

DOI: 10.5846/stxb201311082699

赵瑞, 高欣, 丁森, 张远, 渠晓东, 刘思思. 辽河流域大型底栖动物耐污值. 生态学报, 2015, 35(14): 4797-4809.

Zhao R, Gao X, Ding S, Zhang Y, Qu X D, Liu S S. Tolerance values of macroinvertebrate taxa in Liao River basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4797-4809.

辽河流域大型底栖动物耐污值

赵 瑞^{1,2}, 高 欣^{1,2}, 丁 森^{1,2}, 张 远^{1,2,*}, 渠晓东³, 刘思思^{1,2}

1 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2 中国环境科学研究院, 流域水生态研究室, 北京 100012

3 中国水利水电科学研究院, 水环境研究所, 北京 100038

摘要:大型底栖动物耐污值是构建河流生物评价指标的基础。受自然地理区域影响,同一分类单元的耐污值会出现地域上的差异,因此计算和修订适用于某一研究区域的耐污值是准确评价该区域河流健康状况的前提。目前尚未有针对我国北方河流大型底栖动物耐污值计算和修订的报道,基于 2009 年春季、秋季和 2010 年夏季在辽河流域 308 个样点的大型底栖动物数据,采用 Simpson 多样性指数的水质分级标准对所有样点的水质等级进行了划分,并利用累积分位数法计算获得了辽河流域大型底栖动物 195 个分类单元的耐污值;同时参考专家经验和相关文献核定了其余 71 个分类单元的耐污值。依据耐污值敏感特征划分标准,辽河流域大型底栖动物优势类群以敏感种和一般耐污种为主,两者几乎占到总分类单元数的 84%,耐污类群种类较少,仅占 16%。其中敏感类群有齿蛉科 Corydalidae, 襁科 Perlidae, 原石蛾科 Rhyacophilidae, 细蜉科 Leptophlebiidae 等;一般耐污类群有纹石蛾科 Hydropsychidae, 四节蜉科 Baetidae, 扁蜷螺科 Planorbidae 等;耐污类群有颤蚓科 Tubificidae、石蛭科 Erpobdellidae 等。

关键词:大型底栖动物;耐污值;辽河流域

Tolerance values of macroinvertebrate taxa in Liao River basin

ZHAO Rui^{1,2}, GAO Xin^{1,2}, DING Sen^{1,2}, ZHANG Yuan^{1,2,*}, QU Xiaodong³, LIU Sisi^{1,2}

1 State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3 Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

Abstract: Tolerance represents the relative capacity of aquatic organisms to survive and reproduce under different levels of environmental stress. Tolerance values (TVs) of macroinvertebrates are broadly used for calculating metrics applied in bioassessment. Variability among TVs may be related to regional differences in macroinvertebrate sensitivity to pollution; whether the calculations and amendments of TVs are appropriate for one region is the basis for accurate evaluation of river health condition. Two methods, namely, expert opinion and statistical analysis, have been used to derive the TVs of macroinvertebrate taxa. The TVs currently used in bioassessment of northern rivers in China were acquired from relevant literature and expert opinion. The bioassessment results, however, will be more accurate if the TVs are derived from statistical analysis. The objective of the current study was to derive the TVs appropriate for macroinvertebrate taxa in northeastern rivers in China. Macroinvertebrate data from 308 samples were collected in spring and autumn in 2009 and summer in 2010 in the Liao River basin. Using the revised Simpson index, we assigned the water quality into five categories as: ≥ 10 , excellent; ≥ 6 , good; ≥ 3 , good-fair; ≥ 2 , fair; and < 2 , poor. Different scores were marked to different

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-001-04); 中欧环境可持续发展计划(DCI-ASIE/2013/323-261); 国家自然科学基金(2010KYYW06); 国家自然科学基金(41401066)

收稿日期:2013-11-08; **网络出版日期:**2014-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyuan@craes.org.cn

water quality: excellent, 1; good, 2; good-fair, 3; fair, 4 and poor, 5. Macroinvertebrates were grouped and coded based on abundance at each site: < 1 ind./sample = 0; 1—2 ind./sample = 1; 3—9 ind./sample = 3; and ≥ 10 ind./sample = 10. The average abundance values for each taxon were calculated for each of the five water quality classes. The average abundance values were converted into a cumulative percentile: the 75th percentile value was used for a taxon that had > 10 records and the 50th percentile value was used for a taxon that had 5—10 records. This yielded preliminary tolerance values of 0.0—4.5, which were transformed to final tolerance values on a 0—10 scale. A total of 195 macroinvertebrate taxa TVs were calculated, including one genus in one family for each Megaloptera, Amphipoda, Decapoda, Basommatophora, Unionoida, Tubificida, Hirudinea, Turbellaria, and Arachnida; one family of Collembola; two families (including one taxon at genus-level) of Hemiptera; five genera in three families of Plecoptera; five genera in four families of Odonata; five genera in four families of Mesogastropoda; six families (including five taxa at genus-level) of Coleoptera; 13 genera in 10 families of Trichoptera; 17 genera in eight families of Ephemeroptera; and 18 genera and three sub-families in 12 families of Diptera. The other 71 TVs were derived from expert opinion and relevant literature. TVs were classified according to sensitivity as: $TV \leq 3$, intolerant; $3 < TV < 7$, intermediate; and $TV \geq 7$, tolerant. The dominant macroinvertebrate families in the Liao River basin were divided into the three groups as follows: intolerant group, including Corydalidae (2.1), Perlidae (1.3—2.1), Rhyacophilidae (0.6—3.0), and Leptophlebiidae (0.4—1.7); intermediate group, including Hydropsychidae (3.7—5.3), Baetidae (3.4—6.2), and Planorbidae (3.7—5.5); and tolerant group, including Tubificidae (5.0—9.9) and Erpobdellidae (7.8—8.6). The intolerant and intermediate groups comprised nearly 84% of the total taxa, while the tolerant group comprised only 16% of the total taxa. We suggest that TVs can be used to assess the water quality of streams and rivers in northern China.

Key Words: macroinvertebrates; tolerance value; Liao River basin

耐污值(TV)是指生物在时间和空间上对环境压力的耐受性,反映了生物在环境压力干扰下其生存和繁殖相对能力的高低^[1]。在河流生态学领域,耐污值最早是作为河流生物监测指标的重要组分而被提出^[2-3],主要应用于大型底栖动物监测评价体系,所涉及指标如 Hilsenhoff 生物指数(HBI)^[4]、北卡罗来纳州生物指数(NCBI)^[5]、敏感性/耐污性的丰富度综合指数^[6]等。随着耐污值计算方法的不断改进^[5-7],研究者发现不同地理区域大型底栖动物耐污值存在差异。对于全球分布的大型底栖动物来说,受气候、地理特征等环境因子影响,同一科所包含的属或同一属所包含的种在大尺度地理区域间会有所不同^[5],进而会影响到同一科/属的耐污值发生变化。美国国家环境保护局(USEPA, United States Environmental Protection Agency)在综合考虑地理区域影响的基础上,分别建立了美国西北部、中西部、东南部、中西部偏北和沿大西洋中部海岸区 5 个区域的大型底栖动物耐污值体系^[6]。

目前,我国大型底栖动物耐污值的研究报道多集中于中南部地区,如:江西庐山、安徽南部山区、秦淮河和长江三角洲等^[8-9],而我国北方地区的相关报道较少^[10]。此外,以往的耐污值研究过于依赖专家经验,或参与构建耐污值的样本数量过少。针对上述大型底栖动物耐污值研究中的不足,本研究基于 2009—2010 年辽河全流域大型底栖动物基础数据,初步推导了辽河流域大型底栖动物主要分类单元耐污值,为整个辽河流域水质生物评价提供理论依据和数据支持,也为我国东北地区大型底栖动物耐污值数据库的建立提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

辽河流域位于中国东北地区南部(116°30'E—125°47'E, 38°43'N—45°00'N),河流全长 1345 km,流域面积约 22.0×10^4 km²。辽河流域年降水量 350—1000 mm,降水分布极不均匀,降水量自东南向西北逐渐减少,且多集中于 6—9 月,约占全年降水量的 70%,属温带、暖温带半湿润大陆性季风气候。辽河流域上游为山丘

区,植被差,覆盖率在 30%以下,水土流失严重,是风沙干旱严重区,东部为丘陵区,森林茂密,植被覆盖率高,中下游为平原区。辽河流域土地利用类型以农田为主(38.29%),草地(23.65%)和林地(24.3%)次之,裸地(6.45%),城市用地(4.43%)和水田(4.4%)所占比例最少,其中草地和林地主要分布在辽河流域的东南、西南和西北的一级河流区,这些区域的栖境状况也最佳。辽河流域各支流源头区域的水质和栖境状况良好,中下游河段 COD 和 BOD₅含量较高,受工业污染影响较大^[11]。

1.2 大型底栖动物样品采集

2009 年春季、秋季和 2010 年夏季,在辽河流域共设置 308 个样点(图 1),开展大型底栖动物野外监测。利用索伯网(面积 0.3 m×0.3 m,孔径 0.5 mm),选择不同生境类型的采样断面收集 3 个平行样品,将样品冲洗并用 60 目筛网过滤,放入 500 mL 广口瓶,加 75%酒精保存。在实验室条件下,利用体式显微镜(Olympus SZ61)将绝大多数物种鉴定到种或属,摇蚊鉴定到亚科,寡毛类和线虫鉴定到纲。

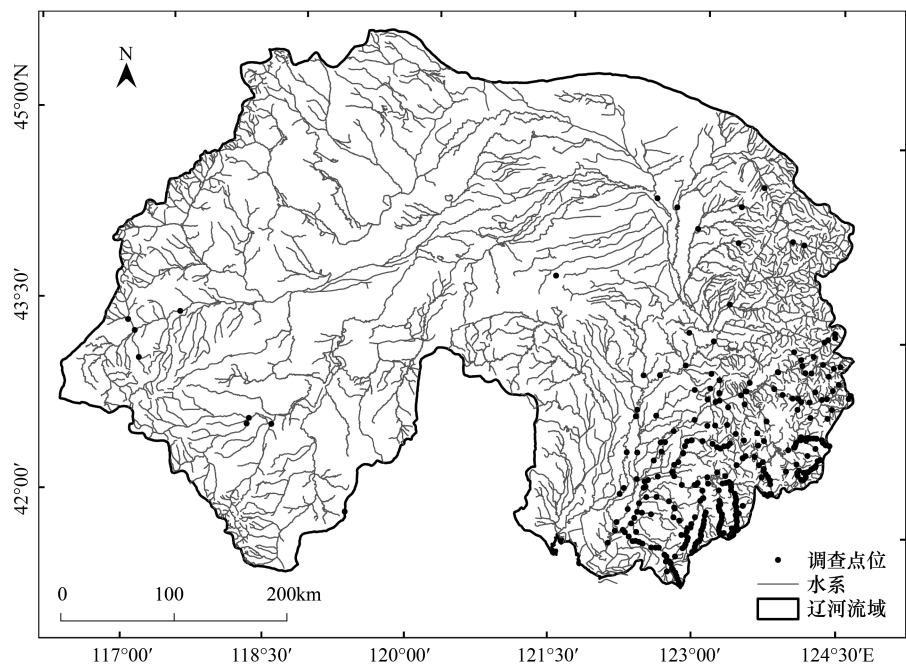


图 1 辽河流域样点图

Fig.1 The sampling sites in Liaohe River basin

1.3 水质级别划分

我国已有的多样性指数水质划分标准是黄玉瑶等^[12]提出的,王备新等^[9]在计算我国东部地区大型无脊椎动物耐污值时,根据 Lenat^[5]提出的五级水质划分标准,对我国的 Shannon-Wiener 多样性指数(H')水质划分标准进行了调整,即: $H' \geq 4$,极清洁; $H' \geq 3$,清洁; $H' \geq 2$,轻污; $H' \geq 1$,中污; $H' < 1$,重污。本研究利用 H' 进行水质划分发现样点在各水质级别分布不均匀,而用修订过的 Simpson 多样性指数(D')划分的结果较好,故本研究采用 D' 划分水质级别并赋分^[13](表 1)。

表 1 水质级别划分标准及赋分

Table 1 Water-quality rating and score

D'	水质级别 Water-quality rating	赋分 Score	D'	水质级别 Water-quality rating	赋分 Score
≥ 10	最清洁	1	≥ 6	清洁	2
≥ 3	轻污	3	≥ 2	中污	4
< 2	重污	5			

1.4 耐污值计算方法

1.4.1 分类单元和丰富度值的转化

依据大型底栖动物分类单元在不同水质级别中出现的个体数将其分为 4 个类型,并赋予 4 个不同的丰富度值(表 2)。

表 2 个体数和丰富度值间的转化方法

Table 2 The transformation between individual number and abundance value

生物参数 Biological parameters	1 类 Type 1	2 类 Type 2	3 类 Type 3	4 类 Type 4
个体数 Individual number	<1	1—2	3—9	≥10
丰富度值 Abundance value	0	1	3	10

1.4.2 初始耐污值(PTV)确定方法

PTV 的确定包含以下几个关键步骤:

- (1) 为水质级别赋分,最清洁赋 1 分;清洁赋 2 分;轻污赋 3 分;中污赋 4 分;重污赋 5 分(表 1);
- (2) 以 *Hydropsyche orientalis* 为例,按照表 2 的方法将其在各样点的个体数转化为丰富度值;
- (3) 计算 *H. orientalis* 在各水质级别中的总丰富度,同时计算相应的平均丰富度值如其在最清洁水体中总丰富度值为 144,样本数 22,平均丰富度值为 $144/22=6.55$ (表 3);

(4) 计算 *H. orientalis* 在 5 个水质级别的平均丰富度的累积百分位数(表 3)

1) 累加 *H. orientalis* 的 5 个水质级别的平均丰富度值得总平均丰富度值

$$6.55+5.05+2.61+1.40+0.73=16.34$$

2) 计算 *H. orientalis* 在每个水质级别中的累积百分位数

最清洁 $6.55/16.34=40\%$

清洁 $(6.55+5.05)/16.34=45\%$

轻污 $(6.55+5.05+2.61)/16.34=87\%$

中污 $(6.55+5.05+2.61+1.40)/16.34=96\%$

重污 $(6.55+5.05+2.61+1.40+0.73)/16.34=100\%$

统计 *H. orientalis* 在所有样点出现的次数为 98。

表 3 *H. orientalis* 在不同水质级别下的平均丰富度值和累积百分位数

Table 3 Average abundance and accumulative percentiles by water-quality ratings of *H. orientalis*

项目 Item	最清洁 Excellent	清洁 Good	轻污 Good-fair	中污 Fair	重污 Poor
总丰富度数 Total abundance	144	192	282	73	64
样本数 Number of sample	22	38	108	52	88
平均丰富度 Average abundance	6.55	5.05	2.61	1.4	0.73
累计百分位数 Accumulative percentiles	0.4	0.71	0.87	0.96	1

参考 Lenat^[5]的方法,确定计算 *H. orientalis* 初始耐污值的累积百分位数具体原则如下:分类单元被采集到的次数大于 10,以 75%分位数值作为初始耐污值;5—10 次,以 50%分位数值为初始耐污值;少于 5 次,不参加统计,结合文献资料,采用专家观点的方法确定耐污值。其计算公式如下:

$$PTV = L_1 + (A - N_1)/(N_2 - N_1) \times (L_2 - L_1)$$

式中, L_1 为上个水质级别的分值; L_2 为下个水质级别的分值; N_1 为 L_1 所对应的百分位数; N_2 为 L_2 所对应的百分位数。 A 为 75%或 50%。

依据以上原则,*H. orientalis* 的出现次数为 98,应采用 75%分位数对应值作为初始耐污值,从表 3 可知,

75%分位数位于清洁(45%)和轻污(87%)之间,清洁的分值为2,轻污的分值为3,将 $L_1=2$, $L_2=3$, $N_1=45\%$, $N_2=87\%$,代入上式计算其初始耐污值 PTV 为2.3。

1.4.3 耐污值(TV)的确定

采用上述方法确定的初始耐污值的分布范围一般位于1—4.5。根据公式:TV=2×(1.43×PTV-1.43)将初始耐污值转换为目前通用的耐污值(分布范围为0—10)。通过上述计算获得 *H. orientalis* 的 TV 为3.6。

1.5 耐污特征的划分

根据大型底栖动物耐污值的高低,可将其分为3类^[14]:TV≤3,敏感类群(Intolerant group);3—7,一般耐污类群(Intermediate group);TV≥7,耐污类群(Tolerant group)。

2 结果

2.1 大型底栖动物群落结构

在辽河流域共调查采集大型底栖动物236属(种),共计403039头,隶属于4门12纲31目102科。其中节肢动物门(Arthropoda)8目178种,占底栖动物总数的60%,软体动物门(Mollusca)5目32种,占11%,环节动物门(Annelida)4目25种,占8%,扁形动物门(Platyhelminthes)1目1种,占2%。

2.2 水质级别划分

利用修订过的 Simpson 指数(D')对辽河流域308个样点进行水质级别划分,其中水质级别属于污染较轻的样点(最清洁、清洁、轻污)占54.5%,污染较重点位(中污、重污)样点占到45.5%,样点比例表明适合耐污值的计算(表3)。

2.3 大型底栖动物主要分类单元耐污值

本研究获得了辽河流域195个大型底栖动物分类单元的耐污值(附录I),包括昆虫纲广翅目1科1属,蜻蜓目4科5属,襀翅目3科5属,毛翅目10科13属,蜉蝣目8科17属,鞘翅目6科5属,半翅目2科1属,双翅目12科3亚科18属,弹尾目1科,端足目1科1属,十足目1科1属,基眼目1科3属,中腹足目4科5属,蚌目1科1属,颤蚓目3科4属,蛭纲3科5属,蛛形纲1科1属,涡虫纲1科1属。采用专家观点的方法给出了71科、属级的耐污值。

辽河流域耐污值较高的类群有颤蚓科 Tubificidae(5—9.9)和石蛭科 Erpobdellidae(7.8—8.6)。敏感类群有齿蛉科 Corydalidae(2.1),襀科 Perlidae(1.3—2.1),原石蛾科 Rhyacophilidae(0.6—3),细裳蜉科 Leptophlebiidae(0.4—1.7)等,一般耐污类群有纹石蛾科 Hydropsychidae(3.7—5.3),四节蜉科 Baetidae(3.4—6.2),扁蜆螺科 Planorbidae(3.7—5.5)等。大型底栖动物以敏感种和中度耐污种为主,两者占到总分类单元个数的84%,而耐污类群种类较少,仅占16%。

3 讨论

选取适合的方法和标准对样点水质级别进行划分是准确计算大型底栖动物耐污值的前提。Lenat^[5]采用 EPT 分类单元数作为水质级别的划分标准,其将 EPT 分类单元数大于41的点位水质级别划分为清洁。本研究发现辽河流域所有样点 EPT 值相对较低,即便水质条件和栖境状况最好的点位,其 EPT 分类单元数也不超过27。王备新等^[9]报道了我国东部地区祁门历溪双河口、七阳坑和唐云里的 EPT 值分别为18、14和17;本研究组在广西红水河上游长洲河的 EPT 值为16(未发表数据)。因此,不难推测美国与中国本底 EPT 物种丰富度的差异是导致 Lenat 的水质级别划分标准不适用于本研究区域的原因之一。此外,美国水质级别划分标准是以不同水生态区域为基础,这需要大量样本数支持,但目前较难实现大样本数据的获取,利用 EPT 进行水质级别划分对于小样本数据并不适用。因此,在中国开展长期的水生生物监测可更准确地开展水质生物评价,也是与国际已有研究成果进行比较的基础。

在对我国东部河流底栖动物耐污值的研究中,王备新等^[9]改用多样性指数进行水质级别划分,并将以往

的 4 级标准改为 5 级,以便于与美国分类单元耐污值进行对比。同样,本研究将 Simpson 多样性指数 4 级划分标准改为 5 级,对样点进行水质级别划分,所计算辽河流域大型底栖动物耐污值比较准确可信。但本研究所采用的方法仍存在不足,例如只采用 Simpson 多样性指数进行样点的水质级别划分,而没有考虑到河流生态特征的纵向差异性,用一套标准来划分源头区与下游区的水质等级并不合理。美国对此是按照水生态区为基础,制定了不同生态区的河流水质级别划分标准^[5]。因此,中国亟需建立基于水生态区的河流管理模式,进而建立合理的基于生物学的河流水质级别划分标准。

耐污值作为反映生物耐受外界环境干扰的一种生物属性,有一定的稳定性,它是与外界环境特征长期相互作用的结果。王备新等^[9]研究发现生活在不同地理区的同一生物类群,假如其环境特征差异较大,会导致其耐污值发生变化。Lenat 在对美国北卡州大型底栖动物耐污值的研究中,考虑到了不同类型河流中大型底栖动物在分类单元组成及耐污性方面的差异,分别计算了不同类型河流大型底栖动物的耐污值^[5]。在此基础上,美国 EPA 也建立了 5 个不同地区的大型底栖动物分类单元耐污值体系^[6]。Bressler 等^[1]在对密西西比河大型底栖动物耐污值的研究中也提到了地区差异性的问题,底质组成、水文情势等都可能是引起大型底栖动物耐污值变化的因素。例如,某物种分别出现在沙质底的河流以及受人为干扰后变为沙质底的河流,后者由于存在人类干扰,河流的健康状况有所下降,物种耐受能力相对升高,因此该物种在前者的耐污值就会低于后者。本研究所计算的耐污值与我国东部地区间存在一定差异,这与南北方地貌、气候、水文条件密切相关。比如某些冷水性物种,在南方仅分布在高山溪流区,而在北方地区分布较广,从而表现出耐受性相对较强。例如直突摇蚊亚科大多数物种属冷水性^[15],在辽河流域 TV 是 6.9,而在我国东部地区 TV 是 4.0。底栖动物的分布有一定的地域性,同一科属所包含的种类不同,每个种类对污染的耐受能力不同,导致不同地区同一科属分类单元耐污值存在差异;即便是不同地理区域的同一物种,其耐污能力可能随环境不同而发生变化,因此耐污值的计算和应用应具有区域性的特点^[1,5,9]。本研究中大型底栖动物的耐污值均是根据 2009 年和 2010 年两年在辽河流域所获数据而计算的,故推荐于我国东北地区使用。

目前计算耐污值的方法日趋完善,除 Lenat^[5]的计算方法外,Bressler^[1]还采用了 PCA 对密西西比河大型底栖动物耐污值进行了研究,并与之前北卡州 Lenat 的计算结果进行了比较,最终修订了部分物种的耐污值。同时,美国 EPA 探讨了目前国际上普遍使用的 PCA^[1]、EPT^[5]、GAM^[16]以及预测模型^[17]等方法的适用性,提出使用这些方法的前提要有大量的环境和生物数据作为基础,且能够表征该地区河流的干扰梯度。此外,PCA、GAM 和预测模型法在计算大型底栖动物耐污值时准确性更强,因此这些方法在我国未来大型底栖动物耐污值研究中应予以重视。

参考文献 (References):

- [1] Bressler D W, Stribling J B, Paul M J, Hicks M B. Stressor tolerance values for benthic macroinvertebrates in Mississippi. *Hydrobiologia*, 2006, 573(1): 155-172.
- [2] Chutter F M. An empirical biotic index of the quality of water in South African streams and rivers. *Water Research*, 1972, 6(1): 19-30.
- [3] Winget R N, Mangum F A. Biotic condition index-integrated biological, physical, and chemical stream parameters for management; Ogden Utah. U. S. Forest Service, Intermountain Region, 1979: 50-50.
- [4] Hilsenhoff W L. An improved biotic index of organic stream pollution. *Great Lakes Entomologist*, 1987, 20(1): 31-39.
- [5] Lenat D R. A biotic index for the southeastern United States: derivation and list of tolerance values, with criteria for assigning water-quality rating. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12(3): 279-290.
- [6] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. Second Edition. Washington, D.C.: U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, EPA841-B-9-9002, 1999: B-1-B-50.
- [7] Hilsenhoff W L. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index. *Journal of the North American Benthological Society*, 1988, 7(1): 65-68.
- [8] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 唐振华, 赵凤霞. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价. *应用与环境生物学报*, 2003, 9

- (3): 279-284.
- [9] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. 生态学报, 2004, 24(12): 2768-2775.
- [10] 邢树威, 王俊才, 丁振军, 姜永伟. 辽宁省大型底栖无脊椎动物耐污值及水质评价. 环境保护科学, 2013, 39(3): 29-33.
- [11] Gao X, Niu C J, Chen Y S, Yin X W. Spatial heterogeneity of stream environmental conditions and macroinvertebrates community in an agriculture dominated watershed and management implications for a large river (the Liao River, China) basin. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 186(4): 2375-2391.
- [12] 黄玉瑶, 滕德兴, 赵忠宪. 应用大型无脊椎动物群落结构特征及其多样性指数监测蓟运河污染. 动物学集刊, 1982, 2: 133-144.
- [13] Washington H G. Diversity, biotic, similarity indices: A review with special relevance to aquatic ecosystems. Water Research, 1984, 18(6): 653-694.
- [14] Maxted J R, Barbour M T, Gerritsen J, Poretti V, Primrose N, Silvia A, Penrose D, Renfrow, R. Assessment framework for mid-Atlantic coastal plain streams using benthic macroinvertebrates. Journal of the North American Benthological Society, 2000, 19(1): 128-144.
- [15] Armitage P D, Cranston P S, Pinde L C V. The Chironomidae: Biology and Ecology of Non-Biting Midges. London: Chapman & Hall, 1995: 62-68.
- [16] U. S. Environmental Protection Agency. The evaluation of methods for creating defensible, repeatable, objective and accurate tolerance values for aquatic Taxa. U S Environmental Protection Agency Office of Research and Accurate Tolerance Values for Aquatic Taxa. Washington, DC: EPA, 2006: 1-50.
- [17] Hawkins C P, Norris R H, Hogue J N, Feminella J W. Development and evaluation of predictive models for measuring the biological integrity of streams. Ecological Applications, 2000, 10(5): 1456-1477.

附录 I 辽河流域大型底栖无脊椎动物分类单元耐污值与同一分类单元在中国东部地区、美国 5 个地区耐污值的比较(LR, 辽河; EC, 中国东部地区; NC, 北卡州; WI, 威斯康星州; OH, 俄亥俄州; DI, 爱达荷州; MACS, 大西洋海岸中部溪流工作组)

Appendix I Tolerance values of macroinvertebrate taxa in Liao River, and the value of the same taxon in the Eastern area of China and NC (North Carolina, Southeast, WI (Wisconsin, Upper Midwest), OH (Ohio, Midwest), ID (Idaho DEP, Northwest), and MACS (Mid-Atlantic Coastal Streams)

分类单元 Taxa	LR	EC	NC	WI	ID	OH	MACS
节肢动物门 Arthropoda							
昆虫纲 Insecta							
广翅目 Megaloptera							
齿蛉科 Corydalidae	2.1	3.8			0		
黄石蛉 <i>Protohermes grandis</i>	2.1						
星齿蛉属 <i>Protohermes</i> spp.	2.1	3.8					
泥蛉科 Sialidae	4.5 *	4					
泥蛉属 <i>Sialis</i> spp.	4.5 *						
蜻蜓目 Odonata							
蟌科 Coenagrionidae	7.4	9			9	6.1	9
蔚蓝细蟌 <i>Cercion sexlineatum</i>	7.5 *						
<i>Enallagma civile</i>	5 *						
春蜓科 Gomphidae	1.5	2.7			1		
施春蜓属 <i>Sieboldius</i> spp.	3.5 *						
小叶春蜓属 <i>Gomphidia</i> spp.	5.2						
新月戴春蜓 <i>Davidius lunatus</i>	2.2						
扩腹春蜓属 <i>Stylurus</i> spp.	1						
长唇春蜓 <i>Anisogomphus maacki</i>	0.7						
叶春蜓属 <i>Ictinogomphus</i> spp.	3.5 *						
蜻科 Libellulidae	9.4	8.5					
色蟌科 Claopterygidae	0.7	2.4					
日本色蟌 <i>Calopteryx japonica</i>	0.7						
扇蟌科 Platynymidae	4.5 *	9					
扇蟌属 <i>platycnemis</i> spp.	4.5 *						

续表

分类单元 Taxa	LR	EC	NC	WI	ID	OH	MACS
襀翅目 Plecoptera							
襀科 Perlidae	1.8	1.2			1		1
石蝇属 <i>Neoperla</i> spp.	2.1		1.6	1		3.1	
大山石蝇属 <i>Oyamia</i> spp.	1.3						
网襀科 Perlodidae	1.4	2					
石蝇属 <i>Isoptera</i> spp.	0						
<i>Megrcys ochracea</i>	1.9						
<i>Eccoptura</i> spp.	3.5 *						
绿襀科 Chloroperlidae	2	1			1		
苏瓦襀属 <i>Suwallia</i> spp.	2		0		1		
毛翅目 Trichoptera							
纹石蛾科 Hydropsychidae	5	3.7			4		4
短脉纹石蛾属 <i>Cheumatopsyche</i> spp.	4.5	3.8	6.5	5	5	2.9	5
东方侧枝纹石蛾 <i>Hydropsyche orientalis</i>	3.3						
缺尾高原纹石蛾 <i>Hydropsyche kozhantschikovi</i>	4.6						
纹石蛾 <i>Hydropsyche yaeyamensis</i>	3.1						
纹石蛾属 <i>Hydropsyche</i> spp.	4.3				4	4	
旋刺枝纹石蛾 <i>Hydropsyche nevae</i>	3.7						
<i>Arctopsyche</i> spp.	4				1		
角石蛾科 Stenopsychidae	1.7	4.7					
条纹角石蛾 <i>Stenopsyche marmorata</i>	1.7						
角石蛾属 <i>Stenopsyche</i> spp.	1.7	4.7					
原石蛾科 Rhyacophilidae	1.8	1			0		
原石蛾属 <i>Rhyacophila</i> spp.	1.8				0		
<i>Rhyacophila sibirica</i>	3 *				0		
黑头原石蛾 <i>Rhyacophila nigrocephala</i>	3						
<i>Rhyacophila kawamurae</i>	1.1						
<i>Rhyacophila nakagamwai</i>	4 *						
<i>Rhyacophila brevicephala</i>	0.8						
多距石蛾科 Polycentropodidae	2.5	1.9					
纽多距石蛾属 <i>Neureclipsis</i> spp.	2.5	2.8	4.4	7		2.7	7
碟石蛾科 Psychomyiidae	2.5	2					
碟石蛾属 <i>Psychomyia</i> spp.	2.5				2		
沼石蛾科 Limnephilidae	3.0 *	3					
<i>Hydatophylax festivus</i>	3.0 *						
姬石蛾科 Hydroptilidae	3.4	4			4		
姬石蛾属 <i>Hydroptila</i> spp.	3.5		6.2	6	6	3.2	6
野小石蛾属 <i>Agraylea</i> spp.	1.0 *				8	5.7	
舌石蛾科 Glossosomatidae	1.7	0			0		
舌石蛾属 <i>Glossosoma</i> spp.	1.3	0	1.5		0		
<i>Glossosoma altaicum</i>	1.9						
瘤石蛾科 Goeridae	1.6	0			1		
日本瘤石蛾 <i>Goera japonica</i>	1.6						
长角石蛾科 Leptoceridae	4.1	4	0.9	2	4		
姬长角石蛾 <i>Setodes turbatus</i>	3.6	2					
<i>Mystacides</i> spp.	5.3			4		4	
齿角石蛾科 Odontoceridae	2.2	0					

续表

分类单元 Taxa	LR	EC	NC	WI	ID	OH	MACS
<i>Psilotreta kisoensis</i>	2.2		0	0			0
径石蛾科 Ecnomidae	6.0 *	6					
径石蛾属 <i>Ecnonumus</i> spp.	6.0 *						
石蛾科 Phryganeidae	5.5 *	4					
<i>Hagenella</i> spp.	5.5 *						
等翅石蛾科 Philopotamidae	3.5 *	3			3		3
室石蛾属 <i>Dolophilodes</i> spp.	3.5 *		1		1		
蜉蝣目 Ephemeroptera							
四节蜉科 Baetidae	6.2	4.5			4		4
热水四节蜉 <i>Baetis thermicus</i>	6.2						
四节蜉属 <i>Baetis</i> spp.	6.2	2.5	3.1		5		6
西伯利亚小鲤蜉 <i>Acentrella sibirica</i>	3.4				4		4
小鲤蜉属 <i>Acentrella</i> spp.	3.8						
日本花翅蜉 <i>Baetiella japonica</i>	4.8	2.2					
假二翅蜉属 <i>Procloeon</i> spp.	6 *						
<i>Baetis bicaudatus</i>	2 *						
褶缘蜉科 Palingeniidae	5.5 *	4					
禽基蜉属 <i>Anagenesia</i> spp.	5.5 *						
扁蜉科 Heptageniidae	3.8	3.6			4		
宽叶高翔蜉 <i>Epeorus latifolium</i>	2.6	2.4					
高翔蜉 <i>Epeorus</i> spp.	2.5 *	2.4	1.2	0	0		
动蜉属 <i>Cinygma</i> spp.	4.4				4		
溪须蜉属 <i>Rhithorogena</i> spp.	3.2						
扁蚋蜉属 <i>Ecdyonurus</i> spp.	2.5						
桃碧扁蚋蜉 <i>Ecdyonurus tobiironis</i>	2.8						
绿扁蚋蜉 <i>Ecdyonurus viridis</i>	2.4						
<i>Ecdyonurus bajkovae</i>	0.9						
奇埠扁蚋蜉 <i>Ecdyonurus kibunensis</i>	1.2						
微动蜉属 <i>Cinygmula</i> spp.	7 *	3.3			4		
细裳蜉科 Leptophlebiidae	1.2	4			2		
菱胸宽基蜉 <i>Choroterpes altiocus</i>	0.4					4	
拟细裳蜉属 <i>Paraleptophlebia</i> spp.	2	2	1.2	1	1	2.8	1
日本拟细裳蜉 <i>Paraleptophlebia japonica</i>	1.7	2					
河花蜉科 Potamanthidae	1.3						
霍山河花蜉 <i>Potamanthus huoshanensis</i>	1.3	4	1.6	4			
蜉蝣科 Ephemeridae	2.8	2.4			4		
东方蜉 <i>Ephemera orientalis</i>	3.2						
条纹蜉 <i>Ephemera strigata</i>	2.3						
蜉蝣属 <i>Ephemera</i> spp.	2.8		2.1	1	3.1	1	4
小蜉科 Ephemerellidae	4.7	4.2			1		
红锯形蜉 <i>Serratella rufa</i>	3.8						
黑鬃锯型蜉 <i>Serratella setigera</i>	5.6						
锯形蜉属 <i>Serratella</i> spp.	4.6	4.3			2	0.6	2
刺弯握蜉 <i>Drunella trispina</i>	3.5 *						
基弯握蜉 <i>Drunella basalis</i>	1.3						
弯握蜉属 <i>Drunella</i> spp.	1.3	0.5			0		
三斑小蜉 <i>Ephemerella atagosana</i>	3.0 *	2			1	2.9	

续表

分类单元 Taxa	LR	EC	NC	WI	ID	OH	MACS
<i>Cincticostella orientalis</i>	0.8						
新蜉科 Neophemeridae	5.0 *	0					
中国小河蜉 <i>Potamanthellus chinensis</i>	5.0 *						
细蜉科 Caenidae	6.9	4.2(溪流) 7(河流)			7		
细蜉属 <i>Caenis</i> spp.	6.9	7	7.6	7	7	3.6	7
等蜉科 Isonychiidae	0.9	1.5					
日本等蜉 <i>Isonychia japonica</i>	0.9	1.5	3.8	2		1.9	2
鞘翅目 Coleoptera							
水龟虫科 Hydrophilidae	2.2	8			5		
<i>Hydrobius</i> spp.	2.2				5		
溪泥甲科 Elmidae	6.6	3.7			4		
溪泥甲属 <i>Ampumixis</i> spp.	7				4		
<i>Macronychus</i> spp.	5 *						
龙虱科 Dytiscidae	0.5 *	9			5		
<i>Neonectes natrix</i>	4 *						
<i>Copelatus</i> spp.	0 *		9.1				5
粒龙虱属 <i>Laccophilus</i> spp.	2 *		10		5	7.9	5
沼梭甲科 Haliplidae	6.7	8			7		
<i>Hemerodromia</i> spp.	6.7						
沼甲科 Scirtidae	1.7	5					
<i>Hydrocyphon</i> spp.	1.7						
扁泥甲科 Psephenidae	1.1	1.5			4		
<i>Eubrianax</i> spp.	1.1				4		
泥甲科 Dryopidae	5.0 *	9			5		
<i>Helichus</i> spp.	5.0 *		5.4	5		3.4	5
步甲科 Carabidae	7.6	9					
半翅目 Hemiptera							
负子蝽科 Belostomatidae	0.3						
印田鳖蝽 <i>Lethocerus indicus</i>	1 *						
<i>Blepharicera</i> spp.	1.5 *						
划蝽科 Corixidae	7.7		9		10		5
<i>Callicorixa vulnerata</i>	7.5	7.2					
划蝽属 <i>Callicorixa</i> spp.	7.7						
双翅目 Diptera							
摇蚊科 Chironomidae	7.4					6	
前突摇蚊属 <i>Procladius</i> spp.	4.7	9	9.3	9	9	6.5	9
长足摇蚊亚科 Tanypodiinae	4.2	5.9					
摇蚊亚科 Chironominae	7.2	5.7			6		
直突摇蚊亚科 Orthocladinae	6.9	4					
蠓科 Ceratopogonidae	2.8	6.2			6		
蠓属 <i>Bezzia</i> spp.	0.8				6		6
<i>Palpomyia pruinescens</i>	5						
<i>Palpomyia</i> spp.	5			6			
大蚊科 Tipulidae	4.8	1.5			3		
朝大蚊属 <i>Antocha</i> spp.	4.3	0.1	4.6	3	3	2.2	
<i>Antocha saxicola</i>	4 *	0.1					

续表

分类单元 Taxa	LR	EC	NC	WI	ID	OH	MACS
大蚊属 <i>Tipula</i> spp.	7.2	2.2					
<i>Prionocera</i> spp.	5 *				4		
花翅大蚊 <i>Hexatoma</i> spp.	2.3	2.1	4.7	2	2	2.3	2
<i>Ormosia</i> spp.	5.7		6.5		3		
蚋科 Simuliidae	2.7	3					
蚋属 <i>Simulium</i> spp.	2.4	2.4	4.4	4.8	6	6	
<i>Simulium yonagoense</i>	0						
日本蚋 <i>Simulium japonicum</i>	5.3						
<i>Simulium venustum</i>	2.8		7.4	5			6
原蚋属 <i>Prosimulium</i> spp.	6.5					3	
<i>Prosimulium daisetsense</i>	5.2						
虻科 Tabanidae	5.9	7			8		
山瘤虻 <i>Hybomitra montana</i>	5.9						
虻属 <i>Tabanus</i> spp.	5 *		9.7	5	5		5
长足虻科 Dolichopodidae	9	4	9.7	4		4	
猎舞虻属 <i>Rhamphomyia</i> spp.	8.9				6		
<i>Dolichopus</i> spp.	9.5						
长足虻属 <i>Hydrophorus</i> spp.	5						
<i>Rhyphium</i> spp.	9.1						
蛾蠓科 Psychodidae	2.6	10			10		
蛾蠓属 <i>Psychoda</i> spp.	2.6		9.9	10	3.7		
水蝇科 Ephydriidae	3 *	7			6		
<i>Discocerina</i> spp.	3 *						
<i>Scatella</i> spp.	2 *						
舞虻科 Empididae	5.3	6	8.1	6	6	3.5	
<i>Clinocera</i> spp.	5.6 *				6		
<i>Hemerodromia</i> spp.	6.7				6		
<i>Oreogeton</i> spp.	6.3 *				5		
<i>Ephydra</i> spp.	7 *						
伪鹬虻科 Athericidae	4.6	2					
伪鹬虻属 <i>Atherix</i> spp.	4.6						
水虻科 Stratiomyidae	2.4	6			8		
<i>Odontomyia</i> spp.	2.1						7
<i>Protoplasa fitchii</i>	5 *		5				
<i>Protoplasa</i> spp.	5 *				5		
细蚊科 Dixidae	9.8	3			1		1
细蚊属 <i>Dixella</i> spp.	9.8						
幽蚊科 Chaoboridae	9 *	6					
<i>Chaoborus americanus</i>	9 *	8.5					
<i>Chaoborus</i> spp.	9 *						
蚊科 Culicidae	6.9	6			8		
膜翅目 Hymenoptera							
潜水蜂科 Agriotypidae	5 *						
潜水蜂属 <i>Agriotypus</i> spp.	5 *						
弹尾目 Collembola							
长角(虫兆)科 Entomobryidae	9.7						
<i>Tomocerus</i> spp.	9.4 *						

续表

分类单元 Taxa	LR	EC	NC	WI	ID	OH	MACS
软体动物门 Mollusca							
甲壳纲 Crustacea							
端足目 Amphipoda							
钩虾科 Gammaridae	7.4						
钩虾属 <i>Gammarus</i> spp.	7.4	2.5		4			
十足目 Decapoda							
长臂虾科 Palaemonidae	6 *						
秀丽白虾 <i>Leander modestus</i>	6 *	2					
指虾科 Atyidae	4.5						
<i>Syncaris</i> spp.	4.5						
糠虾目 Mysidacea							
糠虾科 Mysidae	5 *						
刺糠虾 <i>Acanthomysis</i> spp.	5 *						
腹足纲 Gastropoda							
肺螺亚纲 Pulmonata							
基眼目 Basommatophora							
扁蜷螺科 Planorbidae	3.7	5			7		
凸旋螺 <i>Gyraulus convexiusculus</i>	4.3						
扁旋螺 <i>Gyraulus compressus</i>	5.3				8		
扁旋螺属 <i>Gyraulus</i> spp.	4.5						
半球多脉扁螺 <i>Polypylis hemisphaerula</i>	5.5						
大脐圆扁螺 <i>Hippentis umbilicalis</i>	5						
<i>Hippeutis</i> spp.	5						
中腹足目 Mesogastropoda							
黑螺科 Melaniidae	1	5					
<i>Assiminea lutea</i>	1						
椎实螺科 Lymnaeidae	6.2	8			6	6.9	6
<i>Radix</i> spp.	6.1						
椭圆萝卜螺 <i>Radix swinhoei</i>	6.8						
狭萝卜螺 <i>Radix lagotis</i>	5.2						
折叠萝卜螺 <i>Radix plicatula</i>	3						
大耳萝卜螺 <i>Radix auricularis</i>	3.7						
卵萝卜螺 <i>Radix ovate</i>	4.1						
耳萝卜螺 <i>Radix auricularia</i>	0						
前鳃亚纲 Prosobranchia							
中腹足目 Mesogastropoda							
觔螺科 Hydrobiidae	7.9	7				7	
赤豆螺 <i>Bithynia fuchsianus</i>	8.1						
<i>Stenothyra glabra</i>	4.5 *	4					
田螺科 Viviparidae	8.4	5			6		
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	9.8	6					
梨形环棱螺 <i>Bellamya urificata</i>	6.1	6					
环棱螺属 <i>Bellamya</i> spp.	6						
中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cahayensis</i>	1						
中国圆田螺 <i>Cipangopaludina chinensis</i>	4.6						
乌苏里圆田螺 <i>Cipangopaludina ussuriensis</i>	1						
圆田螺属 <i>Cipangopaludina</i> spp.	3.2						

续表

分类单元 Taxa	LR	EC	NC	WI	ID	OH	MACS
双壳纲 Bivalvia							
蚌目 Unionoida							
珠蚌科 Unionidae	5.2	5			8		
圆顶珠蚌 <i>Unio douglasiae</i>	1.6						
<i>Anodonta euscaphys</i>	5 *						
真瓣鳃目 Eulamellibranchia							
球蚬科 Sphaeriidae	7 *	8			8	8	
湖球蚬 <i>Sphaerium lacustre</i>	7 *						
环节动物门 Annelida							
寡毛纲 Oligochaeta							
颤蚓目 Tubificida							
颤蚓科 Tubificidae	9.2	10					
苏式尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	9.9	8.5	8.4				
水丝蚓属 <i>Limnodrilus</i> spp.	8.6		9.6				
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeister</i>	8.5	9.4	9.8				
克拉伯水丝蚓 <i>Limnodrilus claparedianus</i>	9.9	9.6					
中华颤蚓 <i>Tubifex sinicus</i>	5	5.9					
带丝蚓科 Lumbriculidae	10	8					
<i>Lumbricu. variegatum</i>	8.6	9.6					
正蚓科 Lumbricidae	8 *						10
<i>Bimastus Parvus</i>	8 *						
蛭纲 Hirudinea							
石蛭科 Erpobdellidae	8.6	6					
<i>Nephelopsis</i> spp.	8.6						
八目石蛭 <i>Herpobdella octoculata</i>	7.8						
蛭目 Gnathobdellida							
黄蛭科 Haemopidae	5.7	6					
秀丽黄蛭 <i>Haemopsis gracilis</i>	5.5 *						
宽体金线蛭 <i>Whitmania pigra</i>	6.1						
吻蛭目 Rhynchobdellida							
扁蛭科 Glossiphoniidae	5.9	10			8		
<i>Placobdella</i> spp.	6.7				6		
喀什米亚拟扁蛭 <i>Hemiclepsis kasmiana</i>	6 *						
仄扁舌蛭 <i>Glossiphonia complanata</i>	5.5 *						
平扁舌蛭 <i>Glossiphonia lata</i>	6 *						
舌蛭属 <i>Glossiphonia</i> spp.	1.5						
扁形动物门 Platyhelminthes							
蛛形纲 Arachnida							
Argyronetidae	2.6						
水蜘蛛 <i>Argyroneta aquatica</i>	2.6						
涡虫纲 Turbellaria							
直涡虫科 Planariidae	2.6	4			1		
淡水三角涡虫 <i>Dugesia</i> spp.	2.6				4		

* : 专家经验法核定的耐污值; 附表 I 中大型底栖动物科级分类单元耐污值是基于隶属于该科的已鉴定物种(属级)计算得到