

平原水网地区生态水位确定方法研究

唐永良¹, 孙晓斌², 纪 源³, 尤征懿⁴, 尚小添³, 郑新琨³

(1. 无锡市河湖治理和水资源管理中心, 江苏 无锡 214021; 2. 泰州市水利局, 江苏 泰州 225300;
3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 江苏 无锡 214021)

摘要:对比分析了水文学法(近10年最枯月平均水位法)、水力学法(湿周法)和栖息地模拟法(PHABSIM模型法)在无锡市城市防洪大包围平原水网地区生态水位确定中的实际应用,计算结果分别为2.94 m、2.70 m、3.30 m。其中,水文学法相比其他2种方法对于无锡市城市防洪大包围的适用性强,最终确定以水文学法的计算结果2.94 m作为无锡市城市防洪大包围内主要河道的生态水位值,可为将来提出适用于江苏省平原水网状况下的生态水位计算方法提供参考。

关键词:生态水位; 平原水网区; 大包围; 水文学法; 水力学法; 栖息地模拟法

中图分类号:R735.3+5; R363.1+4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2023)04-0042-0005

Research on the method of determining ecological water level in the plain water network area

TANG Yongliang¹, SUN Xiaobin², JI Yuan³, YOU Zhengyi⁴,
SHANG Xiaotian³, ZHENG Xinkun³

(1. Wuxi River and Lake Governance and Water Resources Management Center, Wuxi 214021, China;
2. Taizhou Water Conservancy Bureau, Taizhou 225300, China;
3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Wuxi Branch of Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Wuxi 214021, China)

Abstract: The application of hydrological method (mean water level of the driest month in the last ten years), hydrodynamic method (wet cycle method) and habitat simulation method (PHABSIM model method) are compared and analyzed in determining the ecological water level in the plain water network area of urban flood control in Wuxi, and the results are 2.94 m, 2.70 m and 3.30 m, respectively. Among them, hydrology method is more applicable to the urban flood control encircling in Wuxi than the other two methods. Finally, the calculated result of hydrology method is 2.94 m as the ecological water level value of the main river in the urban flood control encircling in Wuxi City. It also provides a reference for future ecological water level calculation methods applicable to the plain water network in Jiangsu Province.

Key words: ecological water level; plain water network area; large envelope; hydrological method; hydrodynamic method; habitat simulation method

收稿日期: 2022-08-02

项目基金: 江苏省水利科技项目(2021040)

作者简介: 唐永良(1968—), 高级工程师, 本科, 主要从事水资源、水环境、水生态管理与研究工作。E-mail: 393348587@qq.com

河流生态系统的确定是水资源合理利用和生态环境保护的根本,河湖生态流量(水位)是维持河湖生态系统稳定、生态平衡以及满足河湖基本功能的基本需求^[1]。

生态需水有关的研究最早始于19世纪40年代。美国鱼类和野生动植物管理局为避免河流生态系统退化,规定需保持河流最小生态流量,最早提出了生态需水流量的概念^[2]。到20世纪70年代,关于河流生态流量的概念逐渐被大家接受和认同,法国、英国和澳大利亚等国家的众多学者也开始从不同角度对河流生态流量开展了系统研究。目前,国际上最为广泛接纳的是2007年的布里斯班宣言中所描述的关于“生态流量(Environmental Flow)”的解释,即能够“维持河道及河口的自然生态系统和维持人类生存发展所依赖的生态系统所需要的水量、时间和水质^[3]”。

目前,国内对于河道内生态需水的研究仍然还处于起步阶段,大多是对国外方法的借鉴和改进,有关生态需水量的计算方法已有200余种^[4],按照其本质原理和方法特点大体可以分为4类:(1)水文学法;(2)水力学法;(3)栖息地模拟法;(4)综合分析法。

而对于平原水网地区生态水位的确定方法尚未存在明确的计算体系和理论指导。平原水网区的特点是河湖密布,河道水面比降小,流速缓慢,流向顺逆不定,还时常滞流,水流流向、流速除受降雨径流影响外,还受到水利工程控制影响存在往复流,区域通常缺少长期的、不受人工闸坝调节控制的河湖流量监测资料。鉴于区域平原河网地区独特的地形地貌和水文特点,河网水位变化相对平稳,直接反映河湖水资源的状况,因此,采用水位目标作为河湖生态维护的基本参数^[5]。水网型城市,大量的水道在河网中交汇,将城市河流分为若干部分,陆地与水面的边沿也呈网状分布。长江三角洲南缘是整个太湖流域水网的典型低洼地区,是中国独特的传统城市空间,自然和人文资源兼备,位于这里的许多城市体现了水网城市的独特特征^[6]。无锡是典型的水网型城市,市区内水网纵横交错。

河流生态流量的研究对流域综合治理具有重要重大意义,其研究成果可以为河流综合治理提供科学有效的基准线和评估标志。如何在平原水网地区进行生态水位的确定正是当务之急,对于发展生态水位计算方法及流域生态系统的保护有极大的促进作用和重要的研究意义,可为江苏省平原水

网状况下的生态水位计算提供参考。

1 研究背景

无锡市城市防洪大包围又称无锡市运东大包围,工程于2004年5月25日开工建设,至2007年10月基本完成。防洪大包围位于无锡市中心城区,范围西至锡澄运河,南沿京杭运河,东以白屈港控制线为界,北至锡北运河,主要保护运河以东的中心城区,受益面积144 km²。大包围外围防线68.5 km,包括32 km堤防、11座口门建筑物、8个水利枢纽工程和27台套大型水泵,主要通过大包围8大水利枢纽将水排入围外河道,排涝流量415 m³/s,排涝模数均值达到2.88 m³/(s·km²)。防洪标准达到200年一遇,城市排涝标准达到20年一遇。

无锡市城市防洪大包围由众多二级圩区组成,主要包括北塘联圩、西漳大联圩、东亭大联圩等,二级圩之间的主要河道有古运河、伯渎港、九里河、北兴塘-转水河、严埭港等,这5条河道相互连通,主要承担圩内的排涝和调水任务。

2 研究方法 with 结果

2.1 水文学方法

无锡市城市防洪大包围内目前设有南门水位站和广丰水位遥测站,但广丰水位遥测站为无人值守遥测站,精度不高,资料也未进行整编。因此,选择南门水位站作为无锡市城市防洪大包围内生态水位研究的代表站。

目前常用的水文学方法有Tennant法^[7]、7Q10法^[8]、近10年最枯月平均水位法^[9]等,由于无锡市城市防洪大包围2007年建成投运,南门水位站2008年以后的数据可代表大包围内水位,2008—2020年,系列时长13 a,系列偏短,不具备长序列的水文资料。因此本次水文学法选择对资料要求较低的近十年最枯月平均水位法。

本次采用南门水位站2010—2020年共11年的逐月平均水位数据计算生态水位。南门站月平均最低水位范围是2.94~3.41 m,其中最大值为2019年7月水位,其次为2018年2月和12月的3.39 m,最小值为2014年1月份(表1),逐月平均水位过程见图1。

南门水位站最低月平均水位为2014年1月,应选取该水位作为无锡市城市防洪大包围的生态水位,即2.94 m。

表1 南门水位站 2010—2020 年最小月均值水位统计

时间/年	最小月均值水位/m	发生时间/月
2010	3.19	12
2011	3.16	3
2012	3.26	1
2013	3.26	12
2014	2.94	1
2015	3.21	2
2016	3.36	2、3
2017	3.32	2
2018	3.39	2、12
2019	3.41	7
2020	3.35	5

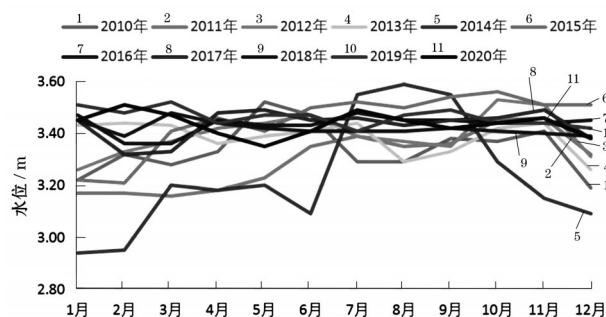


图1 南门水位站 2010—2020 年逐月均值水位过程线

2.2 水力学方法

湿周法^[10]是计算生态水位常用的水力学方法。湿周为水体与河槽的接触界线,湿周法假定栖息地生境质量与栖息地的湿周直接相关。通过控制断面的水力学数据,建立湿周与水位的关系曲线,寻找“突变点”。“突变点”以上,水位的变化基本不影响湿周。“突变点”以下,水位降低将减少湿周,此时水生生物对流量变化非常敏感^[11],降低水位破坏了生物栖息地。各断面湿周-水位关系曲线如表2。

选取最大值作为锡市城市防洪大包围的生态水位,根据上述分析可得,水力学法(湿周法)计算的生态水位结果为2.70 m。

2.3 栖息地模拟法

栖息地模拟方法是世界上使用第二广泛的方法。栖息地模拟法是基于河道内流量增加原理,根据指示物种所需的水力条件确定河流流量,目的是为生物提供一个适宜的物理生境,并将该选择定量化,由于是基于生物学原则,所以目前被认为是最为可信的评价方法。

表2 湿周法计算 5 条主要河道控制断面生态水位成果

河道名称	断面名称	突变点湿周/m	突变点水位/m
古运河	槐古大桥	40.45	2.70
伯渎港	锡兴路桥	71.05	2.70
九里河	团结大桥	54.60	2.60
北兴塘-转水河	友谊路桥	46.50	2.60
严埭港	严埭港桥	64.75	2.70

2.3.1 目标物种的识别结果

根据无锡市城市防洪大包围河生态系统的特点,构建了由风险系数、干扰系数、价值系数3个子系统组成的目标物种确定法。通过对目标物种评分,并采用熵权法计算指标权重,得到各种水生物评分的加权平均值,即目标指数,指数范围为1~4分,目标指数越高的水生物次序越靠前。本次生物栖息地法最终选择食物链顶层的鱼类及食物链较高层的底栖生物作为目标物种。

对无锡市城市防洪大包围5条主要河道控制断面6种鱼及3类底栖动物进行目标物种评价。评分结果,见表3。

除了对具有生态系统特色和代表性的关键物种进行识别外,对计算无锡市城市防洪大包围内主要河道控制断面生态水位的目标物种还要从生态系统的营养级和食物链考虑,确定食物链顶层的优势物种。通过目标物种确定体系计算出具有生态系统特色和代表性的目标物种为鲫鱼,底栖动物为白虾。同时,通过渔获调查和垂钓者采访的经验确定法,考虑到物种的生活史、习性等因素,最终确定鱼类目标物种为鲫鱼,底栖动物的目标物种为螺蛳。

2.3.2 栖息地模拟法模型建立及目标物种生境与流量关系计算

栖息地模拟法(PHABSIM法)的分析过程是先界定目标物种对平均流速、水深和底质等重要的栖息地水力学因子的适应度曲线,然后计算栖息地河段在不同流量下的水力学因子,再结合栖息地适应度曲线查得该水力学因子对应的栖息地适应度指数,这些适应度指数与栖息地水域平面面积的乘积就是该水力学条件下的加权可利用面积(weighted usable area, WUA)。PHABSIM模拟可以得到流量-WUA关系曲线,取最大WUA所对应的流量作为适宜生态流量^[12]。

栖息地模型则根据水力学模型计算的不同流

表3 无锡市城市防洪大包围 5 条主要河道控制断面目标物种评分结果

种类		鲢鱼	鳊鱼	鳊鱼	鲫鱼	昂刺鱼	窜条鱼	螺蛳	河蚌	白虾
风险系数	资源现状	3	3	3	3	4	3	2	3	3
	食性等级	2	2	1	3	3	1	1	1	1
	物种大小	2	2	2	2	1	1	1	2	1
	繁殖年龄	2	2	2	3	2	2	2	2	1
	繁殖周期	2	2	1	2	2	2	1	1	2
	种群结构	2	2	2	2	2	2	1	1	2
干扰系数	过度利用	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	工程阻隔	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	水体污染	2	2	2	2	2	2	2	2	2
价值系数	特有情况	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	种型情况	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	经济价值	1	1	1	1	1	1	1	1	2
目标物种指数		3.875	3.875	2.785	4.040	4.005	3.705	2.505	2.705	3.710
目标物种次序		3	3	7	1	2	6	9	8	5

量下各断面流速与水深分布,通过模型中目标物种的适应度曲线,分析横断面各分区的流速与水深所对应的适应度指数,计算加权可利用面积 A_{MUA} ,公式如下:

$$A_{MUA} = \sum F[f(V_i), f(D_i), f(C_i)] A_i \quad (1)$$

式中: A_i 为研究河段第*i*分区的水域面积; $f(V_i)$ 、 $f(D_i)$ 、 $f(C_i)$ 分别为第*i*分区的流速、水深、河床底质适应度指数; F 为第*i*分区的组合适应度因子(combined suitability factor, CSF)值。PHABSIM模型提供4种CSF的计算方法,分别为

$$\text{乘积法: } F = f(V)f(D)f(C) \quad (2)$$

$$\text{几何平均法: } F = \sqrt[3]{f(V)f(D)f(C)} \quad (3)$$

$$\text{最小值法: } F = \min[f(V), f(D), f(C)] \quad (4)$$

$$\text{加权平均法: } F = k_v f(V) + k_D f(D) + k_C f(C) \quad (5)$$

式中: k_v 、 k_D 、 k_C 分别为流速、水深及河床底质适应度指数的权重因子,其总和为1,在确定古马干河生态水量中依据实际情况给予不同的权重。乘积法假设3种参数 $f(V)$ 、 $f(D)$ 、 $f(C)$ 的适合度指数影响力相同;几何平均法针对此3种适合度指数做几何平均;最小值法则是取最小的适合度指数当作CSF值;而加权平均法是依据古马干河实际调研情况,通过经验判断的 $f(V)$ 、 $f(D)$ 、 $f(C)$ 加权,再去推求流量与加权可利用面积的关系。模型分区采用湿周法的控制断面进行分区,本次计算采用的模型不考虑温度及渠道系数对目标物种生物适应程度的影响,因

此,这2项指标适应度恒定为1。主要考虑河道流速及河道水深对目标生物的生物适应程度影响。

鲫鱼流速-生物适应度、水深-生物适应度等指标曲线见图2。

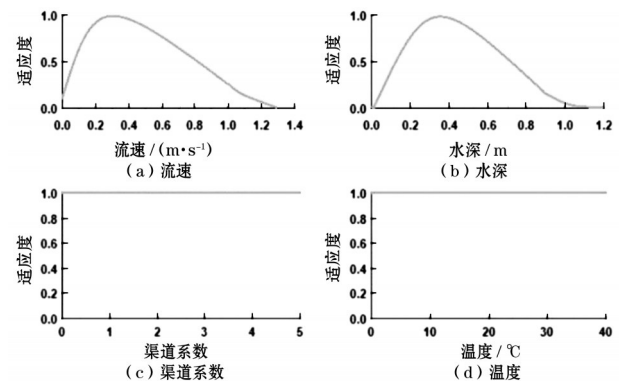


图2 鲫鱼流速、水深、渠道系数、温度-生物适应度曲线

由图2可知,鲫鱼在流速为0.2~0.3 m/s时,生物适应度最好;流速处于0.1~0.8 m/s范围内河道流速能够较好地满足鲫鱼对生境的需求;水深在0.36 m左右时,鲫鱼的生物适应度最好;水深在0.1~0.7 m范围内能够较好满足鲫鱼对生境的需求。

螺蛳流速-生物适应度、水深-生物适应度等指标曲线见图3。由图3可知,螺蛳在流速为0.2~0.3 m/s时,生物适应度最好;流速处于0.1~0.7 m/s范围内河道流速能够较好地满足螺蛳对生境的需求;水深

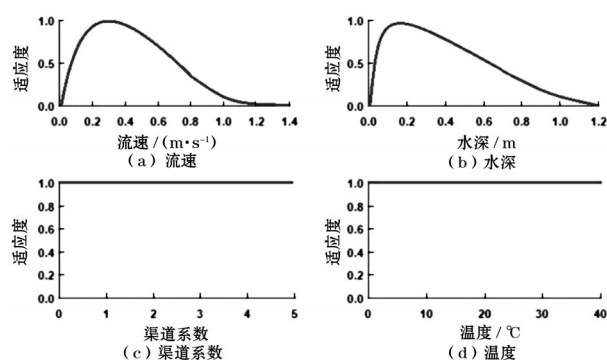


图3 螺蛳流速、水深、渠道系数、温度-生物适应度曲线

在0.15 m左右时,螺蛳的生物适应度最好;水深在0.05~0.60 m范围内能够较好满足螺蛳对生境的需求。

通过上述4类指标与断面边界情况,建立PHABSIM模型计算生态水位和水生物生境的关系,由于5条主要河道控制断面高程不同,以断面边坡平台高程最高的槐古大桥断面作为计算对象。鲫鱼适宜生境对应生态水位为2.8~3.4 m;螺蛳适宜生境对应生态水位为2.75~3.3 m。

栖息地模拟法以2种目标物种的生态水位最大值为最终结果。这2种目标物种生态水位最大值为3.30 m。

3 讨 论

(1)分析3种方法的计算结果,水文学方法(近10年最枯月平均水位法)计算结果为2.94 m。水文学方法基于历史水文长序列资料进行分析计算,对平原水网河流的实际情况进行了简化。但水文学方法采用的数据为无锡市城市防洪大包围建成后的实测水位数据,考虑到无锡市城市防洪大包围内平原水网生境在这段时期内保持稳定,数据系列包含了完整的丰平枯周期,比较客观地反应了无锡市城市防洪大包围内河道的水位10多年来经水利工程科学调度后的变化情况,近10年最枯月平均水位法对无锡市城市防洪大包围适用性较强。

(2)水力学法(湿周法)所得计算结果为2.70 m,为3种计算方法所得结果的最小值。湿周法假定河流生态系统的生境质量与断面的润湿程度直接相关,仅考虑到物理层面的实际需求。而无锡市城市防洪大包围内河道众多,控制断面不尽相同,断面宽度从20~150 m不等,不具备典型的控制断面能够代表大包围内的河流断面。且无锡市城市防洪大包围内的河流在每年汛期会进行排水。加之泥沙冲淤的影响,断面的实际情况变化明显,不具备代

表性。因此,水位对断面的润湿程度不能很好地反映河流的生境情况。

(3)栖息地模拟法(PHABSIM模型法)计算结果为3.30 m,栖息地模拟法计算的生态水位结果最大。栖息地模拟法虽然能够观测生物多样性,具备生物学基础,但无锡市城市防洪大包围内河道多为城市人工河道,水位流量均受八大枢纽调度影响,且根据现场调查,大包围内河道的生物多样性不佳,栖息地模拟法并不能很好地展示大包围内平原水网河流的生境情况。

(4)对比分析各个方法的优缺点,最终选取水文学法的计算结果作为无锡市城市防洪大包围内主要河道的生态水位值。对比其他2种方法,在无锡市城市防洪大包围为研究区域的情况下,水文学方法具有明显优势。本研究可为将来提出适用于江苏省平原水网地区生态水位的确定方法提供参考。

参考文献:

- [1] 易雨君,张尚弘.水生生物栖息地模拟[M].北京:科学出版社,2019.
- [2] POFF N L, MATTHEWS J H. Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5 (6): 667-675.
- [3] THAME 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.
- [4] 许强,吴小靖,秦灏,等.基于时间尺度条件下的阳澄湖生态水位研究[J].水力发电,2022,48(5):5-9.
- [5] 易雨君,徐嘉欣,宋劫,等.黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J].水资源保护,2022,38(1):133-140.
- [6] ARMENTROUT G W, WILSON J F. An assessment of low flows in streams in Northeastern Wyoming [J]. Water-Resources Investigations Report, 1987, 4(5): 533-538.
- [7] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等.论河流生态环境需水[J].水利学报,2002(9):14-19.
- [8] 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J].地理学报,2000(4):495-500.
- [9] 冯宝平,张展羽,陈守伦,等.生态环境需水量计算方法研究现状[J].水利水电科技进展,2004,24(6):59-62.
- [10] 陈志月,周华,吴维升,等.城市人工河道(周山河)生态流量确定方法[J].水电能源科学,2021,39(11):52-55.
- [11] 李建,夏自强.基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究[J].水利学报,2011,42(6):678-684.