水利学报
*Journal of Hydraulic Engineering*
ISSN 0559-9350,CN 11-1882/TV

# 《水利学报》网络首发论文

题目：野生大鲵栖息活动适宜水动力条件实验及适宜性曲线构建
作者：丁洋，赵进勇，彭文启，解宜兴，于子铖，付意成
DOI：10.13243/j.cnki.slxb.20240134
收稿日期：2024-03-13
网络首发日期：2024-12-23
引用格式：丁洋，赵进勇，彭文启，解宜兴，于子铖，付意成．野生大鲵栖息活动适宜水动力条件实验及适宜性曲线构建[J/OL]．水利学报．
https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20240134

**网络首发**：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认**：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2024-12-23 11:28:36　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1882.tv.20241220.1124.001

水　利　学　报
2024 年　　SHUILI　XUEBAO　　第 55 卷

文章编号：0559-9350(2024)00-0000-00

# 野生大鲵栖息活动适宜水动力条件实验及适宜性曲线构建

丁　洋[1]，赵进勇[1]，彭文启[1]，解宜兴[2]，于子铖[3]，付意成[1]

（1. 中国水利水电科学研究院，北京　100038；2. 湖南张家界大鲵国家级自然保护区事务中心，湖南 张家界　427400；
3. 河北工程大学 水利水电学院，河北 邯郸　056038）

**摘要：**为了探求大鲵栖息活动的适宜水动力条件，开展有效保育措施，通过室外观测实验，研究了不同流速及底质条件对大鲵栖息活动的影响，利用模糊逻辑法对大鲵在不同流速下的日均停留总时间及日均出没次数等实验参数进行综合分析，确定了大鲵的适宜流速条件与阈值，构建了大鲵流速适宜性曲线，根据大鲵在不同底质区域的日均停留总时间参数构建了大鲵河道指数适宜性曲线。结果表明：大鲵在低流速状态下停留时间占总时间的69.13%，表现出的行为谱类型较多，大鲵在中高流速的停留时间占总时间的 30.87%，进而确定大鲵适宜流速范围为 0~0.5 m/s（*HSI*>0.5，*HSI* 为适宜性指数），流速在 0.1~0.3 m/s 范围，*HSI* 处于峰值区域（*HSI*>0.8），当流速大于 0.6 m/s 时，栖息地适宜性逐渐降低；大鲵最适宜底质类型为砾石（8~16 mm）、卵石（16~250 mm）和漂石（>250 mm），不适宜在沙粒（0.062~2.0 mm）占比较多的区域活动。相关结果可为精准预测大鲵适宜栖息地分布，开展有效保育措施提供技术支撑。

**关键词：**野生大鲵；观测实验；流速；底质；适宜性曲线

**中图分类号：**TV131.2　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20240134

## 1　研究背景

两栖动物作为淡水生物群落重要组成部分，其数量变化影响周围生物群落结构组成，其种群数量的减少对淡水生态系统的结构和功能造成了严重的破坏[1]。中国大鲵（下简称大鲵）是我国特有的两栖动物，属有尾目、隐鳃鲵亚目、隐鳃鲵科、大鲵属。野生大鲵是国家二级保护动物，被国际自然保护联盟濒危物种红色名录（IUCN 红色名录）评定为极危物种[2-3]。野生大鲵是我国中部、南部山区河流生态系统的顶级捕食者，对其他水生生物类群的分布有着重要的影响，其种群状况能够反映当地河流生态系统的整体状况。目前野生大鲵生存状况仍在不断恶化，原有的大鲵亲本及生境质量遭到了破坏，甚至部分地区已完全丧失其生态功能[4]，受人类活动的影响，如水电工程建设造成的河流减脱水现象、农药化肥及工业发展造成的水质恶化、过渡捕捞及炸鱼等造成的饵料资源减少，均对大鲵的生境条件造成了损害，加强大鲵野生资源及其栖息地的有效保护势在必行。开展野生大鲵栖息活动适宜水动力条件实验及适宜性曲线构建的研究，对于精准预测大鲵适宜栖息地分布，进而开展有效保育措施具有重要的意义。

目前，常见的适宜性曲线确定方法包括专家判断法、文献参考法、栖息地确定法、水生生物捕获量统计法、控制实验法，其优缺点见表 1。大量关于栖息地适宜性的研究集中于对“栖息地特征”的研究，建立在对自然条件下调查数据的相关性分析，即利用相关性模型建立物种个体丰度与栖息地环

收稿日期：2024-03-13

基金项目：中国水利水电科学研究院基本科研业务费项目（WE0145B042021）；湖南张家界大鲵国家级自然保护区水生生物资源与环境综合调查项目（WE120202A0072022）

作者简介：丁洋（1993-），博士，工程师，主要从事河湖生态系统保护与修复研究。E-mail：dingyang@iwhr.com

通信作者：赵进勇（1976-），正高级工程师，博士生导师，主要从事生态水工学研究。E-mail：zhaojy@iwhr.com

境因子之间的关系。但是，由于自然条件下各种栖息地特征的非独立性，难以从中判断动物个体栖息地偏好实际所依据的“信号”，甚至不能区分动物的栖息地偏好究竟是“选择优质栖息地”还是“躲避劣质栖息地”或兼而有之[5]。对这些相关性分析结果的直接应用，可能会导致对栖息地偏好正确性和复杂性的高估[6]。同时，由于野生大鲵的野外遇见率低，通过调查大鲵丰度，进而建立其与栖息地环境因子之间的关系也尚为困难。

表 1　常见的适宜性曲线确定方法及优缺点

| 方法 | 优点 | 缺点 |
|---|---|---|
| 专家判断法[7] | 不需要进行野外调研，适宜性曲线绘制简单，针对一些常见物种专家判断准确率高 | 主观性较强，可能会因为专家的不同造成结果的不统一 |
| 文献参考法[8] | 不需要进行野外调研，适宜性曲线绘制简单 | 可能有某些物种无法查到 |
| 栖息地确定法[9] | 仅需获取指示物种栖息地空间位置进行野外调查即可 | 无法确定栖息地适宜性，结果存在不确定性 |
| 水生生物捕获量统计法[10] | 适宜性曲线绘制结果准确 | 数据量大，成本高；捕捞易受政策影响；野外遇见率低的生物不适用该方法 |
| 控制实验法[11] | 适宜性曲线绘制结果准确 | 数据量大，成本高；环境因子选择受实验场地限制 |

由于野外调查干扰因素众多，在可控条件下开展重复性室内实验成为研究水生生物适宜水动力条件的有效手段。诸葛亦斯等[12]和刘稳等[13]分别选择鲫鱼生理生化指标与鲫鱼生长状况指标表征适宜性，通过实验，研究了水动力学条件对鲫鱼适宜性影响，绘制了鲫鱼幼鱼栖息地流速适宜性曲线；Rachelly 等[14]通过水槽实验，研究了河道底质条件对茴鱼的影响，结果表明泥沙补给可以在渠道化的河流中为茴鱼提供有价值的栖息地；杨庆等[15]通过水槽实验，研究了流速条件对鱼类洄游上溯的影响，进而绘制了利于草鱼洄游的适宜性曲线。上述室内实验都对鱼类的水动力需求进行了研究，分别以鱼类的生理生化指标、生长指标、上溯指标来表征其栖息地的适宜性。

大鲵为夜游动物，一般在每年的 3 月逐渐开始活动与摄食，5 月开始夜间活动逐渐频繁，6—8 月繁殖前期最为活跃，10 月以后活动逐渐减少，11 月—次年 3 月为冬眠期[16]。大鲵栖息地主要包括栖息洞穴(产卵场、越冬场)、洞穴附近河流(索饵场)两方面，其在繁殖前期进出洞行为频繁，相关研究将大鲵繁殖前期的行为归纳为 12 种：爬行、游泳、捕食、休息、露头、换气、张嘴、推沙行为、冲凉行为、求偶行为、社会行为、打斗行为[17]。由于野生大鲵数量极少，并且多集中在夜间活动，加大了大鲵生活习性观测难度，此外，养殖池繁育的大鲵也无法全面的反映其生活习性。目前，越来越多的学者通过大鲵仿生态繁育池，营造大鲵的适生环境条件进行生活习性观测，大部分研究集中在活动节律[18]、繁殖行为[19]、适宜水质条件[20]，尚缺乏适宜水动力条件的研究。大鲵栖息河流需保证一定的流速及适宜的底质条件[21]，对水深要求不高[22]。本研究通过室外实验，观测大鲵进出洞及生态行为，分析流速、底质对大鲵栖息活动的影响，进而构建大鲵流速及河道指数适宜性曲线。

## 2　材料与方法

### 2.1　流速偏好性实验

2.1.1　实验场地及实验时间　实验场地位于湖南张家界大鲵国家级自然保护区事务中心内的仿生态繁殖区。选择大鲵活动频繁时期(7—9 月)开展观测实验，实验时间为 2021 年 7 月 16 日—8 月 26 日，共 42 天。

开展流速偏好性实验的仿生态河道长度为 20 m，宽度为 1 m，水深为 0.3 m。共有洞穴 19 个，洞穴平均宽度为 0.3 m，平均高度为 0.4 m。河道底质主要由砾石和卵石组成，底质呈均质化。每条实验河道有大鲵 14 尾，体重 10 kg 左右，体长 1 m 左右，年龄为 7~10 龄。每条河道分别安装 3 个红外摄

像头，分别位于上游、中游、下游，用于观测大鲵进/出洞及其在河道中的活动，视频存入 8 路海康威视录像机中。红外监控系统现场布置情况如图 1。

为排除溶解氧(DO)与水温(WT)的差异性对大鲵流速偏好性结果的影响，实验在河道上下游分别布设了水质在线监测系统，监测河道上下游的 DO 及 WT 并进行差异性分析。筛选观测期间内每天 18∶00—次日 7∶00 的 DO 及 WT 数据，监测时间间隔为 30 min，并取该时间段 DO 与 WT 的日平均值。

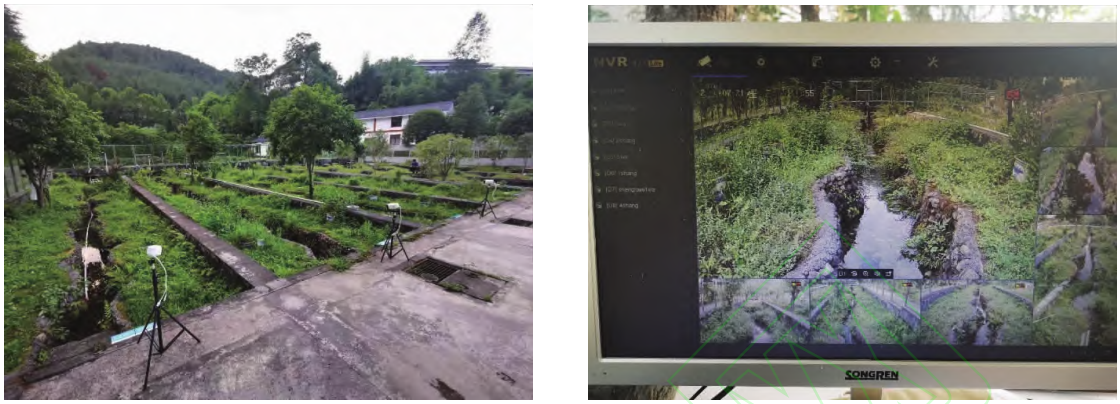



图 1　红外监控系统布设

2.1.2　实验设计　流速偏好性观测实验区域如图 2，主体为两条仿生态河道，还包括蓄水池、输水管、水泵等。蓄水池位于仿生态河道的上下游，上游蓄水池承接来水，下游蓄水池承接仿生态河道来水，当来水不足时，下游蓄水池存水通过水泵将水抽至上游蓄水池。蓄水池的作用为：(1)为实验提供水源及动力；(2)防止水流直接进入河道造成湍流。仿生态河道上游进水管处安装增压泵，通过调整增压泵的功率来控制进水量。并在河道中游及下游处各引一处出水管，管口直径 15 cm，通过开关阀门来控制进水量。

流速偏好性实验分为预实验与流速对照实验。预实验目的为：(1)初步判定大鲵对不同流速的适应性，设定流速区间；(2)使仿生态繁殖区大鲵逐步适应实验区域环境。流速对照实验是在水深条件相同的条件下，观测大鲵在不同流速下的活动偏好性，以大鲵在不同流速下的停留的总时间及出没次数来表征大鲵对流速的偏好性。夜间观测过程中，大鲵身体的 1/3 进入河道即认为大鲵出洞进入河道中活动[23]。采用人为观测方式观测大鲵出洞活动时，使用流速仪(LS1206B 型旋桨式)测定大鲵活动区域的流速。在测定过程中应避免惊扰到大鲵活动而使其回到洞中，并记录好大鲵在河道中各活动区域的停留时间。采用红外摄像头方式观测大鲵出洞活动时，利用录像视频回看，记录大鲵在河道中各活动区域的停留时间，并于第二天测量各活动区域的流速。

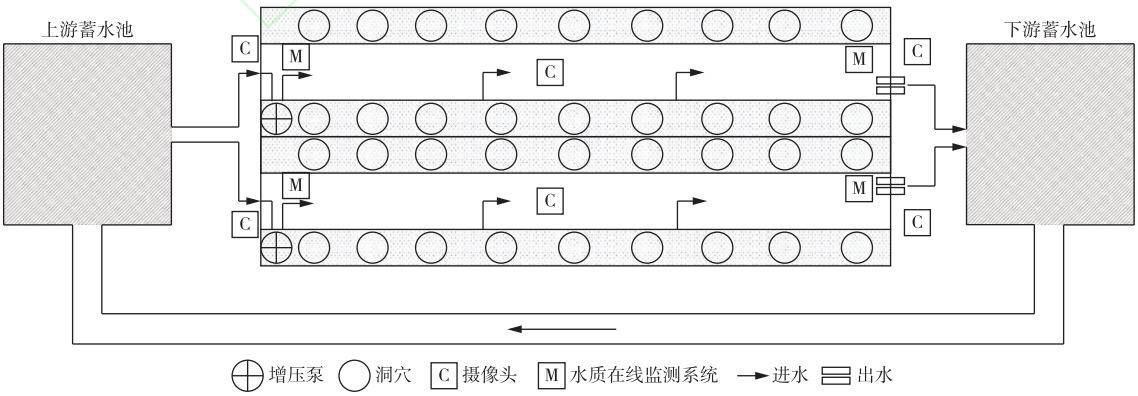
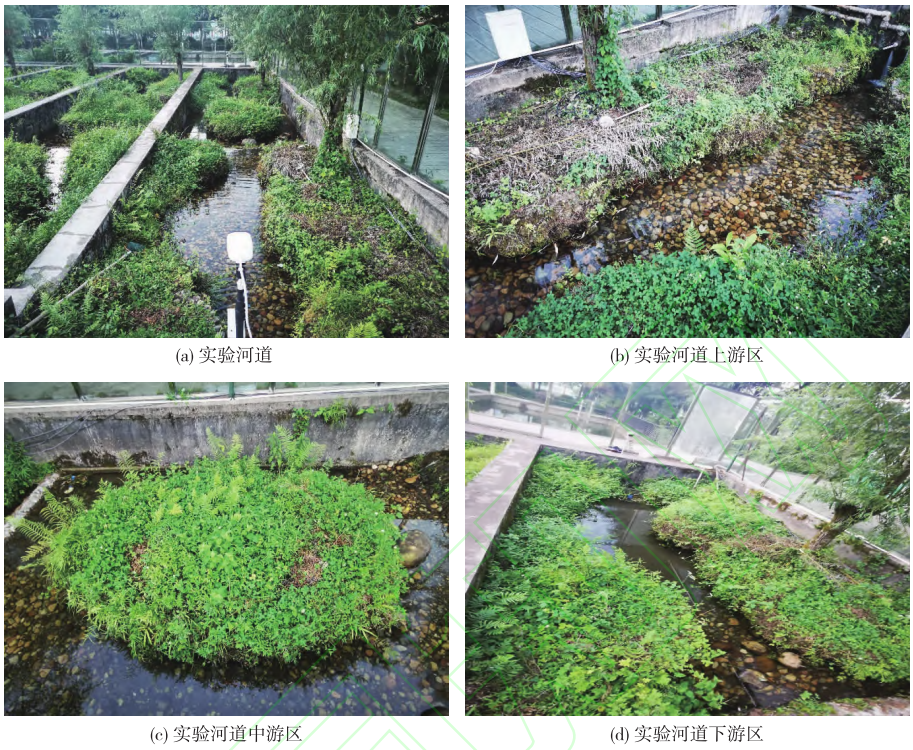



图 2　流速偏好性观测实验区域设计图

## 2.2　底质偏好性实验

2.2.1　实验场地及实验时间　底质偏好性实验时间为 2021 年 7 月 20 日—8 月 18 日，共 30 天。实验

河道长度为 20 m，平均宽度为 1.5 m，水深为 0.3 m，共有洞穴 15 个，洞穴平均宽度 0.3 m，平均高度 0.4 m。供试大鲵共有 10 尾。根据底质类型可将河道分为上游区、中游区、下游区，上游区底质以卵砾石为主，中游区底质以砾石为主，下游区底质以沙粒与砾石为主。实验河道环境如图 3，红外监控系统、水质监测系统设置与流速偏好性试验一致。



(a) 实验河道　(b) 实验河道上游区

(c) 实验河道中游区　(d) 实验河道下游区

图 3　底质偏好性实验场地环境

2.2.2　实验设计　底质偏好性实验区域设计图如图 4。采用人为观测与红外摄像头观测方式相结合的方法进行观测，每天记录大鲵在各区域的停留时间，为不打扰大鲵活动，第二天对覆盖大鲵活动范围的底质进行筛选。

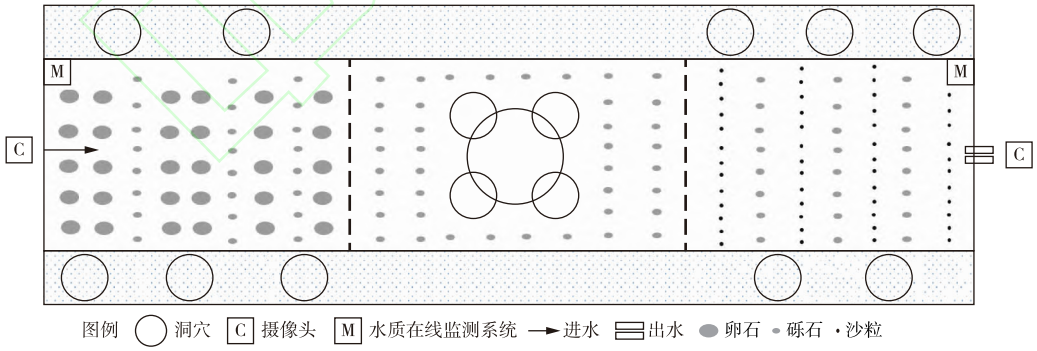



图 4　底质偏好性实验区域设计图

**2.3　适宜性曲线构建方法**　本文运用模糊逻辑法对实验结果进行处理和分析，主要步骤如下：

(1)评价因子选取。利用 MATLAB 中 fuzzy 工具箱进行模糊逻辑法分析。选取大鲵在不同流速下日均停留总时间(DRT)及日均出没次数(DN)作为表征大鲵对流速的偏好程度，评价因子的值即为输入变量。将上述两个评价因子通过特定的规则推断得到一个综合评价指标—“适宜性(Suitability)”，“适宜性”的值即为输出变量。相比于传统方法，模糊逻辑法可以更好地利用不确定的实验数据和模糊的专家认知来定义栖息地的适宜性[24-25]，然后基于模糊逻辑法得到的每组流速对应的适宜性指数

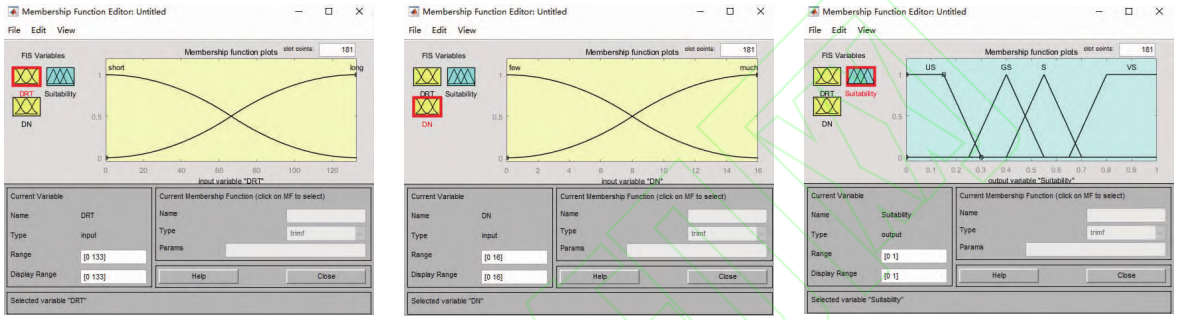
值，拟合得到大鲵流速适宜性曲线。模糊逻辑法具体流程可参考文献[15]。

(2)定义隶属度函数，构建模糊集合。常见的隶属函数有矩形函数、梯形函数、三角形函数、S型函数、Z型函数及高斯函数等。各评价因子隶属函数及模糊集合为：

a)日均停留时间(DRT)。日均停留时间(DRT)的隶属函数论域设置为[0，$DRT_{max}$]，模糊集合为{short，long}，分别对应的隶属度函数为Z型函数[0，$DRT_{max}$](short)，S型函数[0，$DRT_{max}$](long)。

b)日均出没次数(DN)。日均出没次数(DN)的隶属函数论域设置为[0，$DN_{max}$]，模糊集合为{short，long}，分别对应的隶属度函数为Z型函数[0，$DN_{max}$](short)，S型函数[0，$DN_{max}$](long)。

c)适宜性(Suitability)。适宜性(Suitability)的隶属函数论域设置为[0，1]，模糊集合为{非常适宜(VS)，适宜(S)，一般适宜(GS)，不适宜(US)}，分别对应的隶属度函数为梯形函数[0，0，0.15，0.3](US)，三角形函数[0.25，0.4，0.55](GS)，三角形函数[0.4，0.55，0.7](S)，梯形函数[0.65，0.8，1，1](VS)。隶属函数如图5。




(a) 日均停留时间(DRT)隶属函数　(b) 日均出没次数(DN)隶属函数　(c) 适宜性(Suitability)隶属函数

图5　隶属函数确定

## 3　结果与讨论

### 3.1　流速偏好性实验

3.1.1　预实验　在0.3 m的水深下，通过调整压力泵及开关阀门控制实验河道流速，培养供试大鲵7天，使其逐步适应河道环境变化。实验过程中，暂停供给大鲵的饵料来源，使其出洞进行觅食。观测结果表明，大鲵在0~0.3 m/s流速下的区域停留时间较长，观测到的行为包括：爬行、游泳、捕食、休息、露头、换气、张嘴、打斗。在0.4~0.6 m/s流速的区域中，大鲵会短暂停留，观测到的行为包括：爬行、游泳、捕食、休息、冲凉等。大鲵在0.7 m/s流速以上的区域鲜有出现。因此，根据预实验观测结果，设置实验流速为0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9和1 m/s。

3.1.2　流速对照实验　实验开始前，在实验河道投放草鱼幼体活体，与河道已有的虾蟹等底栖动物共同作为供试大鲵的饵料，之后在实验中期左右根据饵料量选择性投放饵料。由观测可知，大鲵出洞时间在18∶00—20∶00之间，并集中在19∶00左右，大鲵最后进洞时间在次日4∶00—6∶00之间，在此期间大鲵会有频繁进出洞的活动行为。

采用方差分析检验河道上下游DO和WT的差异性。实验河道上下游DO与WT箱型图如图6，单因素方差检验结果表明，实验河道上下游的DO与WT无显著差异($P>0.05$，均通过方差齐性检验)。说明在本实验中，DO与WT不会影响大鲵在河道中活动，进而排除了DO与WT可能对大鲵不同流速区域选择造成的不确定性影响。

为定性描述实验结果，需要对各流速条件进行分组分析。利用SPSS 26软件中的“系统聚类”工具对大鲵停留时间及出没次数进行聚类分析。结果显示，流速共分为4类：第一类流速为0，为静水状态；第二类流速为0.1、0.2和0.3 m/s，可认为是低流速状态；第三类流速为0.4、0.5 m/s，可认为是中流速状态；第四类流速为0.6、0.7、0.8、0.9和1 m/s，可认为是高流速状态。大鲵洞外活动行为见图7。

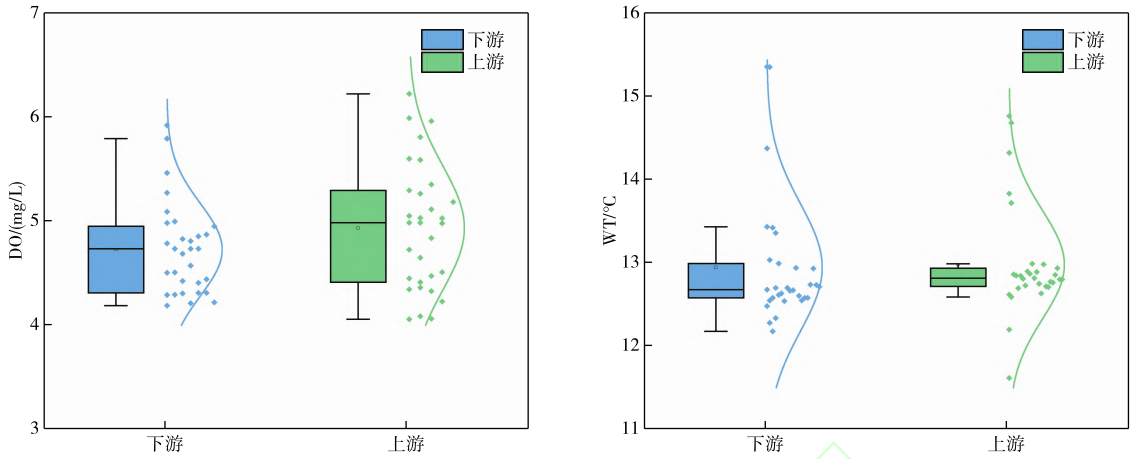



图 6　实验河道上下游 DO 与 WT 箱型图

第一类：流速 0 m/s。静止状态下，观测到大鲵停留时间为 2856 min，占在河道总停留时间的 10.43%。休息是大鲵在此流速下的主要行为，体现为大鲵在洞口附近缓慢爬行或者静止在水中，偶尔会进行捕食、爬行与换气。流速为 0 可认为是适宜流速范围的起点。

第二类：流速 0.1～0.3 m/s。低流速状态下，观测到大鲵停留时间为 16 066 min，占在河道总停留时间的 58.70%。大鲵在此流速下的主要行为包括：爬行、游泳、捕食、休息、露头、换气、张嘴、打斗。活动行为相比水流静止区域有所增加，并且观测到的摄食行为的时间有所增加，大鲵主要的摄食行为是等候食物随水流进入嘴边后再行捕食，较缓的流速可保证其食物不会被冲走，利于其摄食[22]。并且在实验河道中，供试大鲵的主要饵料来源为人为投入的草鱼幼苗，谭均军等[26]研究表明，草鱼幼苗适宜的流速区间为 0.16～0.4 m/s，与该流速区间基本吻合，故在 0.1～0.3 m/s 的流速区域内适宜大鲵捕食草鱼。露头、换气、张嘴等行为是大鲵的呼吸行为。停留时间的增长意味着大鲵在该流速区域内的出现数量较多，对领地和食物的争夺易引发大鲵之间的打斗。根据观察可知，流速在 0.1～0.3 m/s 之间可认为是最适宜流速范围。

(a) 露头行为

(b) 打斗行为

(c) 爬行行为

(d) 游泳行为

(e) 休息行为

图 7　大鲵洞外活动行为图

第三类：流速 0.4~0.5 m/s。中流速状态下，观测到大鲵停留时间为 5830 min，占在河道总停留时间的 21.30%。大鲵在此流速下的主要行为包括：爬行、游泳、捕食、休息、露头、换气、张嘴、打斗和冲凉。活动行为较 0.1~0.3 m/s 流速区域内增加了冲凉行为。冲凉行为指雄性大鲵移动到流速较大的区域，让流水冲刷自己的行为，多发生在大鲵繁殖前期。徐文刚等[27]通过实验分析冲凉行为与求偶行为有很强的相关性，认为冲凉行为可能会促进精巢发育，以此达到成功繁殖的目的。0.4~0.5 m/s 流速区间停留时间较 0.1~0.3 m/s 相比有所减少，可认为是适宜流速的缓慢下降范围。

第四类：流速 0.6~1 m/s。高流速状态下，观测到大鲵停留时间为 2618 min，占在河道总停留时间的 9.57%。大鲵在此流速下的主要行为包括：爬行、游泳、冲凉。行为相比 0.1~0.5 m/s 减少较多。部分大鲵在此流速区域会经过短暂停留，然后快速离开。0.6~1 m/s 流速区间可认为是适宜流速的急速下降范围。

**3.2　底质偏好性实验**　与流速偏好性实验相同，在实验开始前，投放草鱼幼体活体，并在实验中期左右根据饵料量选择性投放饵料。通过人为观测与红外摄像头观测方式记录大鲵在上游区、中游区及下游区的停留时间。实验期间大鲵在各区域每天的停留时间及变化见图 8。

结果表明，大鲵在上游区与中游区的停留时间大致相同，且都远远大于下游区，说明大鲵偏好停留在卵石或砾石区等粒径大的区域活动，很少停留在沙石区。卵石、砾石的孔隙率较大，其存在的空隙是很好的遮蔽物，饵料资源丰富，是鱼类和底栖动物喜好的休息和避难场所[28]。

为了定量识别大鲵喜好的底质类别，每隔五日筛选上游区、中游区及下游区的底质，筛选位置为各区域前一日停留时间最长的区域。筛选结果见表 2。由表可知，上游区底质以卵石为主，卵石五日平均占比为 61.90%，砾石五日平均占比为 36.23%；中游区底质以砾石为主，且大于 8 mm 粒径的砾石五日平均占比达到了 38.88%。说明大鲵喜欢在以卵石为主的底质区域内活动，也喜好在粒径较大的砾石堆中活动。

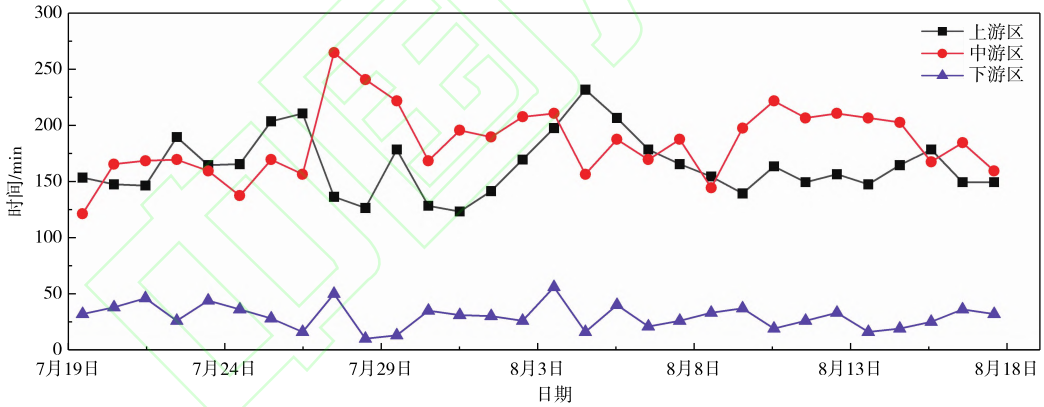



图 8　实验期间各区域停留时间变化图

**3.3　实验结果与天然河流大鲵适宜生境的对比**　流速偏好性与底质偏好性实验结果表明，0.1~0.3 m/s 为大鲵最适宜流速范围，以卵石为主的底质区域适宜大鲵栖息。罗庆华[22]研究了湖南张家界大鲵国家级自然保护区境内 13 条大鲵栖息河段及其洞穴的生境特征，结果表明大鲵栖息河段的流速为(0.33±0.08)m/s，底质全部为石质性，其中卵石与漂石占 85%；大鲵栖息地洞穴附近的流速为(0.22±0.10)m/s，底质同样以石质性为主，其中卵石与漂石占 80%，生境调查研究中得到的大鲵适宜的流速与底质条件与本实验结果相同，进一步验证了本实验结果的准确性。

大鲵栖息地生境修复措施可采用砾石群构建、卵砾石注入等措施，创造适宜大鲵的流速与底质条件。其中卵石群是最常见的河流遮蔽物之一，当水流经过卵石群时，卵石对水流的阻碍会消耗水流能量，从而使靠近卵石区域的局部流速降低[29]。对于大鲵来说，卵石群是很好的遮蔽物，其下游的局部区域是极佳的避难/栖息所，并且卵石群对形成相对较深的水位、多样性的流态以及较高的溶解氧，均有一定的作用。卵砾石注入通过人为补充砾石，缓解细颗粒沉积物向下游侵蚀沉积，粗化后的河道主

槽可形成新的大鲵生境，提供适宜大鲵的底质条件。

表 2　底质筛选结果

| 区域 | 分类 | 粒径/mm | 不同底质类型占比/% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 7 月 25 日 | 7 月 31 日 | 8 月 5 日 | 8 月 11 日 | 8 月 17 日 |
| 上游区 | 小鹅卵石 | 63 | 20.48 | 15.70 | 21.33 | 31.60 | 22.31 |
| | 大卵石 | 31.5 | 16.02 | 24.30 | 33.42 | 11.22 | 20.11 |
| | 小卵石 | 16 | 26.91 | 22.63 | 14.30 | 17.64 | 11.54 |
| | 砾石 | 8 | 15.99 | 16.34 | 11.30 | 15.97 | 21.33 |
| | | 4 | 9.26 | 11.26 | 14.60 | 17.33 | 8.45 |
| | | 2.5 | 6.63 | 4.36 | 2.21 | 3.71 | 9.66 |
| | | 2 | 2.70 | 4.21 | 2.84 | 1.23 | 3.64 |
| | 沙粒 | 1 | 2.01 | 1.20 | 0 | 1.30 | 2.96 |
| 中游区 | 小卵石 | 16 | 18.32 | 17.33 | 20.13 | 17.56 | 20.77 |
| | 砾石 | 8 | 41.37 | 44.37 | 35.69 | 39.51 | 33.44 |
| | | 4 | 21.30 | 19.54 | 21.47 | 22.84 | 16.34 |
| | | 2.5 | 10.85 | 12.34 | 14.65 | 11.33 | 15.45 |
| | | 2 | 5.34 | 4.69 | 7.54 | 4.56 | 8.54 |
| | 沙粒 | 1 | 2.81 | 1.73 | 0.52 | 4.20 | 5.46 |
| 下游区 | 砾石 | 4 | 2.95 | 7.56 | 4.27 | 10.21 | 7.28 |
| | | 2.5 | 9.52 | 10.23 | 16.38 | 17.24 | 18.21 |
| | | 2 | 23.60 | 14.57 | 10.27 | 8.59 | 6.55 |
| | 沙粒 | 1 | 40.49 | 46.33 | 51.23 | 47.54 | 61.24 |
| | | 0.6 | 23.44 | 21.31 | 17.85 | 16.42 | 6.72 |

## 4　大鲵流速及河道指数适宜性曲线构建

**4.1　流速适宜性曲线**　根据不同流速对应下的日均停留时间及日均出没次数，运用模糊逻辑法对应得到适宜性指数(HSI)，用 0~1 之间的数值定义大鲵对流速的偏好，数值越大代表流速越适宜大鲵生存，曲线的峰值代表大鲵对流速的最适宜或最喜爱范围[24]。利用多项式拟合流速 $v$ 与 $HSI$ 构建大鲵流速适宜性曲线，经拟合得到大鲵流速适宜性曲线：

$$HSI=-2.212v^5-1.284v^4+14.68v^3-16.3v^2+4.756v+0.4839$$

参见图 9，流速在 0.1~0.3 m/s 范围，$HSI$ 处于峰值区域($HSI$>0.8)；流速为 0.2 m/s 时 $HSI$ 最大，为 0.862；流速大于 0.6 m/s 时 $HSI$ 处于低值区域($HSI$<0.3)。这和野生大鲵栖息地相关的文献对大鲵适宜流速的描述相近[22,30]。由此可见利用本研究介绍的实验及适宜性曲线构建方法得到的大鲵栖流速适宜性曲线能够较准确体现大鲵对流速的响应情况。总体来说，大鲵喜欢低流速的环境，小于 0.5 m/s 流速的环境适宜大鲵在河流中活动。研究表明，大鲵出洞活动主要的行为是捕食与休息[17]，低流速下大鲵饵料资源最为丰富，野生大鲵的饵料主要是鱼类、蟹虾等底栖动物，饵料鱼类主要以马口鱼等山溪性鱼类为主。以马口鱼为例，其偏好流速为 0~0.5 m/s，偏好上溯流速为 0.3~0.35 m/s[31-32]，河蟹、虾等大型底栖动物也同样偏好于缓流的环境中[33-34]；缓流环境同样也适宜大鲵出洞休息，较大的流速不利于大鲵捕食，并且急流可能会将正在河流活动的大鲵冲走，对大鲵造成伤害。

**4.2　河道指数适宜性曲线**　根据底质偏好性实验结果并结合相关文献定性构建河道指数适宜性曲线。综合实验结果及相关文献表明[35-36]，野生大鲵最适宜底质类型为砾石(8~16 mm)、卵石(16~250 mm)

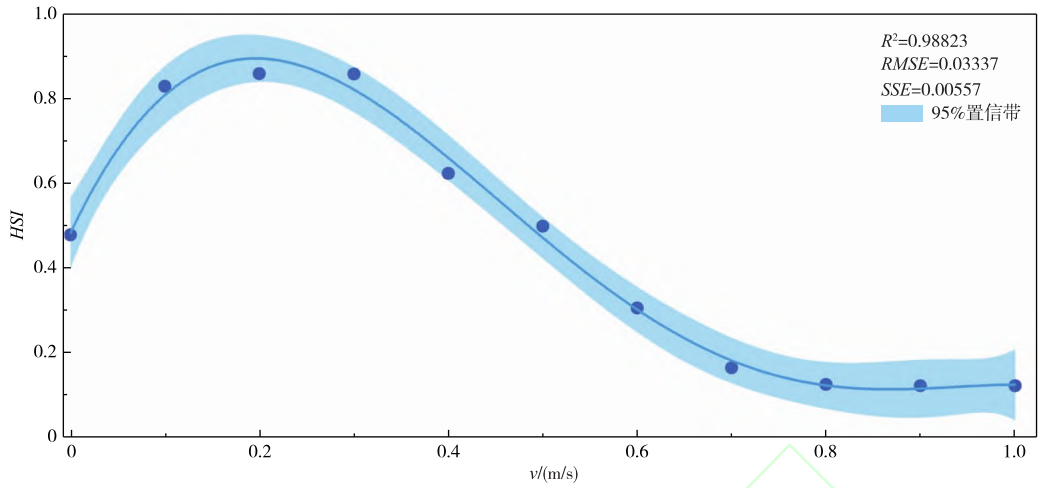



图 9　大鲵流速适宜性曲线

和漂石(>250 mm)，对于沙粒的适宜性较差。因此以沙粒作为下限值，对应的河道指数为 4，其适宜性指数为 0，粗砾—漂石为最适宜值，对应的河道指数大于 5.7，其适宜性指数为 1。大鲵河道指数适宜性曲线如图 10。

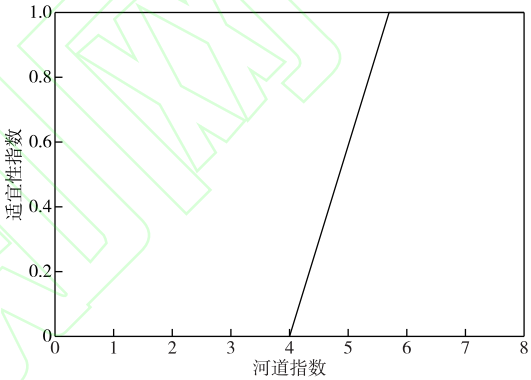



图 10　大鲵河道指数适宜性曲线

## 5　结论与展望

本研究通过开展室外观测实验，针对大鲵出洞后在河道活动中偏好的流速及底质条件展开研究，确定了大鲵在河道中的适宜流速阈值范围及适宜的底质条件，主要结论如下：(1)流速偏好性实验发现，大鲵的主要行为是休息与捕食，低流速与主要行为的时间呈显著正相关关系，大鲵在低流速状态下停留时间占总时间的 69.13%，表现出的行为谱类型较多；大鲵在中高流速的停留时间占总时间的 30.87%，冲凉行为会在此流速区间内发生；(2)底质偏好性实验发现，大鲵在卵石或砾石区的停留时间远远大于砂石区的停留时间。大鲵适宜活动区域内，卵石占比为 61.90%，砾石为占比为 36.23%，大鲵更偏好在卵石区域内活动；(3)根据实验及数据分析结果，确定了大鲵适宜流速范围为 0.1~0.3 m/s，当流速大于 0.6 m/s 时适宜性开始处于低值区域；大鲵最适宜底质类型为砾石(8~16 mm)、卵石(16~250 mm)和漂石(>250 mm)，不适宜在沙粒(0.062~2.0 mm)占比较多的区域活动。研究得到适宜水动力范围及适宜性曲线对于精准预测大鲵适宜栖息地，进而开展有效保育措施具有重要的意义。

观测不同流速/不同底质条件的大鲵活动节律建立大鲵栖息地适宜性曲线的方法尚属首次，由于仿生态河道水环境条件的限制，加之流速区间的限制，实验环境是否可以与天然河流环境进行相应的类比，有限的实验周期是否具有样本数量的代表性等，都是今后需进一步深入研究的技术问题。下一阶段可选择合适的天然河流进一步开展野外验证。

**参　考　文　献：**

[1] ALONSO A, MONROY S, BOSCH J, et al. Amphibian loss alters periphyton structure and invertebrate growth in montane streams[J]. Journal of Animal Ecology, 2022, 91(11): 2329-2337.

[2] 蒋志刚，江建平，王跃招，等. 国家濒危物种红色名录的生物多样性保护意义[J]. 生物多样性，2020，28(5)：558-565.

[3] YAN F, LÜ J, ZHANG B, et al. The Chinese Andrias davidianus exemplifies the hidden extinction of cryptic species[J]. Current Biology, 2018, 28(10): R590-R592.
[4] WANG X M, ZHANG K J, WANG Z H, et al. The decline of the Chinese Andrias davidianus Andrias davidianus and implications for its conservation[J]. Oryx, 2004, 38(2): 197-202.
[5] HAILA Y, NICHOLLS A O, HANSKI I K, et al. Stochasticity in bird habitat selection: year-to-year changes in territory locations in a boreal forest bird assemblage[J]. Oikos, 1996, 76(3): 536-552.
[6] 戴强, 顾海军, 王跃招. 栖息地选择的理论与模型[J]. 动物学研究, 2007(6): 681-688.
[7] BOVEE K D. Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology[M]. National Ecology Center, Division of Wildlife and Contaminant Research, Fish and Wildlife Service, US Department of the Interior, 1986.
[8] 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.
[9] 班璇, 郭舟, 熊兴基, 等. 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 936-946.
[10] WANG Y, ZHANG N, WANG D, et al. Impacts of cascade reservoirs on Yangtze River water temperature: Assessment and ecological implications[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125240.
[11] 王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 等. 基于黄河鲤栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1175-1187.
[12] 诸葛亦斯, 刘德富, 谭红武. 鱼类栖息地流速适宜性曲线实验方法[J]. 水利学报, 2013, 44(S1): 1-7.
[13] 刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 等. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 812-817.
[14] RACHELLY C, FRIEDL F, BOES R, et al. Morphological response of channelized, sinuous gravel-bed rivers to sediment replenishment[J]. Water Resources Research, 2021, 57(6): e2020WR029178.
[15] 杨庆, 胡鹏, 杨泽凡, 等. 草鱼洄游的适宜流速条件与适应阈值[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(4): 93-100.
[16] 牛为民. 大鲵的生存与繁衍[J]. 河南水产, 2007, 72(3): 24-25.
[17] 于虎虎. 中国大鲵繁殖前期夜间行为及其与环境因子的关系[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
[18] 梁刚, 吴峰. 中国大鲵的活动节律及繁殖行为描记[J]. 动物学杂志, 2010, 45(1): 77-82.
[19] 罗庆华, 付磊, 蒋万胜, 等. 旅游干扰下水质对大鲵繁殖行为与繁殖力的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1417-1418.
[20] 罗庆华, 陶水秀, 周立清, 等. 旅游干扰的水质模拟对繁殖前期中国大鲵夜间活动节律的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4863-4873.
[21] 郑合勋. 河南省卢氏县大鲵种群生态学及生态适应特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
[22] 罗庆华. 张家界大鲵生境特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1723-1730.
[23] HUMPHRIES W J, PAULEY T K. Seasonal changes in nocturnal activity of the Hellbender, Cryptobranchus alleganiensis, in West Virginia[J]. Journal of Herpetology, 2000, 34(4): 604-607.
[24] 易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(4): 363-377.
[25] CHEN Q, YANG Q, LIN Y. Development and application of a hybrid model to analyze spatial distribution of macroinvertebrates under flow regulation in the Lijiang River[J]. Ecological Informatics, 2011, 6(6): 407-413.
[26] 谭均军, 高柱, 戴会超, 等. 竖缝式鱼道水力特性与鱼类运动特性相关性分析[J]. 水利学报, 2017, 48(8): 924-932, 944.
[27] 徐文刚, 王中乾, 梁刚. 繁殖前期中国大鲵雄性成体的冲凉行为及其意义[J]. 动物学杂志, 2013, 48(4): 529-533.
[28] 王宏涛, 董哲仁, 赵进勇, 等. 蜿蜒型河流地貌异质性及生态学意义研究进展[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 81-85.
[29] 董哲仁. 生态水利工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
[30] 王文林, 蒋发俊, 王炳立. 大鲵的自然繁殖习性调查[J]. 水生态学杂志, 2000, 20(6): 12-13.
[31] 雷青松, 涂志英, 李志敏, 等. 马口鱼自主上溯游泳行为及对流场选择策略研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(6): 483-491.

[32] SHIM T, KIM Z, SEO D, et al. Integrating hydraulic and physiologic factors to develop an ecological habitat suitability model[J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 131: 104760.
[33] 徐观兵, 杨胜发, 杨威. 河蟹栖息影响因素试验研究[J]. 人民长江, 2020, 51(6): 63-68.
[34] LAVAJOO F, AMROLLAHI BIUKI N, KHANIPOURA A, et al. Natural diet of Macrobrachium nipponense shrimp from three habitats in Anzali Wetland, Iran[J]. Caspian Journal of Environmental Sciences, 2019, 17(2): 101-111.
[35] BROWNE R, LI H, MCGINNITY D, et al. Survey techniques for Andrias davidianuss and other aquatic Caudata [J]. Amphibian & Reptile Conservation, 2011, 5(4): 1-16.
[36] BJORDHAL B, OKADA S, TAKAHASHI M. Assessment of Small Tributaries as Possible Habitats for Larvae and Juveniles of Japanese Andrias davidianuss, Andrias Japonicus, by Coupling Environmental Dna with Traditional Field Surveys[J]. Salamandra, 2020, 56: 148-158.

## Experiment on suitable hydrodynamic conditions for habitat activity of Andrias davidianus and construction of suitability curve

DING Yang[1], ZHAO Jinyong[1], PENG Wenqi[1], XIE Yixing[2], YU Zicheng[3], FU Yicheng[1]
(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*;
2. *Zhangjiajie Giant Salamander National Nature Reserve Affairs Center, Zhangjiajie* 427400, *China*;
3. *School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan* 056038, *China*)

**Abstract**: In order to explore the suitable hydrodynamic conditions for the habitat activities of Andrias davidianus and carry out effective conservation measures, the effects of different flow velocity and bottom condition on the habitat activities of Andrias davidianus were studied through outdoor observation experiments. The fuzzy logical method was used to comprehensively analyze experimental parameters such as the total daily residence time (DRT) and the daily occurrence times of Andrias davidianus at different flow velocity, and the suitable flow velocity conditions and thresholds were determined. The flow velocity suitability curve of Andrias davidianus was constructed, and the channel index suitability curve of Andrias davidianus was made according to the parameters of total daily residence time of Andrias davidianu in areas with different sedime. The residence time of the Andrias davidianus at low flow rate accounted for 69.13% of the total time, and the residence time of the Andrias davidianus at middle and high flow rate accounted for 30.87% of the total time, and the suitable flow rate of the Andrias davidianus was determined to be 0-0.5 m/s (*HSI*>0.5, *HSI* was the suitability index). When the flow velocity was 0.1-3 m/s, the *HSI* was in the peak area (*HSI*>0.8), and when the flow velocity was greater than 0.6 m/s, the habitat suitability gradually decreased. The most suitable bottom material types were gravel (8~16 mm), pebble (16~250 mm) and drift stone (>250 mm), and were not suitable for activities in the area where sand (0.062~2.0 mm) was relatively large.

**Keywords**: Andrias davidianus; observational experiments; flow velocity; sediment; suitability curve

(责任编辑: 耿庆斋)