

太子河洛氏鲮幼鱼栖息地适宜度评估

康鑫^{1,2}, 张远^{2*}, 张楠², 森², 孟伟², 李向东¹

1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116

2. 中国环境科学研究院 河流海岸带环境创新基地, 北京 100012

摘要: 基于对太子河流域鱼类及栖息地的调查研究, 选择该流域的优势种洛氏鲮 (*Phoxinus lagowskii*) 作为指示生物, 建立洛氏鲮幼鱼对水深、流速、溶解氧、总溶解颗粒物和河岸带植被指数的栖息地适宜度曲线, 并借鉴河道内流量增量法计算各采样点河段的洛氏鲮幼鱼栖息地适宜度指数。结果表明: 洛氏鲮幼鱼栖息地适宜度指数在太子河上游较高 (> 0.5)、中游次之 ($0.2-0.5$)、下游较低 (< 0.2)。洛氏鲮幼鱼栖息地适宜度指数与 10 项栖息地调查指标和土地利用类型的相关性分析表明: 太子河流域内限制洛氏鲮幼鱼生存的因素不是水文条件, 而是河流水质及河岸带等环境因素; 洛氏鲮幼鱼栖息地适宜度指数受人类活动影响较大, 随着太子河中下游人类开发强度加大, 洛氏鲮栖息地质量呈下降趋势。

关键词: 太子河; 洛氏鲮; 河道内流量增量法; 栖息地适宜度指数; 栖息地质量; 土地利用类型

文章编号: 1673-5897(2011)6-310-11 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Assessment of Habitat Suitability of Juvenile *Phoxinus lagowskii* in Taizi River

Kang Xin², Zhang Yuan^{2*}, Zhang Nan², Ding Sen², Meng Wei², Li Xiangdong¹

1. School of Environmental and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. River and Coastal Environmental Research Center, Chinese Research Academy of Environment Science, Beijing 100012, China

Received 15 December 2010 accepted 4 June 2011

Abstract According to the research on habitat of fish in Taizi River, the dominant species *Phoxinus lagowskii* was selected as a biological indicator. Indexes of the habitat suitability curves of *Phoxinus lagowskii* including depth, velocity, dissolved oxygen, total dissolved solid and vegetation index of riparian zone were established. Meanwhile, the habitat suitability index (HSI) of juvenile *P. lagowskii* at each site was calculated using in-stream flow incremental methodology. The results indicated that HSI was > 0.5 in upstream, $0.2-0.5$ in midstream and < 0.2 in downstream. The combined analysis on HSI and 10 indicators of habitat and land use types revealed that the water quality and riparian zone conditions had more important effect than hydrological conditions on the survival of juvenile *P. lagowskii*. Furthermore, the human activities had a great effect on habitat suitability index of juvenile *P. lagowskii*. The index decreased with the increase of human developments in the midstream and downstream of Taizi River.

Keywords: Taizi River; *Phoxinus lagowskii*; in-stream flow incremental methodology; habitat suitability index; habitat quality; land use type

收稿日期: 2010-12-15 录用日期: 2011-06-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07526-001); 中国环境科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (2010kyyw06)

作者简介: 康鑫 (1985-) 男, 硕士, 研究方向: 水环境模拟, E-mail: kang2009@126.com * 通讯作者 (Corresponding author, E-mail: zhangyuan@caes.org.cn)

鱼类栖息地包括水文、水质和河道特征等要素^[1-4],其为鱼类生长、繁殖及其他生命活动提供了必要的物理、化学和生物条件^[5,6]。近年来,人类活动的增强使得鱼类栖息地遭到破坏,许多河流渔获量得到不同程度的下降^[7,9]。良好的河流栖息地环境是保证鱼类生存的先决条件,栖息地适宜度评估可以为预测河道修复效果提供依据,因此该领域日益成为研究的热点。

对河流栖息地评估的研究可追溯到 20 世纪 80 年代,Boves 将河道内流量增量法 (instream flow incremental methodology IFM) 首先运用到河流栖息地模拟和评估中,并在此基础上开发出了 PHABSM 模型^[10]。随后 RHY-HABSM、EVHA、HABITAT、CASMR、MesoHABSM 和 River 2D 等模型的形成^[11-14],进一步丰富了鱼类栖息地适宜度的评估方法,使其成为河流管理的重要工具之一^[15-16],在人类活动对鱼类栖息地的影响评估^[17]、水生生物最小需水量确定以及河流修复工程效果预测中发挥了重要作用^[18]。

鱼类栖息地适宜度表示鱼类对栖息地环境的适应程度。Mouton 等^[19]指出当水深大于 1 m、流速大于 $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 并且底质石粒直径大于 6.5 cm 时,杜父鱼 (*Cottus gobio*) 的栖息地适宜度最高;台湾间吸鳅 (*Hemimyzon formosanus*) 在水深介于 0.2—0.4 m、流速小于 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下的栖息地适宜度较高^[20];而碧古鱼 (*Sander vitreus*) 喜欢生活在介于 $0.3—0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 间的流速条件下,当流量为 $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其栖息地适宜度指数最高^[21]。除了水力学及底质条件外^[22-24],水质和河道特征等栖息地因素对鱼类栖息地适宜度的影响也有报道。Hatten 等基于 GIS 建立空间模型模拟了挖掘航运河道对白色鲟鱼栖息地的影响,结果表明水体浊度和盐度的增高会降低白鲟 (*Pseudorasbora dabryi*) 产卵期栖息地适宜度,进而造成白鲟数量的减少^[25]。Konrad 等模拟了大坝拆除后恢复期内造成的悬浮物浓度增加会降低大马哈鱼 (*Chinook Salmon*) 的栖息地适宜度^[26]。

目前研究人员在对鱼类栖息地进行评估时,大多采用 IFM 的方法理论,但考虑栖息地要素时,仍多集中于水文条件的影响,而针对水质和河岸植被等要素对鱼类适宜度的影响,鲜见具体的研究实例。此外,在建立鱼类不同生长周期单环境因子的适宜度曲线这个关键环节中,现有研究多参考已有文献中的成果,但由于气候和海拔等差异,仅参考文献中的结果

会影响计算结果的准确性。本文以太子河鱼类优势种洛氏鳢幼鱼 (*Phoxinus phoxinus*) 作为指示生物,筛选对其影响较大的栖息地要素 (包括水文、水质及河岸植被要素),建立洛氏鳢幼鱼对各栖息地因子的适宜度曲线,计算了洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数 (habitat suitability index HSI) 在各点位的分布,并讨论 HSI 与调查的栖息地环境质量及土地利用的关系,分析影响洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度的因素,以期以太子河流域鱼类栖息地恢复和重建提供科学参考。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域

太子河属辽河流域,位于东经 $122^{\circ}55'40''—124^{\circ}55'16''$,北纬 $40^{\circ}28'48''—41^{\circ}38'46''$ 之间,是辽宁省东部较大的河流,干流全长 413 km,流域面积 13880 km^2 ,多年平均天然径流量为 $44.96 \times 10^8 \text{ m}^3$,年内分配比例较大,主要集中于 6—9 月,流经本溪、辽阳、鞍山 3 市。太子河流域地处暖温带湿润半湿润气候区,上游地区为低山丘陵,主要自然植被为落叶阔叶林,植被保护较好,覆盖率达 50% 以上;中下游为平原区,土地开发程度较高。由于水资源利用与水污染双重影响,太子河中下游的生态系统破坏严重。

1.2 数据获取

2009 年 8 月在太子河流域设置了 69 个断面 (图 1)。使用挂网法和电鱼法完成鱼类的采集。断面河宽借助于皮尺和测距仪测量,水深 (D) 和流速 (V) 借助于 ADCP 和流速仪测量。各断面选取水温 (T)、溶解氧 (DO)、pH、电导率 (EC)、总溶解颗粒物 (TDS)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝酸盐氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、高锰酸钾指数 (COD_{Mn})、重铬酸钾指数 (COD_{Cr})、五日生化需氧量 (BOD_5)、悬浮物 (SS)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、硫酸根 (SO_4^{2-})、氯离子 (Cl^-)、磷酸根 (PO_4^{3-}) 等 17 个理化指标进行测定。T 借助温度计测量,pH、EC 和 TDS 借助 YSI 便携仪器现场测量, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、 BOD_5 、SS、TN、TP、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 PO_4^{3-} 的监测均参照相应国家标准在实验室完成。采样过程中记录样点河段小流域内土地利用类型及河岸植被覆盖度,计算各点位的河岸带植被指数 (vegetation index VI),并参照郑丙辉等提出的栖息地调查评估方法^[9],对栖息地质量进行打分,包括底质、栖境复杂性、速度和深度结合特性、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度和河岸土地利用类型等 10 项指标,各指标分为好

(16—20分)、较好(11—15分)、一般(6—10分)、差(0—5分)4个等级。

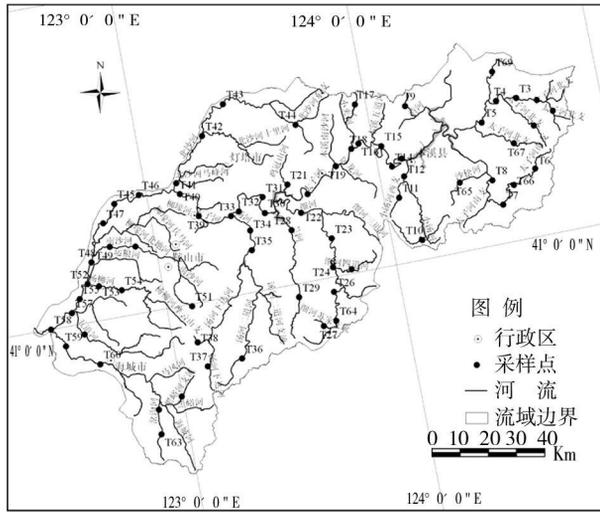


图1 太子河样点设置图

Fig. 1 Location of sampling sites in Taizi River

1.3 研究方法

1.3.1 栖息地因子筛选方法

所选的栖息地因子包括 D、V、V 和 17 个水质指标。D 和 V 对鱼类的生存有直接的影响,是栖息地适宜度评估中最常使用的指标^[4, 7, 11, 13],因此本文在对鱼类栖息地评估时,直接将 D 和 V 纳入考虑。其他指标 (V 及 17 个水质指标)的筛选参照文献^[27],筛选原则为:因子与洛氏鳢幼鱼丰度(个体数量)具有明显的相关关系;指标间相互独立并且不存在重复信息;能够全面反映鱼类栖息地的不同特征属性。具体筛选过程:(1)通过分析洛氏鳢幼鱼丰度与栖息地因子相关关系,将不敏感指标或有歧义的指标删除;(2)利用主成分分析方法(PCA)对余下的指标进行统计分析,根据提取主成分个数累计方差超过 70% 的原则,通过最大方差旋转法(varimax),经因子载荷矩阵旋转后选择载荷值大于 0.6 的指标作为下一步待筛选指标;(3)对余下的候选指标进行相关性分析,最后根据显著性水平确定各指标间信息重叠程度。结合专家经验分析以及指标实际重要程度,选取其中相对独立和重要的指标来表征鱼类栖息地状况。上述分析过程均在 SPSS 17.0 统计软件中完成。

1.3.2 单因子适宜度曲线

对选取的环境因子进行分析,借鉴 IFM 中建立指示生物环境因子适宜度曲线的方法,建立洛氏鳢幼鱼对选取指标的适宜度曲线,通常有 3 种方法:参考

专家观点或文献资料,栖息地使用曲线和栖息地偏好曲线^[28]。其中栖息地使用曲线是直接从未测数据中得到,经过统计分析得出,可靠性高,因此本文使用该方法建立适宜度曲线。

1.3.3 栖息地适宜度指数的计算

计算指示生物的栖息地适宜度指数的方法有乘法、几何平均法、最小值法及加权平均法^[29]。不同的环境因子对指示生物的影响程度不同,加权平均法考虑了各因子的影响力,故选用加权平均法计算 HSI 公式如下:

$$HSI = k_1 \times f_1 + k_2 \times f_2 + \dots + k_n \times f_n$$

式中, f_i 为第 i 个因子的适宜度,取值 0—1, 0 为完全不适宜状态, 1 为最适宜状态, 中间值表示物种对该因子的适宜程度^[22]; k 表示第 i 个因子的权重, 总和为 1, 决策者可依据实际情况赋予不同的权重。环境因子定权使用的是层次分析法(analytic hierarchy process, AHP), 该方法将各参数按支配关系形成层次结构, 运用数学方法与定性分析, 通过层层排序来确定各参数的权重。

2 结果 (Results)

2.1 鱼类和栖息地因子调查结果

本次采样采集鱼类 6170 条, 共计 36 种, 分属于 12 科, 其中鲤科种数占到总物种的 53%; 鳊鱼科其次, 占到 13%; 鳊科为 11%。在数量上鲤科鱼类也占有绝对优势—占总渔获量的 69%, 鳊科排名第二, 占 21%, 鳊鱼科第三, 占 7%。按种计, 洛氏鳢 2524 条, 均为幼鱼, 占总渔获量 40.9%, 属优势种。本文以洛氏鳢幼鱼作为指示物种。洛氏鳢为鲤科鳢属, 属非洄游鱼类, 喜栖于清冷流水, 以昆虫幼虫为食, 4—6 月为产卵期, 7—9 月为幼鱼生长期, 12 月—次年 3 月为避冬期。采样时其体长约 8 cm, 重约 30 g。监测表明, 环境因子在不同点位变化幅度较大, 中下游为典型的有机污染, 主要污染物为 BOD_5 、 CO_{Dcr} 、 CO_{D_Mn} 和 NH_4^+-N 等。以 BOD_5 为例, 所有采样点 BOD_5 监测值为 1.9—117.5 $mg \cdot L^{-1}$, 其最大值已远远超过地表水 V 类标准。

2.2 栖息地因子选取

对洛氏鳢幼鱼丰度(个体数量)和鱼类总丰度进行正态分布检验, 结果表明, 洛氏鳢幼鱼丰度和鱼类总丰度不满足正态分布检验 ($P < 0.05$), 故采用 Spearman 秩相关分析栖息地因子与洛氏鳢和鱼类丰度的相关性(表 1)。由结果可知, V 、 D 、 Q 、 EC 、 SS 、 TDS 、 Cl 、

表 1 太子河鱼类丰度与环境要素的相关性分析

Table 1 Correlative analysis between fish number and environmental factors of Taizi River

| 相关系数 | 洛氏鳢幼鱼丰度 | 鱼类总丰度 | 相关系数 | 洛氏鳢幼鱼丰度 | 鱼类总丰度 |
|-------------------------------|----------|----------|---------------------------------|----------|----------|
| VI | 0.535** | 0.372** | BOD ₅ | -0.413** | -0.436** |
| Temp | -0.200 | -0.002 | COD _{Cr} | -0.574** | -0.466** |
| PH | 0.208 | 0.299* | COD _{Mn} | -0.669** | -0.509** |
| DO | 0.561** | 0.519** | NH ₄ ⁺ -N | -0.656** | -0.522** |
| EC | -0.658** | -0.431** | TN | -0.499** | -0.380** |
| SS | -0.721** | -0.547** | NO ₂ ⁻ -N | 0.035 | 0.159 |
| TDS | -0.705** | -0.549** | NO ₃ ⁻ -N | -0.646** | -0.390** |
| Cl ⁻ | -0.637** | -0.418** | PO ₄ ⁻ | -0.367** | -0.325** |
| SO ₄ ²⁻ | -0.602** | -0.431** | TP | -0.447** | -0.361** |

注: *表示 P<0.05 **表示 P<0.01

SO₄²⁻、BOD₅、COD_{Cr}、COD_{Mn}、NH₄⁺-N、TN、NO₂⁻-N、PO₄⁻、TP与洛氏鳢幼鱼丰度及鱼类总丰度具有显著的相关性,选取这 15 个因子进一步筛选过程。

对余下的 15 个指标进行主成分分析, KMO 值为 0.845, Bartlett 球度检验值为 1.219, 相伴概率为 0, 故认为基于 69 个样本的 15 个候选指标体系适于进行主成分分析。根据特征值大于 1, 累计方差大于 70% 的标准, 提取出 3 个主成分, 见表 2。

表 2 候选指标主成分分析

Table 2 Principal component analysis of candidate indices

| 项目 | 第 1 主成分 | 第 2 主成分 | 第 3 主成分 |
|---------------------------------|---------|---------|---------|
| VI | -0.101 | -0.301 | -0.729 |
| DO | -0.630 | -0.367 | -0.167 |
| EC | 0.620 | 0.472 | 0.537 |
| SS | 0.866 | 0.155 | 0.301 |
| TDS | 0.788 | 0.209 | 0.427 |
| Cl ⁻ | 0.666 | 0.453 | 0.361 |
| SO ₄ ²⁻ | 0.736 | 0.139 | 0.569 |
| COD _{Cr} | 0.737 | 0.541 | 0.002 |
| COD _{Mn} | 0.890 | 0.298 | 0.026 |
| NH ₄ ⁺ -N | 0.295 | 0.755 | 0.402 |
| BOD ₅ | 0.687 | 0.598 | -0.227 |
| PO ₄ ⁻ | 0.217 | 0.924 | -0.097 |
| TP | 0.291 | 0.885 | -0.094 |
| TN | 0.165 | 0.689 | 0.579 |
| NO ₂ ⁻ -N | 0.153 | 0.456 | 0.352 |
| 方差贡献率 | 34.591 | 29.434 | 14.494 |
| 累计方差贡献率 | 34.591 | 64.025 | 78.519 |

第 1 主成分包括 DO、EC、SS、TDS、Cl⁻、SO₄²⁻、BOD₅、COD_{Cr}和 COD_{Mn}等 9 个指标, 反映了太子河流域的有机污染及水体的盐类理化状况等, 其中有机污染指标贡献率较大, 有机污染和盐度是太子河流域生态系统特征变化的主要限制因子。第 2 主成分包含 NH₄⁺-N、TN、PO₄⁻和 TP 等 4 个指标, PO₄⁻和 TP 贡献相对较大, 反映了太子河河流的营养物

要素, 这说明太子河营养物超标是造成水生生态系统变化的重要的限制因子。第 3 主成分包含 V 指标, 反映了太子河河岸植被覆盖的信息。

根据上述分析, 剔除了 NO₂⁻-N 指标, 筛选出了其余的 14 个指标, 这些指标都是对河流特征贡献较大的指标, 将这些指标做进一步筛选, 进行正态分布检验, 结果表明, VI、DO、EC、TDS 和 SO₄²⁻符合正态分布 (P>0.05), 其余指标均不符合正态分布检验。分别采用 Pearson 相关和 Spearman 秩相关检验, 分析指标的相关性 (表 3)。结果表明, 14 个指标间两两相关性都是显著或极显著相关 (表 3)。但考虑到 DO 和 TDS 属于能够反映太子河生态系统特征的 2 个极为重要的指标, 且 DO 的含量直接影响鱼类的新陈代谢, 并对水体中有机物、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 H₂S 等有毒物质降解影响较大; TDS 为水体中总溶解固体, 主要成分有 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、HCO₃⁻、CO₃²⁻、Cl⁻、SO₄²⁻和 NO₃⁻-N 等, 其代表了水中溶解物总的含量, 影响水体的 EC, 故选择 DO 和 TDS 作为一个分析因子。VI 值代表了河岸带的植被覆盖程度, 是非水体中的指标, 并在一定程度上反映了人类对河流的干扰强度, 故选择 VI 值作为一个分析因子。综上所述, 本研究选取 DO、VI、TDS 和 V 等 5 个环境因子, 以表征洛氏鳢幼鱼栖息地。

2.3 单因子适宜度曲线的建立

图 2 为洛氏鳢幼鱼对 5 个环境因子的适宜度曲线。适宜度的高低主要通过各点位的洛氏鳢幼鱼的丰度多寡来度量。本次采样测量深度介于 0.05—2 m, 大于 0.9 m 的点位没有采集到洛氏鳢, 曲线表明洛氏鳢幼鱼较适水深为 0.1—0.3 m, 最适水深为 0.15 m, 流速介于 0.01—1.05 m/s, 洛氏鳢幼鱼较适流速为 0.1—0.5 m/s, 最适流速为 0.3 m/s, 这与洛氏鳢喜欢溪流特性相符。各点位的 VI 介于 0.05—0.7, 洛氏

表3 太子河主要环境因子 Pearson相关分析和 Spearman秩相关分析结果

Table 3 Correlative analysis on Spearman and Pearson between principal environmental factors of Taizi River

| 因子 | DO | EC | SS | TDS | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | BOD ₅ | COD _{Cr} | COD _{Mn} | NH ₄ ⁺ -N | TN | PO ₄ ³⁻ | TP | VI |
|---------------------------------|-----------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|----------|-------------------------------|----------|-------|
| DO | 1.000 | | | | | | | | | | | | | |
| EC | -0.517** | 1.000 | | | | | | | | | | | | |
| SS | -0.491** | 0.798** | 1.000 | | | | | | | | | | | |
| TDS | -0.581** ^a | 0.764** | 0.932** | 1.000 | | | | | | | | | | |
| Cl ⁻ | -0.461** | 0.899** | 0.811** | 0.765** | 1.000 | | | | | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | -0.596** ^a | 0.835** | 0.812** | 0.826** ^a | 0.842** | 1.000 | | | | | | | | |
| BOD ₅ | -0.344** | 0.430** | 0.452** | 0.469** | 0.385** | 0.375** | 1.000 | | | | | | | |
| COD _{Cr} | -0.457** | 0.593** | 0.644** | 0.669** | 0.553** | 0.590** | 0.782** | 1.000 | | | | | | |
| COD _{Mn} | -0.547** | 0.688** | 0.792** | 0.803** | 0.644** | 0.717** | 0.682** | 0.918** | 1.000 | | | | | |
| NH ₄ ⁺ -N | -0.398** | 0.876** | 0.815** | 0.752** | 0.893** | 0.768** | 0.468** | 0.586** | 0.671** | 1.000 | | | | |
| TN | -0.311** | 0.729** | 0.706** | 0.692** | 0.723** | 0.686** | 0.232 | 0.496** | 0.578** | 0.717** | 1.000 | | | |
| PO ₄ ³⁻ | -0.333** | 0.493** | 0.470** | 0.491** | 0.375** | 0.448** | 0.284* | 0.379** | 0.484** | 0.485** | 0.489** | 1.000 | | |
| TP | -0.485** | 0.647** | 0.673** | 0.687** | 0.521** | 0.586** | 0.290* | 0.524** | 0.650** | 0.579** | 0.549** | 0.802** | 1.000 | |
| VI | 0.490** ^a | -0.518** | -0.508** | -0.446** ^a | -0.542** | -0.439** ^a | -0.085 | -0.332** | -0.497** | -0.579** | -0.388** | -0.415** | -0.459** | 1.000 |

注: *表示 P < 0.05, **表示 P < 0.01, ^a表示 Pearson相关分析, 不带^a表示 Spearman秩相关分析。

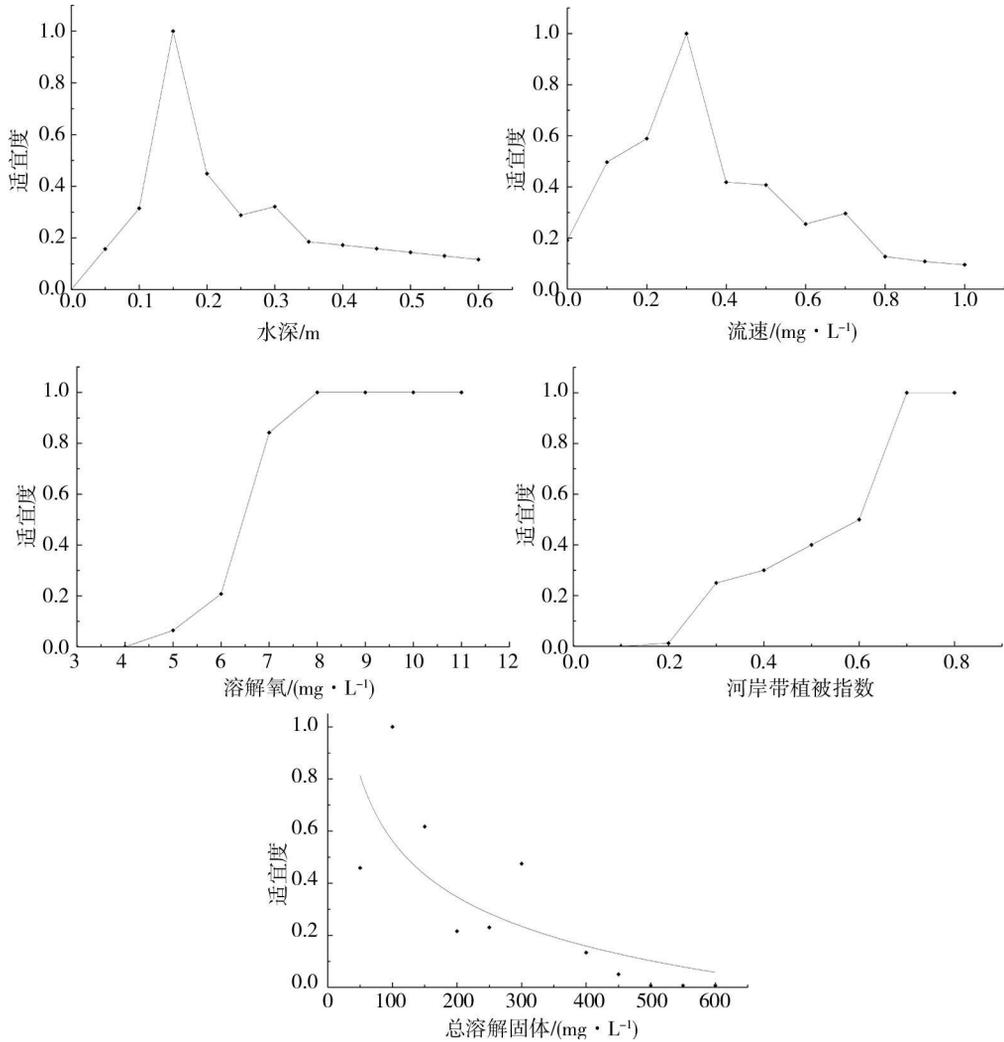


图2 洛氏鳃幼鱼对水深、流速、溶解氧、河岸带植被指数和总溶解固体适宜度曲线

Fig. 2 Depth, velocity, dissolved oxygen, vegetation index and total dissolved solid suitability for juvenile *P. lagowskii*

鳢幼鱼对 V 的适宜度随着其值的增加而增加,这与鳢属鱼类怕强光的特性相符,当 V 大于 0.5 时,适合洛氏鳢幼鱼生长。各点位的 DO 介于 0—13.5 mg L⁻¹, DO 小于 4 mg L⁻¹ 的点位没有采集到洛氏鳢, DO 大于 6.5 mg L⁻¹, 比较适合洛氏鳢幼鱼生长, DO 大于 8 mg L⁻¹ 后, 完全适合洛氏鳢生长。各点位的 TDS 介于 51—995 mg L⁻¹, 曲线基本呈对数分布, TDS 小于 100 mg L⁻¹ 时适合洛氏鳢幼鱼生长, 大于 400 mg L⁻¹ 时适宜度较低。

2.4 栖息地适宜度指数的计算

采用加权平均法计算各点位的洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数。5 个栖息地因子的权重是在结合专家经验及栖息地实际调查的基础上, 基于层次分析法赋予的。太子河中下游受到人为干扰较为严重, 河流水质普遍较差, 因此赋予 DO 和 TDS 较大权重, 其中 TDS 与洛氏鳢幼鱼的相关性大于 DO, 故赋予的 TDS 的权重最大, DO 次之。VI 一定程度上反映了人类活动的强度, 赋予 V 的权重较水深和流速大。V 大于 0.5 m s⁻¹ 的样点较少, 大多点位的流速条件是适合洛氏鳢生存的, 故赋予 V 的权重最小。综上所述, 5 个环境因子按权重大小依次为: TDS > DO > VI > D 和 V。表 4 为环境因子的判断矩阵。TDS、DO、VI、D 和 V 的权重分别为 0.4216、0.2660、0.1492、0.0857 和 0.0774, 其中最大特征值

为 5.0349, 一致性比率 CR 为 0.0078, 小于 0.1, 可认为该判断矩阵具有满意的一致性。

表 4 环境因子判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of environmental factors

| | D | V | VI | DO | TDS |
|-----|---|---|-----|-------|-------|
| D | 1 | 1 | 0.5 | 0.333 | 0.2 |
| V | 1 | 1 | 1 | 0.25 | 0.167 |
| VI | 2 | 2 | 1 | 0.5 | 0.25 |
| DO | 3 | 4 | 2 | 1 | 0.333 |
| TDS | 5 | 6 | 4 | 3 | 1 |

图 3 为各点位洛氏鳢幼鱼的 HSI, HSI 最小的点位是 T52 位于太子河下游, 值为 0.0661, 未采到鱼类; 最大点位是 T69 位于太子河北支, HSI 为 0.7739, 该点位采到鱼类 87 条, 其中洛氏鳢幼鱼 63 条。HSI 大于 0.5 的断面有 27 个, 多位于太子河上游(南支和北支)及支流上游, 共采集洛氏鳢 2 178 条, 每个点位平均 81 条。HSI 小于 0.2 的断面有 14 个, 多位于太子河下游及下游支流(海城河、南沙河和杨柳河)与太子河交汇口附近, 采集洛氏鳢 25 条, 每个点位平均 2 条。HSI 介于 0.2—0.5 的断面有 28 个, 多位于太子河中游, 采集洛氏鳢 321 条, 每个点位平均 12 条。

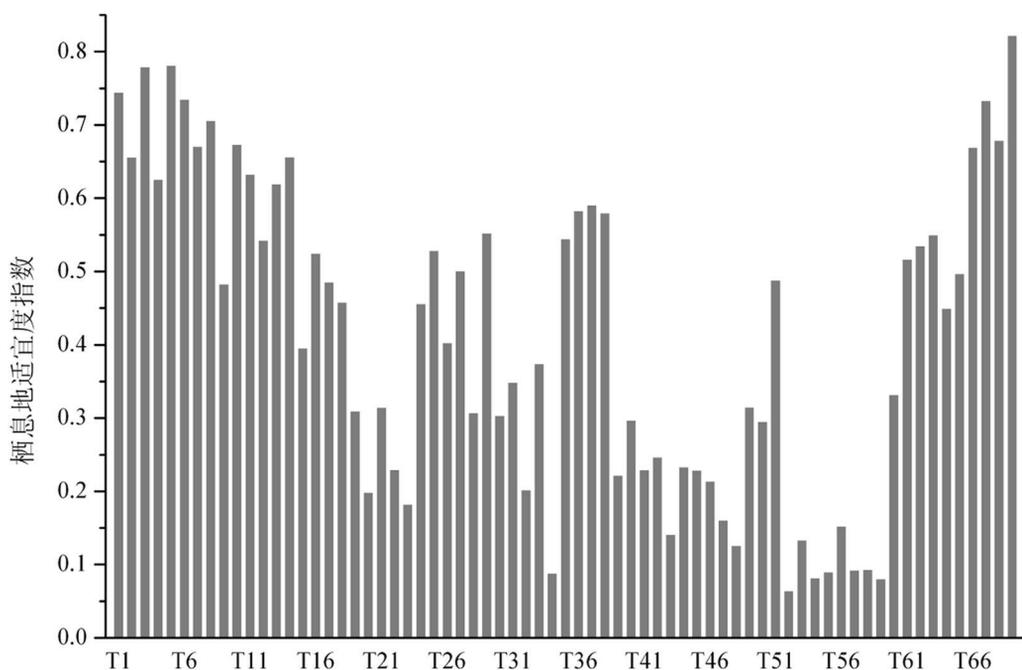


图 3 太子河不同点位洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数
Fig. 3 HSI of juvenile *Lagowski* at different sites of Taizi River

2.5 栖息地适宜度指数与洛氏鳢丰度、栖息地质量和土地利用类型的相关性分析

通过采用 Spearman秩相关分析, 结果表明洛氏鳢幼鱼 HS与其丰度显著相关 (相关系数为 0.684, $P < 0.01$)。HS与栖息地调查 10项指标得分、采样点所属小流域内各种土地利用类型 (主要有林地、草地、城镇和农田)所占比例的相关性分析见表 5和表

6。其中对栖息地质量的调查范围为采样点至上游 200 m 河岸两侧各 100 m 的矩形区域; 土地利用类型是基于遥感影像解译获得, 范围为采样点上游 10 km 河岸两侧各 1 km。

通过洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数与栖息地质量 10项指标得分及土地利用的相关性分析表明, HS与底质、堤岸稳定性、水质状况和人类活动强度

表 5 太子河洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数与栖息地质量 (得分) 相关性分析

Table 5 Correlative analysis between HSI of juvenile *P. lagowskii* and habitat quality (score) of Taizi River

| | 底质 | 栖息地复杂性 | 速度深度结合 | 堤岸稳定性 | 河道变化 | 水质状况 | 植被多样性 | 河水水量情况 | 河岸土壤类型 | 人类活动强度 |
|-----|---------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|--------|--------|-----------------------|
| HSI | 0.528** | 0.245 ^a | 0.241 ^a | 0.438 ^{***a} | 0.219 ^a | 0.669 ^{***a} | 0.043 ^a | 0.045 | 0.206 | 0.386 ^{***a} |

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ^a表示 Pearson 相关分析, 不带 ^a表示 Spearman 秩相关分析。

表 6 太子河洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数与土地利用的相关分析

Table 6 Correlative analysis between HSI of juvenile *P. lagowskii* and land use type of Taizi River

| 相关系数 | 林地比例 | 草地比例 | 城镇比例 | 农田比例 |
|------|-----------------------|--------|----------|------------------------|
| HSI | 0.607 ^{***a} | 0.256* | -0.604** | -0.445 ^{***a} |

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ^a表示 Pearson 相关分析, 不带 ^a表示 Spearman 秩相关分析。

的相关性极显著, 与栖息地复杂性和速度深度结合特性显著相关; 与林地和草地所占比例呈显著正相关关系, 与城镇和农田所占比例呈显著负相关。

2.6 栖息地质量、土地利用类型与栖息地环境因子的相关性分析

为进一步研究栖息地质量和土地利用对栖息地的影响方式, 选取对洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数有较大影响的因素 (底质、堤岸稳定性、水质状况、人类活动强度及土地利用类型) 与 HS 做相关分析 (表 7)。结果表明, 上述因素和 V D 的相关性并不显著; 底质得分、水质状况得分、堤岸稳定性得分、林地、城镇、农田与 TDS 的相关性极显著 ($P < 0.01$); 底质得分、水质状况得分、林地、城镇、农田与 DO 的相关性极显著 ($P < 0.01$); 流域内林地、城镇、农田用地对河岸带植被指数有着直接的影响。

表 7 太子河环境因子与栖息地质量和土地利用类型的相关分析

Table 7 Correlative analysis between environmental factors and habitat quality land use types of Taizi River

| 因子 | 底质得分 | 堤岸稳定性得分 | 水质状况得分 | 人类活动强度得分 | 林地 | 草地 | 城镇 | 农田 |
|-----|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|----------|------------------------|
| 速度 | 0.027 | 0.050 ^a | -0.115 ^a | -0.099 ^a | 0.010 ^a | 0.008 | 0.046 | -0.213 ^a |
| 深度 | -0.132 | -0.220 | -0.206 | -0.116 | -0.210 | -0.051 | 0.201 | 0.141 |
| DO | 0.489** | 0.221 ^a | 0.605 ^{***a} | 0.280 ^{***a} | 0.456 ^{***a} | 0.276* | -0.506** | -0.320 ^{***a} |
| TDS | -0.527** | -0.368 ^{***a} | -0.673 ^{***a} | -0.426 ^{***a} | -0.552 ^{***a} | -0.283* | 0.518** | 0.352 ^{***a} |
| VI | 0.273* | 0.117 ^a | 0.301 ^{***a} | 0.154 ^a | 0.494 ^{***a} | 0.157 | -0.536** | -0.365 ^{***a} |

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ^a表示 Pearson 相关分析, 不带 ^a表示 Spearman 秩相关分析。

3 讨论 (Discussion)

3.1 栖息地适宜度指数的空间分布特征

洛氏鳢幼鱼的 HS 在太子河上游较高 (> 0.5), 中游次之 ($0.2-0.5$), 下游较低 (< 0.2)。这主要是由于太子河上游及部分支流地处山区, 河岸带

植被覆盖度较高, 受人为干扰较少, 且洛氏鳢为小型鱼类, 喜栖于山区溪流^[30], 因此 HS 较高, 这些断面捕获的洛氏鳢数量占到其总渔获量的 80% 以上; 中游地区城镇化程度高, 人口密集, 河流沿岸建有許多工厂, 大量的生活污水和工业废水排入河流, 严重破坏了河流生态系统, 造成了中游 HS 的降低; 太子河

下游干流水污染状况与中游类似,加上污染物的累积作用,导致下游水生生态系统破坏较为严重,因此 HS 明显低于上游和中游。近年来关于太子河流域鱼类及其他水生生物的研究均发现,太子河上游至下游,水质逐渐变差,影响了水生生物的生存环境,破坏了河流生态系统,导致水生生物的种类和数量逐渐减少^[31-33]。

3.2 栖息地质量对栖息地适宜度的影响

水质对鱼类的生长和生存有着极为重要的影响。本研究中,太子河中下游干流及部分支流(点位 T30-T33、T39-T41、T45-T50、T52-T59)有生活污水及工业废水排入,水体污染严重, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值为 3.4 mg L^{-1} , 最大值为 13.2 mg L^{-1} , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 对鱼类的致死浓度为 $0.2-0.5 \text{ mg L}^{-1}$ ^[34]; BOD_5 平均值 17 mg L^{-1} , 最大值 117.5 mg L^{-1} , BOD_5 的增加亦会显著降低鱼类的数量^[35]; DO 平均值 4.2 mg L^{-1} , 最小值 0 当 DO 低于 2 mg L^{-1} 时,鱼类就会浮头甚至死亡^[36]。河流中重金属对鱼类可产生毒害作用,并能通过食物链传递和累积进入人体,对人体健康构成威胁^[37-38],本文中只有个别点位(T28)附近有矿厂存在,故未考虑重金属对鱼类的毒害作用。太子河流域内,有机物和营养物已成为影响太子河洛氏鳢生存和分布的重要因素,在中下游更是成为洛氏鳢生存的限制因素。国内外许多研究工作关于河流水质对鱼类影响进行了分析。英国约克郡的河流在工业革命后由于受到工业、矿业和生活污水的影响,水质较差,渔获量急剧降低,鱼类资源遭受极大破坏;在工厂被关停,污水处理厂排放标准提高后,河流的铁、镍、 BOD_5 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度都有较大幅度的下降,栖息地环境逐渐改善,鱼类资源得到很好的恢复^[35]。贾亚梅等对苗家河水质与鱼类监测调查分析发现,重污染水体将严重影响鱼类种群的发展及鱼类自身的生长^[39]。蒋艾青等分析了潇湘平湖菜市、曲河和宋家州 3 湖段水质对鱼类的影响,发现石油烃类、挥发酚类、重金属铜和氨氮等指标超标,会在鱼体内蓄积残留,并可诱导鱼类染色体损伤产生微核,引起鱼类中毒甚至种质变异^[34]。

表 7 表明底质状况得分和堤岸稳定性得分与 TDS 有极显著的相关性,进而影响洛氏鳢幼鱼 HSJ。采样过程中某些点位有挖沙和采金活动,造成这些点位水体中悬浮物浓度较高,而悬浮物与 TDS 有极显著的正相关关系(相关性为 0.932);且本次采样恰逢丰水期,降雨量和降雨强度均较大,对于堤岸稳

定性差的点位,雨水溅蚀和地表径流的冲刷使得大量泥沙进入河道,亦增加了水体中悬浮物浓度,降低了水体透明度,对鱼类的呼吸容易产生影响,导致鱼鳃堵塞^[39]。悬浮物沉降会造成底质中泥沙增多,而洛氏鳢喜栖于底质多页岩、砾石或山涧多石缝的环境,故这些点位采集的洛氏鳢丰度较低。

此外,栖境复杂性、速度和深度结合特性对洛氏鳢幼鱼 HS 也有一定影响。太子河上游为山区,地势陡峭,适合洛氏鳢喜栖于山区溪流的特性,且上游栖境复杂,可为喜好不同生境的鱼类提供适宜的生存环境;不同鱼类对相同的水深和流速条件的喜好程度不同,更多的速度和深度结合类型可为不同鱼类提供适宜的水深和流速条件。

3.3 土地利用对栖息地适宜度的影响

流域土地利用方式的差异也是影响河流栖息地结构的重要原因^[6]。洛氏鳢幼鱼 HS 与土地利用的相关性分析表明太子河沿岸在自然状态下(林地和草地所占比例大)洛氏鳢幼鱼 HS 较高,而在开发利用(城镇、农田所占比例大)情况下较低。本研究中土地利用类型的差异对 D 和 V 影响不大,其主要是通过影响 DQ、TDS 及 VI 来影响洛氏鳢幼鱼栖息地。

大量研究表明流域内土地利用方式对水质及水生生物有着显著的影响, Miserendino 等^[40]对巴塔哥尼亚 15 条河流的环境因子、河岸带状况、水生生物(鱼类、底栖、水生植物)及其流域内的土地利用状况(天然森林、种植林、牧场、城市建设用地)进行了调查分析,发现城市建设相比其他土地利用方式,对河流物理指标、营养状况、栖息地条件、河岸带质量及水生生物有着更为消极的影响,而处于天然森林中的河流生物完整性及多样性最高,种植林和牧场的环境因子、生物指数介于城市建设和天然森林之间。张殷俊等研究了江苏吴江水质与土地利用的关系,结果表明城市建设用地与 DO 显著负相关,与 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 显著正相关;园林地同 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 显著负相关,同 DO 显著正相关,这说明城市建设用地扩张对吴江水质指标有负面影响,而园林地对水质有一定程度的正面影响^[41]。岳隽等对深圳主要流域土地利用对河流水质的影响分析表明,耕地和建设用地等用地类型的增加,会增加水污染负荷量,导致地表水质恶化^[42]。

除了影响水质外,流域内土地利用的差异对河岸带植被覆盖度也有着较为明显的影响。太子河上

游山区至中下游平原,林地面积逐渐减少,农业用地面积逐渐增加,而随着城市化进程的加快,城市建设用地增长的速度也逐渐增快,这些因素导致了中下游河岸带植被覆盖度较上游低。洛氏鳢怕强光,喜栖于较阴的河流环境,河岸带高植被覆盖度为其提供了这种条件。

3.4 栖息地适宜性

建立指示生物对环境因子的适宜度曲线是 IFM 的生物学基础^[43],但大多研究者是参考已有文献中的曲线来获得的,未考虑海拔和气候等差异,本文选取的 5 个栖息地因子的适宜度曲线,均通过对实测数据进行统计分析获得。另外,在对鱼类栖息地适宜度进行评估时,不同于以往大多研究者只选取水深和流速等水文要素,本文综合考虑了河流水文、水质及河岸带植被等要素,对鱼类栖息地要素考虑的更为全面。研究表明,与水文、河岸带植被要素相比,太子河的水质对洛氏鳢幼鱼的生长和分布有着更为重要的影响,因此在太子河中下游应严格控制污染物排放,提高水环境质量。

由于点位较少,建立的适宜度曲线可能会存在一定误差,但本研究侧重于比较太子河各点位洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度的影响因素,建立的栖息地适宜度曲线可满足后续分析的要求。后续工作期望通过对洛氏鳢及环境因子进行长时间和不同生长周期(产卵期、育幼期、越冬期、洄游鱼类的洄游期)的研究,并综合考虑影响其生长和生存的要害,建立更为精确的适宜度曲线,并在此基础上计算洛氏鳢幼鱼的 HSI。

综合分析结果,本文得到以下结论:

(1)基于太子河流域 2009 年 8 月的鱼类和栖息地调查数据,以鱼类优势种—洛氏鳢幼鱼作为指示生物,通过相关性分析和主成分分析法从 20 个栖息地因子中筛选出水深、流速、总溶解固体、溶解氧和河岸带植被指数等 5 个因子来表征栖息地状况,建立了洛氏鳢幼鱼对 5 个因子的适宜度模型;并利用加权平均法计算出了各点位的洛氏鳢幼鱼的栖息地适宜度指数,该值在太子河上游较高 (> 0.5)、中游次之 ($0.2-0.5$)、下游较低 (< 0.2)。

(2)通过分析栖息地 10 项调查指标对洛氏鳢幼鱼综合栖息地适宜度指数及 5 个因子的影响,得到洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度与底质、堤岸稳定性、水质状况和人类活动强度的相关性极显著,与栖境复杂性和速度深度结合特性显著相关。底质、水质状况

和堤岸稳定性对水体中的总溶解固体和溶解氧的浓度有显著影响。

(3)通过分析土地利用对洛氏鳢幼鱼栖息地适宜度指数及 5 个因子的影响,得到采样点小流域内林地和草地比例较大,适宜度指数较高;城镇和农田所占比例较大,会降低适宜度指数。土地利用类型主要通过影响水体中总溶解固体、溶解氧及河岸带植被来影响鱼类栖息地。

通讯作者简介:张远(1970—)男,环境科学博士,研究员,主要研究方向为水环境和水生态研究,发表学术论文 60 余篇。

参考文献:

- [1] Lopes L F, Camo J S, Cories R M, et al. Hydrodynamics and water quality modeling in a regulated river segment: Application on the instream flow definition [J]. *Ecological Modelling* 2004, 173(2-3): 197-218
- [2] 易雨君,王兆印,陆永军.长江中华鲟栖息地适合度模型研究[J].*水科学进展*, 2007, 18(4): 538-544
Yi Y J, Wang Z Y, Lu Y J. Habitat suitability index model for Chinese sturgeon in the Yangtze River [J]. *Advances in Water Science* 2007, 18(4): 538-544 (in Chinese)
- [3] Paik R A, Clough J S, Wellman M C. Aquatop: Modeling environmental fate and ecological effects in aquatic ecosystems [J]. *Ecological Modelling* 2008, 213(1): 1-15
- [4] McLaughan K A, Soares A M. The bioassessment of fish and macroinvertebrates in a Mediterranean-Atlantic climate: Habitat assessment and concordance between contrasting ecological samples [J]. *Ecological Indicators* 2010, 10(2): 184-191
- [5] Hardy T B, Addley R C. Vertical integration of spatial and hydraulic data for improved habitat modeling using geographic information systems // M C Acronan. *Hydroecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology* [M]. Center for Ecology and Hydrology, Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, 2001, 65-75
- [6] 郑丙辉,张远,李英博.辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究[J].*环境科学学报*, 2007, 6: 928-937
Zheng B H, Zhang Y, Li Y B. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2007, 27(6): 928-937 (in Chinese)
- [7] 张远,郑丙辉,王西琴,等.辽河流域浑河、太子河生态需水量研究[J].*环境科学学报*, 2007, 27(6): 937-944
Zhang Y, Zheng B H, Wang X Q, et al. Study of ecological instream flow of the Hun River and Taizi River in Liao River Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*

- 2007 27(6): 937—943 (in Chinese)
- [8] 英晓明, 崔树彬, 刘俊勇, 等. 水生生物栖息地适宜性指标的模糊综合评判 [J]. 人民珠江, 2007 5: 29—33
Ying XM, Cui SB, Liu JY et al. Aquatic life habitat suitability index system fuzzy synthetic assessment [J]. Pearl River, 2007 5: 29—33 (in Chinese)
- [9] 林龙山, 程家骅, 姜亚洲, 等. 黄海南部和东海小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*) 产卵场分布及其环境特征 [J]. 生态学报, 2008 28(8): 3485—3494
Lin LS, Cheng JH, Jiang YZ et al. Spatial distribution and environmental characteristics of the spawning grounds of small yellow croaker in the southern Yellow Sea and the East China Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008 28(8): 3485—3494 (in Chinese)
- [10] Jowett IG. Models of the abundance of large brown trout in New Zealand Rivers [J]. North American Journal of Fisheries Management, 1992 12(3): 417—432
- [11] Bovee K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology [R]. U S Fish and Wildlife Service FWS/OBS 82/26 1982 248
- [12] Jorde K, Schneider M, Peter A et al. Fuzzy based Models for the Evaluation of Fish Habitat Quality and In-stream Flow Assessment [C]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics, 5-8 December 2001
- [13] Parasiewicz P, MeszHABSM. A concept for application of instream flow models in river restoration planning [J]. Fisheries, 2004 26(9): 6—13
- [14] Steffler P, Blackburn J. River 2D Two Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat. Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual [R]. Canada University of Alberta, 2002
- [15] Bragg OM, Black AR, Duck RW, et al. Approaching the Physical/biological interface in rivers: A review of methods for ecological evaluation of flow regimes [J]. Progress in Physical Geography, 2005 29(4): 506—531
- [16] Bockelmann BN, Frenrich EK, Lin B, et al. Development of an ecohydraulics model for stream and river restoration [J]. Ecological Engineering, 2004 22(4-5): 227—235
- [17] Bunn SE, Arthington AH. Basic Principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity [J]. Environmental Management, 2002 30(4): 492—507
- [18] Quigley JT, Harper D J. Compliance with Canada's fisheries act: A field audit of habitat compensation projects [J]. Environmental Management, 2006 37(3): 336—350
- [19] Mouyon AM, Schneider M, Depesle J, et al. Fish habitat modeling as a tool for river management [J]. Ecological Engineering, 2007 29(3): 305—315
- [20] Shiha S S, Lee H Y, Chen C C. Model based evaluations of spur dikes for fish habitat improvement: A case study of endemic species *Varicorhinus barbatulus* (Cyprinidae) and *Hemimyzon formosanus* (Homalopteridae) in LanYang River Taiwan [J]. Ecological Engineering, 2008 34(2): 127—136
- [21] Gillenwater D, Granaat Zka U. GIS-based modeling of spawning habitat suitability for walleye in the Sandusky River, Ohio and implications for dam removal and river restoration [J]. Ecological Engineering, 2006 28(3): 311—323
- [22] 杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2007 35(2): 125—130
Yang Y, Yan ZM, Qiao Y. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007 35(2): 125—130 (in Chinese)
- [23] 易雨君, 王兆印, 姚仕明. 栖息地适合度模型在中华鲟产卵场适合度中的应用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2008 48(3): 340—343
Yi Y J, Wang Z Y, Yao SM. Habitat suitability model for evaluating Chinese sturgeon spawning sites [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008 48(3): 340—343 (in Chinese)
- [24] 王晓刚, 严忠民. 河道汇流水力特性对鱼类栖息地的影响 [J]. 天津大学学报, 2008 41(2): 204—208
Wang X G, Yan ZM. Effect of hydraulic characteristics of confluent channel on physical habitat for fish communities [J]. Journal of Tianjin University, 2008 41(2): 204—208 (in Chinese)
- [25] Hatten JR, Parsley M J. A spatial model of white sturgeon rearing habitat in the lower Columbia River, USA [J]. Ecological Modelling, 2009 220(24): 3638—3646
- [26] Konrad CP. Simulating the recovery of suspended sediment transport and river bed stability in response to dam removal on the Elwha River, Washington [J]. Ecological Engineering, 2009 35(7): 1104—1115
- [27] 张楠, 孟伟, 张远, 等. 辽河流域河流生态系统健康的多指标评价方法 [J]. 环境科学研究, 2009 22(2): 162—170
Zhang N, Meng W, Zhang Y, et al. Multi-Variable assessment of river ecosystem health in Liao River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2009 22(2): 162—170 (in Chinese)
- [28] 李凤清, 蔡庆华, 傅小城, 等. 溪河大型底栖动物栖息地适合度模型的构建与河道内环境流量研究——以三峡库区香溪河为例 [J]. 自然科学进展, 2008 18(12): 1417—1427

- Li F Q, Cai Q H, Fu X C, et al. Construction of habitat suitability models (HSMs) for benthic macroinvertebrate and their applications to instream environmental flows: A case study in Xiangxi River of Three Gorges Reservoir region, China [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(12): 1417—1427 (in Chinese)
- [29] 张文鸽, 黄强, 蒋晓辉. 基于物理栖息地模拟的河道内生态流量研究 [J]. *水科学进展*, 2008, 19(2): 192—197
- Zhang W G, Huang Q, Jiang X H. Study on instream ecological flow based on physical habitat simulation [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(2): 192—197 (in Chinese)
- [30] 盐城工学院海洋馆,《中国淡水鱼类原色图集》[OL]. 盐城工学院. 2010-12-5 http://www.hygcycit.cn/index.asp
- [31] 郭芬. 辽河流域水生生态与水环境因子时空变化特征研究 [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2009
- Guo F. The Study on Temporal and Spatial Variation Characters of Water Ecological and Water Environmental Factors in Liao River Basin [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2009 (in Chinese)
- [32] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于生态保护目标的太子河下游河道生态需水量计算 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(7): 1466—1471
- Feng X Q, Zhang G X, Yin X R. Calculation of instream ecological water requirement of Taizi River based on the allocation of ecological water right [J]. *Acta Scientiarum Circumstantiae*, 2010, 29(7): 1398—1402 (in Chinese)
- [33] 苏玉, 王东伟, 文航, 等. 太子河流域本溪段水生生物的群落特征及其主要水质影响因子分析 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1801—1808
- Su Y, Wang D W, Wen H, et al. Analysis of key water quality factors of the aquatic assemblages community in Benxi district of the Taizi basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(8): 1801—1808 (in Chinese)
- [34] 蒋艾青, 肖克宇, 郑陶生. 潇湘平湖水质污染及其对鱼类影响的研究 [J]. *水产科学*, 2006, 25(11): 552—556
- Jiang A Q, Xiao K Y, Zheng T S. Water pollution and its effects on the fishes in Xiaoxiang Lake [J]. *Fisheries Science*, 2006, 25(11): 552—556 (in Chinese)
- [35] Amisah S, Cowx I G. Response of the fish populations of the River Don in south Yorkshire to water quality and habitat improvements [J]. *Environmental Pollution*, 2000, 108(2): 191—199
- [36] 陈福平. 浅谈水环境对鱼类养殖的影响 [J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(16): 57
- Chen F P. Discussion of effect of water environment on fish farming [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(16): 57 (in Chinese)
- [37] Gil F, Capitan Valvey L F, De S E, et al. Heavy metal concentrations in the general population of Andalusia South of Spain: A comparison with the population within the area of influence of Aznalcollar mine spill (SW Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 372(1): 49—57
- [38] 祝惠, 阎百兴, 张凤英. 松花江鱼体中重金属的富集及污染评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(5): 492—496
- Zhu H, Yan B X, Zhang F Y. Enrichment of heavy metals in fishers of Songhua river and its pollution assessment [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(5): 492—496 (in Chinese)
- [39] 贾亚梅, 操家顺, 林涛. 苏州苗家河水质污染对鱼类的影响 [J]. *云南环境科学*, 2006, 25(1): 35—37
- Jia Y M, Cao J S, Lin T. Influence on fish from polluted water in Miaojiahe River in Suzhou [J]. *Yunnan Environment Science*, 2006, 25(1): 35—37 (in Chinese)
- [40] Miserendino M L, Casaux R, Archangel'skyy M, et al. Assessing land-use effects on water quality in stream habitat riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 612—624
- [41] 张殷俊, 陈爽, 彭立华. 平原河网地区水质与土地利用格局关系—以江苏吴江为例 [J]. *资源科学*, 2009, 31(12): 2150—2156
- Zhang Y J, Chen S, Peng L H. Relationships between land use pattern and surface water quality in the plain river network area: a case study of Wujiang in Jiangsu Province [J]. *Resources Science*, 2009, 31(12): 2150—2156 (in Chinese)
- [42] 岳隽, 王仰麟, 李正国, 等. 河流水质时空变化及其受土地利用影响的研究—以深圳市主要河流为例 [J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 359—366
- Yue J, Wang Y L, Li Z G, et al. Spatial temporal trends of water quality and its influence by land use: A case study of the main rivers in Shenzhen [J]. *Advances in Water Sciences*, 2006, 17(3): 359—366 (in Chinese)
- [43] 石瑞华, 许士国. 河流生物栖息地调查及评估方法 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 2081—2086
- Shi R H, Xu S G. Methods for river habitat survey and evaluation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 2081—2086 (in Chinese) ◆