基础,综合考虑四个模块的关系,提出不同的方案	适用于全面评估,快捷简单,考虑因素比较全面	缺乏描述河流生态系统变化流量指标
	Benchmarking Methodology ^[6]	成立多学科专家小组提出水文模型;根据模型提出水利规划方案	适用于数据缺乏的水生生态系统的生态环境需水评估	未明确考虑社会因素,需要多学科专家的参与
	FEM ^[6]	根据经验公式或专家推断确定河流水流体系的重要方面	适用于评估流量变化对河流生态系统的生态影响	未考虑社会因素,评估结果还需要验证
	FMP ^[6]	主要运用与 BBM 方法相近的程序进行生态环境需水评估	适用于管理或规划较完善的河流系统	适用范围较窄,评估程序不严密,评估结果需验证
	SPAM ^[6]	以专家研讨为基础,制作交叉表格的方法非定量描述每种要素对每种生态组成的影响,根据不同生态组成的生态相应进行流量分配	相对快捷、简单、不需要大量的现场数据。	需多学科背景的专家团队,计算结果不精确,需进一步验证
其他方法	环境功能设定法 ^[5]	将河流(河段)划分为若干个小段,将每一小段看作一个闭合汇水区,根据河流水质模型计算每一段的河道需水量,然后,对其求和即可得到整个河流(河段)的环境需水量。	优点是将河流水量与水质保护相结合,适合研究污染严重河流的需水量	计算结果偏大
	生态水文模型方法 ^[14]	以卫星遥感和数字流域为技术支撑,以所研究的模块或尺度间的水文与生态的相互作用及响应过程为模拟对象,建立流域生态环境需水生态水文模型	模拟结果更具科学性,更精确	需要数据较多,需对模型进行验证
	PHABSIM ^[6]	运用一维水力模型估算低流量状态下的需水量,或模拟典型流速状态下的需水量	估算河流变化对生物栖息地的影响	耗时长,适用范围较窄
	IFIM ^[6]	利用水力模型预测水深、流速等水力参数,与生境适宜性标准相比较,计算适于指定水生生物种的生境面积,描述河流流量变化对河流生态系统的影响	以问题目的为导向,将公众因素考虑在内	耗时长,适用范围较窄,不适用于生态目的的需水评估

的优点是只需要进行简单的现场测量,不需要详细的物种-生境关系数据,数据容易获得,其缺点是体现不出季节变化和生态系统变化规律,但可为其他方法提供水力学依据。综合法的优点是涵盖了水文-生物-社会的复杂综合系统,从生态系统层面进行需水量评估,并融合了专家和各方面的水资源利益相关者的意见,但计算结果不精确。多学科优化模型法如生态水文模型将弥补如上方法的不足,但需要全面系列的监测数据,却以此推动了流域水环境与水资源监测与管理水平。

中国七大流域中松花江、长江、珠江等 3 条河流的水资源开发利用率在其阈值范围之内,辽河、海河、

黄河、淮河等 4 条河流的开发利用率均超过了最大开发利用率,故选取黄河、辽河、海河和淮河流域将不同学科方法计算的同一流域生态需水量进行比较(表7)。

将表 7 中需水量计量单位统一换算后(表 8),可得出不同学科方法计算黄河下游流域最小生态需水量所得结果的大小顺序为:水力学方法($341\times 10^8\text{ m}^3$)>水文学方法($286\times 10^8\text{ m}^3$)>功能设定法($250\times 10^8\text{ m}^3$)>生态功能法($184.2\times 10^8\text{ m}^3$);黄河口三角洲适宜生态需水量计算结果的大小顺序为:功能设定法($220\times 10^8\text{ m}^3$)>生态功能法($202\times 10^8\text{ m}^3$)>综合法($57\times 10^8\text{ m}^3$);辽河流域河流湿地最小生态需水量计算结果的大小顺序为:水文学方法($209.48\times 10^8\text{ m}^3$)>环境功能设定法

表 7 同一研究区域采用不同学科方法所得生态需水量计算结果列表

Table 7 Calculation results of environmental water demand in the same study area using different methods

研究流域	研究尺度	研究方法	计算结果	作者/时间
黄河流域	黄河下游长 786 km 面积 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$	功能设定法	最小生态环境需水量为 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$	倪晋仁等/2002 ^[22]
		水文学方法——月保证率法	汛期:最少输沙需水量 $196 \times 10^8 \text{ m}^3$ 非汛期:最少入海需水量 $286 \times 10^8 \text{ m}^3$ 最少基本环境需水 $93.8 \times 10^8 \text{ m}^3$	王西琴等/2003 ^[5]
		生态功能法	最小生态环境需水量为 $184.2 \times 10^8 \text{ m}^3$	杨志峰等/2006 ^[1]
		水力学方法——流量恢复法	鱼类需水量:11—3 月 $270 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 4—6 月份 $480 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 7—10 月 $2\,600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	蒋晓辉等/2007 ^[8]
	黄河口三角洲海岸长 350 km 面积 $0.6 \times 10^4 \text{ km}^2$	生态功能法	湿地最小生态需水量 $190.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 适宜 $202.45 \times 10^8 \text{ m}^3$; 理想 $217.93 \times 10^8 \text{ m}^3$	崔保山等/2007 ^[24]
		功能设定法	湿地适宜生态需水量 $220 \times 10^8 \text{ m}^3$	刘晓燕等/2009 ^[25]
		综合法	最小生态需水量(利津断面) $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 适宜生态需水量 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	王新功等/2009 ^[26]
辽河流域	流域面积 $21.96 \times 10^4 \text{ km}^2$	水文学方法	生态需水量为 $209.48 \times 10^8 \text{ m}^3$	严登华等/2002 ^[27]
海河流域	流域面积 $31.78 \times 10^4 \text{ km}^2$	环境功能设定法	生态环境需水量为 $130.44 \times 10^8 \text{ m}^3$	王西琴等/2007 ^[28]
		环境功能设定法	最小河流生态需水为 $31.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ 最小湿地生态需水为 $34.31 \times 10^8 \text{ m}^3$	魏彦昌等/2004 ^[29]
		生态功能法	最小生态环境需水量为 $33.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ 适宜需水量为 $78.92 \times 10^8 \text{ m}^3$ 理想需水量为 $116.85 \times 10^8 \text{ m}^3$	杨志峰等/2006 ^[1]
淮河流域	流域面积 $27 \times 10^4 \text{ km}^2$	改进的生态水力半径法	蚌埠闸闸下全年水位宜大于 5.55 m 颍上闸闸下全年水位宜大于 23.21 m 周口闸闸下全年水位宜大于 39.95 m 白龟山水库坝下全年水位宜大于 95.03 m	赵长森等/2008 ^[30]
		蒙大拿法水力半径法	淮河水系最小生态需水量为 $19.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ 适宜生态需水量为 $73.40 \times 10^8 \text{ m}^3$	梁友/2009 ^[31]

表 8 同一研究区域采用不同学科方法计算结果比较分析

Table 8 Comparative analysis of different environmental flow methods in the same study area

研究流域	水文学方法	水力学方法	综合法	环境功能设定法	生态功能法	相对标准偏差
黄河下游	$286 \times 10^8 \text{ m}^3$	$341 \times 10^8 \text{ m}^3$		$250 \times 10^8 \text{ m}^3$	$184.2 \times 10^8 \text{ m}^3$	0.27
黄河三角洲			$57 \times 10^8 \text{ m}^3$	$220 \times 10^8 \text{ m}^3$	$202 \times 10^8 \text{ m}^3$	0.56
辽河流域	$209.48 \times 10^8 \text{ m}^3$			$130.44 \times 10^8 \text{ m}^3$		0.36
海河流域				$65.95 \times 10^8 \text{ m}^3$	$33.12 \times 10^8 \text{ m}^3$	0.47

表 9 不同流域主要生态环境问题及计算方法推荐

Table 9 Major environmental problems in different watershed and recommend methods

研究流域	主要生态环境问题	生态环境需水计算方法推荐
黄河下游	黄河主要干支流干涸断流频繁,大量泥沙流入下游河道	水力学方法 环境功能设定法
黄河三角洲	黄河河道断流、淡水湿地萎缩、植被生态功能退化、物种多样性衰减	生态学方法 水力学方法
辽河流域	河道断流、地表水污染严重、地下水超采、河口三角洲湿地退化、海水入侵等	环境功能设定法 生态功能法
海河流域	水资源严重短缺、过度开发、河道湿地萎缩和水质下降等	恢复目标设定法 等级生态功能法 整体功能法
淮河流域	洪水严重、水质型缺水和水污染严重	环境功能法 整体功能法

($130.44 \times 10^8 \text{ m}^3$);海河流域河流湿地最小生态需水量计算结果的大小顺序为:功能设定法($65.95 \times 10^8 \text{ m}^3$)>生态功能法($33.12 \times 10^8 \text{ m}^3$)。各研究区域采用不同学科方法所得到的生态需水量计算结果的相对标准偏

差为:黄河下游流域 0.27;黄河三角洲 0.56;辽河流域 0.36;海河流域 0.47,相对标准偏差均大于 0.25,说明不同学科方法计算所得结果差异性较大,大致趋势为:水力学方法>水文学方法>功能设定法>生态功能法>

表 10 流域生态环境需水方法学科维度演变列表

Table 10 Trend of environmental flow methods in subject dimension

时间段	具体时间/提出者	方法内容	方法特点
20 世纪 40 年代前	美国	提出了流域管理和河道最小生态流量的概念 ^[13]	概念模型
20 世纪 70 年代	1976, Tennant	Tennant 法 ^[6]	主要在美国发展,以水文学方法为主
	1976, Bartschi	湿周法 ^[6]	
	1979, Nehring	R2 Cross 法 ^[6]	
	1979, Stalnaker	7Q10 ^[6]	
	1979, USFWS	IFIM 法 ^[6]	
20 世纪 80 年代	1980, Nelson	利用简单的水力模型计算鱼类生长所需要最小需水量 ^[2]	提出了水力学方法,各国逐步开展生态环境需水研究
	1982, Glova	提出 IFIM 法 ^[6]	
	1983, 澳大利亚等国	开始接受河流生态流量的概念并广泛开展研究 ^[32]	
	1985, Statzner	提出并发展了河流连续体的思想 ^[32]	
	1986, Loar 等	提出了 BBM 法 ^[6]	
	1989, King&O'Keeffe	提出了水力学方法的概念 ^[6]	
	1989, 汤奇成	率先在中国开展了生态环境需水研究 ^[33]	
	1990, Stromberg	流量-湿地树种关系模型 ^[33]	
	1991, Matthews	Texas 法 ^[6]	
	1992, Arthington	HEA 法 ^[7]	
20 世纪 90 年代	1995, Docampo	Basque 法 ^[7]	生态环境需水研究方法逐步成熟,提出了栖息地模拟和综合法
	1996, Jorde	CASMIR 法 ^[6]	
	1996, Nestler et al.	RCHARC 法 ^[7]	
	1996, Tharme	首先提出整体功能法 ^[6]	
	1998, Dunbar et al.	NGPRP 法 ^[34]	
	1998, Gleick	提出了基本生态需水的概念 ^[34]	
	1999, 刘昌明	提出了四大平衡原理 ^[34]	
	2000, Metsi Consultants	DRIFT 法 ^[6]	
	2001, Stewardson	Flow Events Method ^[6]	
	2001, 王西琴等	根据河流的稀释、自净等环境功能,提出了以段首为控制断面的河道环境需水量(Q_v)计算方法 ^[5]	
21 世纪以来	2001, 王让会	界定了合理的生态水位,应用植被耗水和定额法估算塔里木河流域生态需水量 ^[8]	运用新型信息技术和模拟模型手段,生态需水研究范围扩大
	2001, 崔树斌	水质目标约束法、最枯月平均流量法 ^[1]	
	2001, D.A. Hughes	运用数据分析方法,将 BBM 法和水文模型相结合 ^[1]	
	2003, 杨志峰	流域生态环境需水分级、生态单元分类和生态功能法 ^[35]	
	2003, David J. Walker	运用统计模型预测河口生态需水量 ^[36]	
	2003, Denis A. Hughes	用 desktop 模型估算南非地区河流的最小需水量 ^[37]	
	2003, JM King	运用基于情景分析的整体论方法的河流生态需水评估 ^[44]	
	2005, 刘静玲等	建立了河流生态基流量整合模型 ^[38]	
	2006, 杨志峰等	运用生态功能法计算并总结流域生态需水规律 ^[1]	
	2006, 张远, 杨志峰	在遥感技术支持下计算研究区的林地最小需水量 ^[2]	
	2007, D.Mazvimavi et al.	运用 Hughes and Hannart 方法计算 Zimbabwe 需水量 ^[39]	
	2007, 杨薇	建立水环境的物理组件模型和概念组件模型并应用于城市河流生态环境需水优化配置 ^[40]	
	2008, Jorge Alcazar	用神经网络模型计算 Ebro 流域的生态需水量 ^[41]	
	2008, 马乐宽等	运用层次分析法,借鉴水体生物快速评估法的思想,快速识别生态环境缺水区域 ^[33]	
	2008, ZHONG Ping et al.	运用生态水位法对白洋淀湿地不同季节的生态需水进行了计算 ^[45]	
	2009, 王凌河, 严登华	详细阐述了流域生态水文过程模型的研究进展 ^[14]	
	2009, Gunter Wriedt et al.	运用遥感技术、统计模型计算欧洲地区灌溉需水量 ^[42]	
	2010, HJ Steward, et al.	对于生态需水技术的运用进行了展望 ^[43]	
	2010, CUI Bao-shan, et al.	综合运用水文学、水力学和生态学方法对黄河三角洲生态需水和水资源合理配置进行了研究 ^[47]	

整体功能法;各研究区域采用不同学科方法所得结果不同主要因为:①设定的需水目标不同;②选取的典型需水断面不同;③不同计算方法的控制条件不同。

根据流域的主要环境问题推荐生态环境需水计算方法(表 9)。在选取计算方法时应根据流域的主要环境问题和生态目标,选用适当的计算方法。针对泥沙较多的河流建议采用环境功能设定法;以保护生物为目标的需水研究建议采用生态学方法和水力学方法;针对污染较严重和生态退化的河流,建议采用计算结果偏大的方法;在北方干旱和缺水地区,建议采用首先满足最小生态需水量,将生态功能法与综合法相结合,设定不同时间和空间的目标,划分等级计算最小、中等和适宜的生态需水量为管理者科学决策提供定量的科学依据。

5 流域生态需水方法发展趋势

流域生态需水方法从学科维度发展来看(表 10),20 世纪 40 年代在美国出现了流域生态环境需水的概念模型;20 世纪 70 到 90 年代,生态环境需水方法在各国逐步开展,水文学方法出现最早,水力学方法是生境模拟法的过渡,综合法综合考虑了自然-社会复合系统,强调河流生态系统的整体性,以专家意见来弥补生态资料的不足;进入 21 世纪以来,国内外生态环境需水理论、方法和工具迅猛发展,生态水文等优化模型与生态模拟等定量化方法开始成为热点和发展趋势。

流域生态环境需水方法具有如下演变趋势:

(1)从单学科分析向多学科综合发展^[45-46]

流域生态系统是自然-社会复合系统,人为活动对流域生态水文过程影响明显,因此流域生态环境需水研究需要综合水文学、水力学、生态学和环境科学等学科的理论和方法。已经从单一学科方法(如:水文学方法、水力学方法、生态学方法)向多学科综合与优化发展(如:综合法、生态功能法、生态水文模型)。

(2)从局部过程向全流域水文循环过程发展^[47]

随着流域水环境问题的不断加剧,流域生态环境需水研究需要从流域生态系统整体出发,以流域水文循环过程为基础探索生态需水机制。已从生态单元和局部过程的需水研究(如植被需水、土壤需水、污染物稀释需水等),通过模块整合和过程模拟等方式,发展成流域整体性的需水机制和调控研究。

(3)从传统技术向数字流域技术发展^[43,48]

随着数字信息和监测技术的发展,推动了将实地

考察、定位实地观测等传统方法与 GIS 等信息遥感技术相结合,并通过计算机数值模拟方法建立流域生态水文模型。

6 结论

(1)流域生态需水内涵包括生态健康评价、生态需水量计算和水资源的优化配置;流域生态需水研究目标需要兼顾维持流域生态系统健康和水资源可持续利用;流域生态需水研究的理论基础涵盖环境科学、生态学、水文学、水力学和系统论等学科,方法具有多学科性、系统性和整体性的特点。

(2)不同研究维度的重要性顺序为:学科维度(46%)>方法维度(33%)>空间维度(12%)>程序维度(8%),说明流域生态环境需水方法体系内容可主要从学科维度、空间维度和方法维度 3 个层面构建,学科维度最为关键。

(3)学科维度可划分为水文学方法、水力学方法、生态学方法、综合法和其他方法 5 个子维度,各子维度方法数量大小顺序为:水文学方法(31%)>生态学方法(28%)>其他方法(21%)>水力学方法(12%)>综合法(8%)。采用不同学科方法计算同一研究区域的生态需水量所得结果不同;各研究区域采用不同学科方法所得到的生态需水量计算结果的差异性较大,相对标准偏差均大于 0.25。在选取计算方法时应根据研究流域的主要环境问题和生态目标,选用适当的计算方法或进行方法优化。

(4)流域生态环境需水方法在学科维度层面具有 3 大演变趋势:从单学科分析向多学科综合发展;从局部过程向全流域水文循环过程发展;从传统技术向数字流域技术发展。建议以流域水环境问题为导向,以流域生态系统、生态系统管理和环境优化管理理论为指导,以生态优先和保证基流为基本原则,加强流域生态系统水量、水质和水生态的同步系列监测。

7 展望

流域生态需水研究方法研究涉及较多学科,是一项复杂、综合性较强、涵盖范围较广的科学研究,亟待解决的科学问题如下:(1)流域-模块与模块间组合结构与功能相互关系研究,明确流域生态环境需水耦合机理。(2)流域生态系统与水循环的互动-适应性机制研究,探索流域生态水文过程及其变化规律。(3)流域生态需水与流域生态完整性关系研究,明晰人为干扰强度与流域恢复力之间的关系。

流域生态需水方法研究应从以下几个方面继续完善:(1)理论和科学假设。科学理论的提出能够推进学科的发展,而科学假设是科学理论的前身。目前流域-生态需水理论主要源于地理学、生态学、水文学、水力学等传统基础学科,需进行跨学科的理论体系和方法论构建,突破传统学科间的界线,提升和创新理论和方法体系。(2)方法论体系。流域生态需水研究涉及自然环境和人类社会,具有双重属性。因而此领域研究方法应向多元化发展,可综合运用专家型定性模型、整体功能法、多学科综合评估模型和数学模型,从中寻求解决问题的最佳方案。(3)技术手段和工具。技术手段和工具的更新是方法改进和创新的推动力,生态需水研究的发展应以提高仪器的准确度和精确度为前提,充分利用先进的生态监测仪器、在线连续监测和计算机计算功能,不断发展和完善生态需水模型。

参考文献:

- [1] 杨志峰,刘静玲,孙涛,等.流域生态需水规律[M].北京:科学出版社,2006.
YANG Zhi-feng, LIU Jing-Ling, SUN Tao, et al. Discipline of ecological water requirement[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] 张远.黄河流域坡高地与河道生态环境需水规律研究[D].北京:北京师范大学,2006:1-50.
ZHANG Yuan. Rule of environmental flow in Yellow River Basin and Highlands the river[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2006: 1-50.
- [3] Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 571-579.
- [4] 姜德娟,王会肖.生态环境需水量研究进展[J].应用生态学报. 2004, 15(7): 1271-1275.
JIANG De-juan, WANG Hui-xiao. Advances in ecological and environmental water demand[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1271-1275.
- [5] 王西琴,张远,刘昌明.河道生态及环境需水理论探讨[J].自然资源学报, 2003, 18(2): 240-245.
WANG Xi-qin, ZHANG Yuan, LIU Chang-ming. Discussion of stream ecology and environmental water demand theory[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 240-245.
- [6] Tharme R E. A Globe perspective on environmental flow assessment[J]. *River Res Applic*, 2003, 19(2): 397-441.
- [7] Mike Acreman. Defining environmental river flow requirements: a review [J]. *Hydrology and Earth System Scicence*, 2004, 8(5): 861-876.
- [8] Louise Korsgaard. Environmental flows in integrated water resources management: Linking flows, services and values[M]. Vester Kopi, DTU: Institute of Environment & Resources, 2006: 12-30.
- [9] 王让会,宋郁东,樊自立,等.塔里木流域“四源一干”生态需水量评估[J].水土保持学报, 2001, 15(3): 19-22.
WANG Rang-hui, SONG Yu-dong, FAN Zi-Li, et al. Tarim Basin in the “Four Source Streams” ecological water demand[J]. *Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3): 19-22.
- [10] 刘静玲,杨志峰,林超,等.流域生态需水规律研究[J].中国水利, 2006, 13: 18-21.
LIU Jing-Ling, YANG Zhi-Feng, LIN Chao, et al. Ecological water requirement study[J]. *China Water*, 2006, 13: 18-21.
- [11] 杨志峰,崔保山,刘静玲,等.生态需水理论方法与实践[M].北京:科学出版社,2003.
YANG Zhi-feng, CUI Bao-shan, LIU Jing-ling et al. Theory method and practice of ecological water demand[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [12] 王浩,游进军.水资源合理配置研究历程与进展[J].水利学报, 2008, 39(10): 1168-1174.
WANG Hao, YOU Jin-jun. Study process and progress of water resource reasonable allocation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(10): 1168-1174.
- [13] 张丽,张丽娟,梁丽乔,等.流域生态需水的理论及计算研究进展[M].农业工程学报, 2008, 24(7): 307-312.
ZHANG Li, ZHANG Li-juan, LIANG Li-qiao, et al. Ecological water demand and calculations of theoretical progress[M]. *Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 307-312.
- [14] 王凌河,严登华,龙爱华,等.流域生态水文过程模拟研究进展[J].地球科学进展. 2009, 24(8): 891-898.
WANG ling-he, YAN Deng-hua, LONG Ai-hua, et al. Ecohydrological process research[J]. *Earth Science*, 2009, 24(8): 891-898.
- [15] 黄强,李群,张泽中,等.计算黄河干流生态环境需水 Tennant 法的改进及应用[J].水动力学研究与进展, 2007, 22(6): 774-781.
HUANG Qiang, LI Qun, ZHANG Ze-zhong, et al. Calculation of the Yellow River ecological water demand Tennant method and its application[J]. *Water Dynamics Research and Development*, 2007, 22(6): 774-781.
- [16] 杨志峰,陈贺.一种动态生态环境需水计算方法及其应用[J].生态学报, 2006, 26(9): 2989-2995.
YANG Zhi-feng, CHEN He, A dynamic eco-environmental water demand calculation method and its application[J]. *Ecology*, 2006, 26(9): 2989-2995.
- [17] 吴春华,刘昌明.生态水力半径法计算河道内生态需水量研究[J].人民黄河, 2008, 30(10): 52-56.
WU Chun-hua, LIU Chang-ming. Ecological hydraulic radius method of ecological water demand of river channels[J]. *The people of the Yellow River*, 2008, 30(10): 52-56.
- [18] 蒋晓辉,刘昌明.基于流量恢复法的黄河下游鱼类生态需水研究[J].北京师范大学学报, 2009, 45(10): 537-542.
JIANG Xiao-hui, LIU Chang-ming. Based on the flow of the Yellow River fish restoration method of ecological water demand[J]. *Beijing Normal University*, 2009, 45(10): 537-542.
- [19] 张修宇,徐建新,雷宏军,等.城市生态环境需水理论与计算方法研究[J].华北水利水电学报, 2007, 28(6): 7-9.
ZHANG Xiu-yu, XU Jian-xin, LEI Hong-jun, et al. Urban ecological environmental water demand theory and calculation method [J]. *North China Water Conservancy and Hydropower College*, 2007, 28(6): 7-9.
- [20] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较 [J].水动力学研究与进展, 2003, 18(3): 294-301.
YANG Zhi-feng, ZHANG Yuan. Comparison of instream environmental flow methods[J]. *Water Dynamics Research and Development*, 2003, 18(3): 294-301.
- [21] King J M. Environmental flow assessments for rivers manual for the building block methodology[R]. Republic of South Africa: Water Re-

- search Commission, 2008:10-17.
- [22] 倪晋仁. 黄河下游河流最小生态环境需水量初步研究 [J]. 水利学报, 2002, 10(1):1-7.
NI Jin-ren. Minimum ecological water demand of Yellow River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 10(1):1-7.
- [23] 王高旭. 黄河中下游河道生态需水研究[J]. 中山大学学报, 2009, 48(5):125-130.
Wang Gao-Xu. Instream environmental flow of Yellow River[J]. *Sun Yat-sen University*, 2009, 48(5):125-130.
- [24] 崔保山, 李英华, 杨志峰. 基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J]. 生态学报, 2005, 25(3):606-613.
CUI Bao-shan, LI Ying-hua, YANG Zhi-feng. Based on management objectives of the Yellow River Delta wetland ecological water demand [J]. *Ecology*, 2005, 25(3):606-613.
- [25] 刘晓燕, 连煜, 可素娟. 黄河河口生态需水分析 [J]. 水利学报, 2009, 20(8):956-962.
LIU Xiao-yan, LIAN Yi, KE Su-juan. Analysis of ecological water demand in Yellow River Estuary[J]. *Water Resources Science*, 2009, 20(8):956-962.
- [26] 王新功. 黄河河口淡水湿地生态需水研究 [J]. 人民黄河, 2007, 29(7):33-35.
WANG Xin-gong. Research on freshwater wetlands water demand in Yellow River[J]. *The people of the Yellow River*, 2007, 29(7):33-35.
- [27] 严登华, 何岩. 东辽河流域河流系统生态需水研究[J]. 水土保持学报, 2002, 15(1):46-49.
YAN Deng-hua, HE Yan. Research on environmental flow of river basin in Liaohu[J]. *Soil and Water Conservation*, 2002, 15(1):46-49.
- [28] 王西琴, 刘昌明, 张远. 基于二元水循环的河流生态需水水量与水质综合评价方法:以辽河流域为例[J]. 地理学报, 2006, 61(11):1132-1140.
WANG Xi-qin, LIU Chang-ming, Zhang Yuan. Dualistic water cycle on ecological water demand of river water and water quality evaluation method: in the Liaohu River Basin[J]. *Geographical Journal*, 2006, 61(11):1132-1140.
- [29] 魏彦昌, 苗鸿, 欧阳志云, 等. 海河流域生态需水核算[J]. 生态学报, 2004, 24(10):2100-2107.
WEI Yan-chang, MIAO Hong, OUYANG Zhi-yun, et al. Primary estimate of ecological water requirement in Haihe Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2100-2107.
- [30] 赵长森, 刘昌明, 夏军, 等. 闸坝河道内生态需水研究:以淮河为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3):401-411.
ZHAO Chang-sen, LIU Chang-ming, XIA Jun. Instream Ecological flow of dammed river: A case study of Huaihe River[J]. *Journal of natural resources*, 2008, 23(3):401-411.
- [31] 梁友. 淮河水系河湖生态需水量研究[D]. 北京:清华大学, 2009.
LIANG You. The Research of instream environmental water requirement in Huaihe River system[D]. Beijing: Qinghua University, 2009.
- [32] 汤洁, 余孝云, 林年丰, 等. 生态环境需水的理论和方法研究进展[J]. 地理科学, 2005, 25(3):367-37.
TANG Jie, SHE Xiao-yun, LIN Nian-feng, et al. Advances of research on environmental flow theory and method[J]. *Geography*, 2005, 25(3):367-37.
- [33] 马乐宽. 流域生态环境需水研究:以延河流域为例[D]. 北京:北京大学, 2008.
MA Le-kuan. Ecological environmental water demand: Yanhe Basin [D]. Beijing: Beijing University, 2008.
- [34] 赵博. 生态环境需水计算方法概述 [J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(2):53-57.
Zhao Bo. Ecological environmental water demand calculation method [J]. *North Water*, 2007, 5(2):53-57.
- [35] 杨志峰, 尹民, 崔保山. 城市生态环境需水量研究:理论与方法[J]. 生态学报, 2005, 25(3):381-396.
YANG Zhi-feng, Yin Min, CUI Bao-shan. Urban ecological environmental water demand: Theory and methods [J]. *Ecology*, 2005, 25(3):381-396.
- [36] David J Walker. Assessing environmental flow requirements for a river-dominated tidal inlet[J]. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(1):171-179.
- [37] Denis A Hughes, Pauline Hannart. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 270(2):167-181.
- [38] 刘静玲, 杨志峰, 肖芳, 等. 河流生态基流量整合计算模型 [J]. 环境科学学报, 2005, 25(4):436-441.
LIU Jing-ling, YANG Zhi-feng, XIAO Fang, et al. Integrates calculation model of river ecosystem base flow[J]. *Environmental Science*, 2005, 25(4):436-441.
- [39] Mazvimavi D, Madamombe E, Makurira H. Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2007, 32(2):995-1006.
- [40] 杨薇. 城市河流生态环境需水优化配置理论及应用研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.
YANG Wei. Urban water demand of river ecosystem optimization theory and application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [41] Jorge Alcazar, Antoni Palau, Cristina Vega-Garc. A neural net model for environmental flow estimation at the Ebro River Basin, Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(2):44-55.
- [42] Gunter Wriedt, Marijn Van der Velde, Alberto Aloe, et al. Estimating irrigation water requirements in Europe[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(2):527-544.
- [43] Steward H J, Madacombe E K, Topping C C. Adapting environmental flows technologies for Zimbabwe. Proceedings of Environmental Flows for River System and 4th International Ecohydraulics Symposium. Southern Waters, Cape Town, South Africa. 2002.
- [44] King J M, Brown C A, Sabet H. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers [J]. *River Research and Applications*. 2003.19:619-639.
- [45] ZHONG Ping, YANG Zhi-feng, CUI Bao-shan, et al. Eco-environmental water demands for the Baiyangdian Wetland[J]. *Front Environ Sci Eng China*, 2008, 2:73-80.
- [46] Patrick B S, Hafroth A C, Anderw C W, et al. Ecosystem effects of environmental flows: modelling and experimental floods in a dryland river [J]. *Freshwater Biology*. Special Issue: Environmental flows: science and management. 2010, 55(1):68-85.
- [47] CUI Bao-shan, LI Xia-li, ZHANG Ke-jiang. Classification of hydrological conditions to assess water allocation schemes for Lake Baiyangdian in North China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385:247-256.
- [48] Lytle J T, Hickey D C, Douglas C A, et al. Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds[J]. *Freshwater Biology*. Special Issue: Environmental flows: science and management. 2010, 55(1):206-225.