陈佳勃, 赵瑞辰, 王艳杰, 等. 基于大型底栖动物群落生物指数的清河水环境模糊综合评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2837-2845.
CHEN Jia-bo, ZHAO Rui-chen, WANG Yan-jie, et al. Fuzzy comprehensive evaluation based on macroinvertebrate biological indices for water quality monitoring in the Qing River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2837-2845.

# 基于大型底栖动物群落生物指数的清河水环境模糊综合评价

陈佳勃[1], 赵瑞辰[2], 王艳杰[1*], 李法云[1,3]

(1.辽宁石油化工大学生态环境研究院, 辽宁 抚顺 113001; 2.辽宁石油化工大学化学化工与环境学部, 辽宁 抚顺 113001; 3.湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

**摘　要:** 为评价不同水期清河流域水环境状态,采用模糊综合评价法以大型底栖动物Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数、FBI(Family Biotic Index)指数和敏感性指数6个生物指数为评价因子进行水体等级隶属度计算,综合比较得到枯水期和丰水期各点位的水体状态等级。清河流域大型底栖动物群落结构组成及生物指数在枯水期和丰水期之间发生变化,整体表现为丰水期生物物种丰度、多样性、丰富度及敏感性指数大于枯水期,清河及主要支流上游生物多样性及敏感性类群比例较大,下游、乡镇及城区附近的生物类群多样性降低,耐污值高的生物比例增加。模糊综合评价结果表明,枯水期和丰水期水体呈清洁、轻度污染、中度污染的样点比例分别为12.5%、12.5%、75%和18.75%、43.75%、37.5%,清河流域干流及支流上游点位多为清洁和轻度污染,下游点位多呈中度污染状态。

**关键词:** 大型底栖动物;生物指数;水质;模糊综合评价

**中图分类号:** X820.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2018)12-2837-09　　doi:10.11654/jaes.2018-1159

## Fuzzy comprehensive evaluation based on macroinvertebrate biological indices for water quality monitoring in the Qing River basin

CHEN Jia-bo[1], ZHAO Rui-chen[2], WANG Yan-jie[1*], LI Fa-yun[1,3]

(1.Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China; 2.College of Chemistry, Chemical Engineering and Environmental Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China; 3.School of Resources and Environmental Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Macroinvertebrates, the main aquatic organisms in riverine environments, can reflect changes in river water quality. This study used a fuzzy comprehensive evaluation method based on macroinvertebrate indices to evaluate the quality of the water in the Qing River basin during different water periods. Macroinvertebrate species abundance, density, and related indices were first calculated and analyzed. Then the Shannon-Wiener diversity index, Margalef richness index, Simpson diversity index, Pielou evenness index, family biotic index (FBI), and sensitivity index for macroinvertebrates were used as evaluation factors to establish fuzzy and weight matrices and the water grades were calculated. By comparing these grades, the water level of each point in the dry and wet seasons was obtained. The macroinvertebrate community structure and biological indices in Qing River basin changed between dry and wet seasons at different sites. Overall, the abundance, diversity, richness, and sensitivity indices were higher in the wet season than in the dry season. The upper reaches of Qing Riv-

**收稿日期:** 2018-09-10　　**录用日期:** 2018-10-23

**作者简介:** 陈佳勃(1980—),男,辽宁沈阳人,博士,主要从事环境风险评估方面的研究。E-mail:chenjiabo@126.com

***通信作者:** 王艳杰　E-mail:yanjie_wang0810@hotmail.com

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41501551);辽宁石油化工大学科学基金项目(00100850)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China(41501551); The Research Fund for Scientific Talent of LSHU(00100850)

er and its main tributaries were more biodiverse and sensitive to change than the lower reaches. Biodiversity decreased downstream, near townships and urban areas, and the proportion of benthic macroinvertebrates with a high tolerance for pollution increased. The results of the fuzzy comprehensive evaluation showed that the proportion of clean, slightly polluted, and moderately polluted samples from the dry and wet seasons was 12.5%, 12.5%, 75% and 18.75%, 43.75%, 37.5%, respectively. The number of moderately polluted sites decreased and the number of clean and slightly polluted sites increased, during the wet season. Most of the upper reaches of the main stream and its tributaries were clean or slightly polluted while the lower reaches were mostly moderately polluted.

**Keywords**: macroinvertebrates; biological indices; water quality; fuzzy comprehensive evaluation

人类活动对河流生态系统的影响越来越大,因此能够通过适宜的监测和评估方法对河流质量进行评价是非常重要的,有利于在了解河流状态的基础上对河流进行保护和管理[1]。大型底栖动物在河流生态系统功能中起着关键作用,是能量流动和物质循环过程中的主要环节之一,也是欧洲水框架指令中评估河流生态状况的重要水生生物类群之一[2]。大型底栖动物主要生活在河流底质中,具有移动能力差、生活范围广及生活史相对较长等特点,与水质理化指标相比,能够更持续地反映长时间段的河流水质理化特征及物理生境的变化,因此,利用大型底栖动物进行河流水环境评价,可以降低水质理化指标的监测频次,同时达到综合体现一个时期河流水环境状况的目的[3-4]。

河流水质生物评价通常以研究区域的生物群落特征为基础,通过生物指数的计算与等级划分来评价河流水质状态[5-8],基于大型底栖动物的生物评价指数主要包括Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数、FBI(Family biotic index)指数、BPI(Biotic pollution index)生物学污染指数、Goodnight-Whitley修正指数和敏感性指数等[9-11]。通常根据研究区域类型选择几种代表性生物指数进行水质生物评价,一般要包含体现大型底栖动物群落结构特征、多样性以及物种耐污程度的生物指数[12-13]。由于不同指数的量纲以及考虑的侧重点不同,通常在评价结果上存在差异,为了改善这种情况,可以采用一些处理或分析方法,将不同指数综合分析,进行水质生物评价。模糊综合评价法以选定的参数作为评价因子,根据分级标准通过模糊矩阵建立、评价因子权重和归一化处理、矩阵运算得到不同等级的隶属度,再根据最大隶属度原则得到模糊综合评价结果[14]。池仕运等[15]运用综合生物指数法和模糊综合评价法对沙颍河进行水质生物学评价,通过对比分析,模糊综合评价法的评价结果更为合理。本研究中,根据清河流域的特点,从大型底栖动物群落结构组成、多样性、耐污性3个方面选择6个生物指数(Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数、FBI指数和敏感性指数)作为评价因子,运用模糊综合评价法对清河流域枯水期和丰水期的水环境状况进行生物评价,将模糊综合评价法与河流水质生物评价相结合,以符合流域特征的大型底栖动物生物指数为基础,进行综合量化计算与分析,计算过程与数据结果更加客观,既能直观地反映河流水质状况,又可避免单一生物指数评价中因侧重点不同对评价结果产生的影响,从而为流域水生态保护和管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域清河位于辽宁省东北部,是辽河的一级支流,流域面积5 674.28 km$^2$,河流长度217 km。清河流域属温带季风气候,最大平均降水量和河流流量在8月,旱季从11月一直持续到3月(秋冬季节),区域内年均降雨量692 mm,年均气温6.5 ℃。清河流域地势以丘陵和山地为主,植被覆盖度相对较高,区域内有两个水库,清河水库和南城子水库,河流包括清河及主要支流寇河、碾盘河、马仲河等,除森林植被外,还包含农业用地。本研究在清河流域布设16个采样点(图1),在2011年5月(枯水期)和8月(丰水期)进行大型底栖动物调查。

### 1.2 大型底栖动物样品采集

在清河的16个采样点分别使用索伯网(40 cm×40 cm,425 μm)采集大型底栖动物样品,综合考虑河流底质类型、底质粒径、河流流速、水深等主要因素,每个采样点选择3个典型的微生境进行样品采集,将索伯网置于选好的位置,下边框固定在河流水底,挑选索伯网下边框内的石块置于桶内并洗净,然后搅动边框内底质,使大型底栖动物顺流进入索伯网中,然后将网内的生物清洗到采样桶内,过40目筛,加70%的乙醇溶液保存在500 mL塑料瓶中。将采集的样品进行分

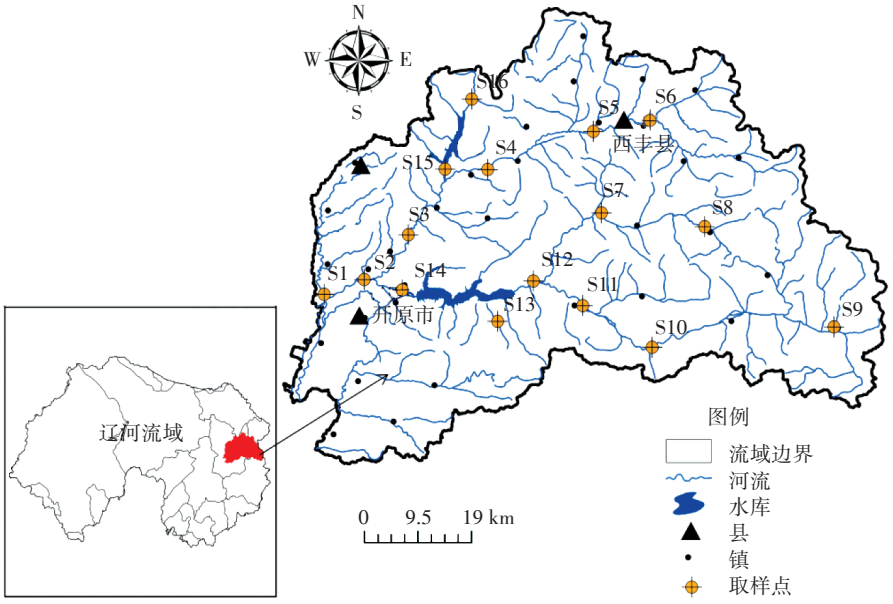


**图1 清河流域采样点分布图**

Figure 1 Sampling sites in Qing River basin

拣,参考相关资料在解剖镜和显微镜下鉴定[16-17]。

### 1.3 数据处理

将大型底栖动物基础数据进行整理和计算,得到清河流域各采样点的大型底栖动物物种丰度、生物密度以及6个生物指数。

Shannon-Wiener多样性指数($H'$):

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i$$

式中:$S$为物种丰度;$P_i$为第$i$种个体数占样品总个体数$N$的比例。

Margalef丰富度指数($dm$):

$$dm=(S-1)/\ln N$$

Simpson多样性指数($d$):

$$d = \frac{N(N-1)}{\sum_{i=1}^{s} Ni(Ni-1)}$$

Pielou均匀度指数($J$):

$$J = H'/\ln S$$

FBI指数:

$$\mathrm{FBI} = \sum_{i=1}^{F} n_i t_i / N$$

式中:$n_i$为第$i$科的个体数;$t_i$为第$i$科的耐污值[18]。

敏感性指数($I$):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^{N_I} n_i}{N} \times 100\%$$

式中:$n_i$为第$i$种的个体数;$N_I$为敏感性种类的种数,耐污值≤3[19]。

采用Mann-Whitney U检验法对不同水期的大型底栖动物生物指数进行差异性检验。运用模糊综合评价法对水质污染状态进行评价,以大型底栖动物生物指数为评价因子建立因子集合评价集,再确立单因素隶属函数,构建模糊矩阵R和评价因子权重矩阵A,经过矩阵运算得到模糊综合评价矩阵B(B=A×R),并根据最大隶属度原则确定水质污染状态。大型底栖动物群落特征和生物指数分析、Mann-Whitney U检验和矩阵计算在Origin、SPSS和Excel中完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 清河大型底栖动物群落结构特征

清河流域共采集到大型底栖动物57类,隶属于3门4纲32科,枯水期共采集大型底栖动物40种,丰水期50种。所采集的大型底栖动物中水生昆虫比例较大,占底栖动物总数84.2%,丰水期水生昆虫比例比枯水期高4.15%。丰水期蜉蝣目和毛翅目的生物种类及所占百分比增加,双翅目比例相对降低。枯水期优势生物类群主要为双翅目摇蚊科(Chironomidae),丰水期优势类群发生变化,蜉蝣目的四节蜉科(Baetidae)、扁蜉科(Heptageniidae)、二尾蜉科(Siphluridae)和毛翅目的纹石蛾科(Hydropsychidae)、沼石蛾科(Limnephilidae)百分比增大,摇蚊科(Chironomidae)

的优势度降低。

大型底栖动物物种丰度是指一个群落或生境中采样面积内的生物物种数，是衡量生物群落整体特征的主要参数，物种丰度的变化能够反映环境条件的影响。生物密度指单位面积内的大型底栖动物个体总数，单位为个·$m^{-2}$。清河流域不同采样点位枯水期和丰水期大型底栖动物物种丰度及生物密度变化见图2和图3。枯水期大型底栖动物物种丰度最高值和最低值分别为24和6，出现在S15和S14点位，枯水期各点位物种丰度均值为13。丰水期物种丰度最高值和最低值分别为35和7，出现在S9和S5点位，枯水期各点位物种丰度均值为17。枯水期和丰水期大型底栖动物物种丰度无显著性差异（$Z$=−1.551，$P$=0.121）。除S1、S3和S5外，其他各点位丰水期物种丰度均大于枯水期。枯水期大型底栖动物生物密度最高值和最低值分别为1402个·$m^{-2}$和58个·$m^{-2}$，枯水期各点位间生物密度差异较大。丰水期大型底栖动物生物密度最高值和最低值分别为928个·$m^{-2}$和229个·$m^{-2}$，与枯水期相比，丰水期各点位间生物密度差异变小。枯水期和丰水期大型底栖动物生物密度均值分别为518个·$m^{-2}$和494个·$m^{-2}$，两水期无显著性差异（$Z$=−0.452，$P$=0.651）。

### 2.2 不同水期清河流域大型底栖动物多样性变化

通过计算清河流域枯水期和丰水期的6个生物指数，分析研究区域不同水期的大型底栖动物变化特征见图4。枯水期大型底栖动物Shannon−Wiener多样性指数平均值为1.81±0.40，最大值与最小值相差1.21。丰水期大型底栖动物Shannon−Wiener多样性指数平均值为2.23±0.24，最大值与最小值相差1.01。枯水期和丰水期大型底栖动物Shannon−Wiener多样性呈显著性差异（$Z$=−2.809，$P$=0.005），其中枯水期不同点位的大型底栖动物Shannon−Wiener多样性差异相对较大。枯水期和丰水期大型底栖动物Margalef丰富度指数平均值分别为2.14±0.52和2.79±0.77，丰水期各点位丰富度最大值与最小值相差较大，差值为2.55，枯水期差值为1.90，两水期之间大型底栖动物Margalef丰富度差异显著（$Z$=−2.356，$P$=0.018）。枯水期大型底栖动物Simpson多样性指数平均值为3.54±1.30，低于丰水期的Simpson多样性（3.67±1.21），枯水期和丰水期Simpson多样性最大值与最小值差值相

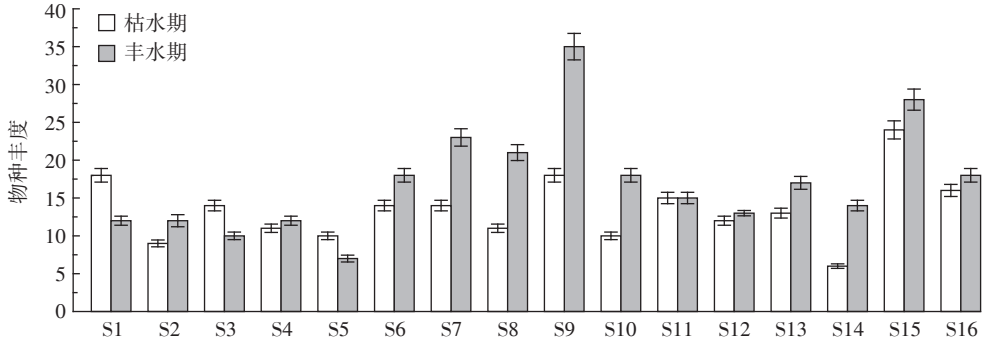


**图2 清河流域枯水期与丰水期大型底栖动物物种丰度**

Figure 2 Species abundance of macroinvertebrates in dry and wet season of Qing River basin

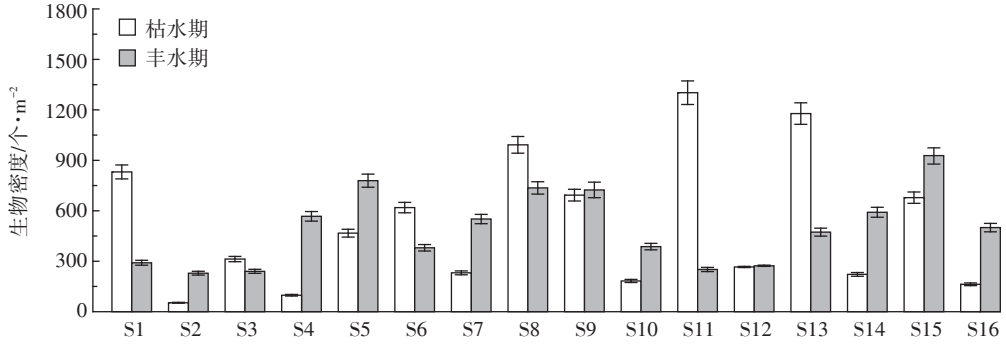


**图3 清河流域枯水期与丰水期大型底栖动物生物密度**

Figure 3 Macroinvertebrates density in dry and wet season of Qing River basin

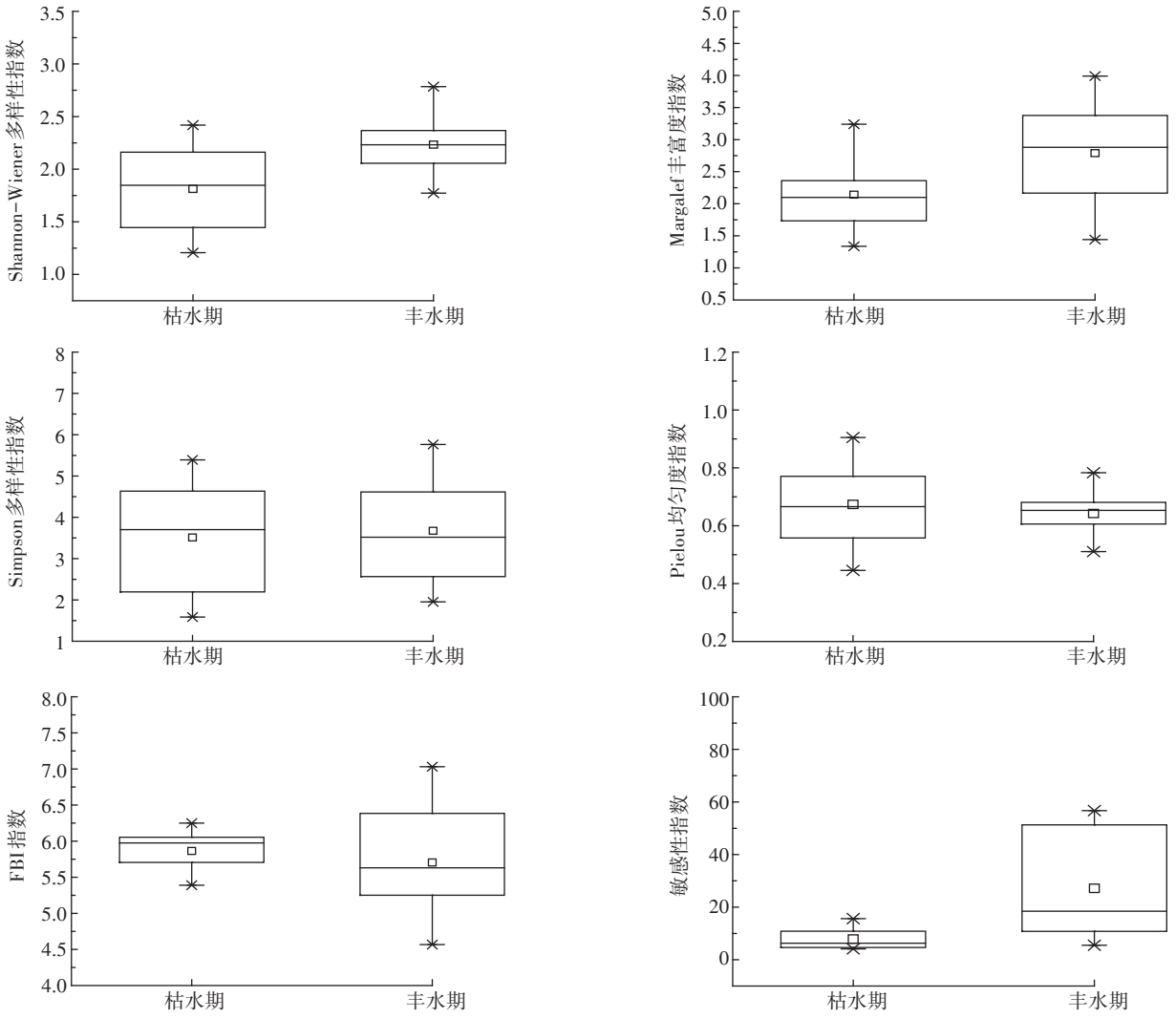


**图4 清河流域大型底栖动物生物指数特征**

Figure 4 Characteristics of macroinvertebrate community indices in Qing River basin

差较小,分别为3.80和3.81,两水期之间Simpson多样性无显著性差异($Z$=−0.547,$P$=0.585)。枯水期和丰水期大型底栖动物Pielou均匀度指数平均值相差较小,分别为0.67±0.14和0.64±0.07,枯水期最大值与最小值相差0.46,丰水期相差0.27。两水期大型底栖动物Pielou均匀度差异不显著($Z$=−0.604,$P$=0.546)。大型底栖动物FBI指数均值表现为枯水期(5.86±0.34)大于丰水期(5.70±0.74),枯水期和丰水期最大、最小FBI差值分别为1.30和2.46。两水期FBI指数差异不显著($Z$=−0.999,$P$=0.318)。枯水期大型底栖动物敏感性指数平均值为7.87±3.98,最大值与最小值相差11.50,丰水期敏感性指数平均值(27.16±19.60)和最大值与最小值差值(51.21)明显大于枯水期,两水期呈显著性差异($Z$=−3.58,$P$=0.001)。

## 2.3 清河流域模糊数学综合评价

大型底栖动物Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数、Simpson多样性指数、Pielou均匀度指数、FBI指数、敏感性指数6个生物指数的评价等级分为4级(表1)。根据各评价因子分级标准和实际

**表1 大型底栖动物生物指数评价标准**

Table 1 Grading standards of benthic macroinvertebrates indices

| 生物指数 | 清洁 | 轻度污染 | 中度污染 | 重度污染 |
|---|---|---|---|---|
| Shannon-Wiener多样性指数[21-22] | ≥3 | 2 | 1 | 0 |
| Margalef丰富度指数[23-24] | ≥2.5 | 2 | 1 | 0 |
| Simpson多样性指数[25-26] | ≥6 | 3 | 2 | 0 |
| Pielou均匀度指数[27-28] | ≥0.8 | 0.5 | 0.3 | 0 |
| FBI指数[18,29] | ≤5 | 6.5 | 7.25 | 10 |
| 敏感性指数[30] | ≥60 | 40 | 10 | 0 |

值，得出其在不同等级的隶属度，组成模糊矩阵R，再通过超标加权法计算各指标的权重，经过归一化处理得到权重矩阵A，将R和A进行运算得到综合评价结果[20]。

通过对枯水期6个生物指数评价因子的模糊矩阵建立以及权重矩阵的运算，得到了各点位在清洁、轻度污染、中度污染和重度污染4个水质等级的隶属度，经过隶属度比较得到模糊综合评价结果（表2）。枯水期水体呈清洁状态的点位为S9和S15，所占比例为12.5%，其中S9位于清河上游源头附近，河流生境、水质条件优越，卵石底质，为敏感性和耐污值低的大型底栖动物类群生存提供了适宜条件，S15位于清河二级支流叶赫河的南城子水库下游，该点位植被覆盖度较高，河岸缓冲带距离大，人类活动影响小，有利于大型底栖动物生存，物种多样性及丰富度相对较高，敏感性生物类群比例较大，经过矩阵建立与隶属度计算，该点位在清洁等级的隶属度较大。水体呈轻度污染状态的点位为S6和S8，占所有采样点的12.5%，分别位于清河支流寇河和碾盘河，两个点位均位于人居区上游，水质及生境状况较好，大型底栖动物群落多样性较高，相对于清洁点，敏感性指数分别降低3.73%和1.42%。枯水期呈中度污染状态的采样点位有12个，占总体样点的75%，枯水期时河流水量较小，部分村落和农田附近存在生活垃圾、畜禽粪便散落和堆放的现象，对河流水质影响较大，耐污值较低的生物类群比例降低或消失。枯水期S1~S5、S7、S10~S14和S16点位处于中度污染状态，其中S1、S2~S5和S14位于昌图县、西丰县和开原市附近，来自城市及周边区域的废水、生活垃圾及污水等对河流水质影响较大。S7、S10~S13和S16周边以农业为主，枯水期河流水量较小，河岸带植被刚开始生长，不能起到缓冲和拦截作用，散落在河道附近的生活垃圾、畜禽粪便及农业耕种前的堆肥等物质进入河流中[31]，影响水质，对大型底栖动物敏感类群影响较大，导致枯水期敏感性指数较低，这也成为制约模糊综合评价结果的重要因子。一段时间内河流水环境条件的变化影响大型底栖动物的群落特征，同时也能够通过生物的变化来反映阶段性水环境状况，实现水质生物学评价[32-34]。

清河流域丰水期的水体污染状态（表3）与枯水期相比变化较大，其中清洁状态点位有3个，除S9和S15点位外，又增加了S6，占总体样点的比例提高到18.75%，清洁点主要位于清河及支流寇河上游和南城子水库附近，采样点的生境条件较好，河流底质以卵石为主，河岸带植被丰富，河流中具备一定的水生植物和河岸带植被的枯落物，有利于大型底栖动物觅食，河水流速和深度适中，使得水中溶解氧含量丰富，为大型底栖动物，尤其是耐污值较低、敏感型生物种

**表2 枯水期不同点位水体污染状态的隶属度和模糊综合评价**
Table 2 Membership degrees and fuzzy comprehensive evaluation of water pollution at different sites in dry season

| 采样点 | 清洁 | 轻度污染 | 中度污染 | 重度污染 | 模糊综合评价结果 |
|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 0.169 0 | 0.224 2 | 0.327 8 | 0.279 2 | 中度污染 |
| S2 | 0.215 4 | 0.177 4 | 0.369 8 | 0.237 5 | 中度污染 |
| S3 | 0.246 4 | 0.316 1 | 0.437 5 | 0 | 中度污染 |
| S4 | 0.121 9 | 0.338 8 | 0.400 9 | 0.138 3 | 中度污染 |
| S5 | 0.051 0 | 1.055 0 | 0.454 6 | 0.354 3 | 中度污染 |
| S6 | 0.138 2 | 0.472 3 | 0.389 5 | 0 | 轻度污染 |
| S7 | 0.038 9 | 0.222 5 | 0.510 2 | 0.228 4 | 中度污染 |
| S8 | 0.171 0 | 0.468 9 | 0.360 2 | 0 | 轻度污染 |
| S9 | 0.356 3 | 0.315 0 | 0.328 8 | 0 | 清洁 |
| S10 | 0.030 7 | 0.308 2 | 0.361 3 | 0.299 8 | 中度污染 |
| S11 | 0.030 9 | 0.214 8 | 0.569 4 | 0.184 9 | 中度污染 |
| S12 | 0.076 4 | 0.151 8 | 0.424 1 | 0.347 8 | 中度污染 |
| S13 | 0.028 1 | 0.222 4 | 0.424 8 | 0.324 8 | 中度污染 |
| S14 | 0.087 7 | 0.225 5 | 0.344 0 | 0.342 8 | 中度污染 |
| S15 | 0.441 7 | 0.249 2 | 0.309 3 | 0 | 清洁 |
| S16 | 0.245 8 | 0.212 6 | 0.395 4 | 0.146 3 | 中度污染 |

**表3 丰水期不同点位水体污染状态的隶属度和模糊综合评价**
Table 3 Membership degrees and fuzzy comprehensive evaluation of water pollution at different sites in wet season

| 采样点 | 清洁 | 轻度污染 | 中度污染 | 重度污染 | 模糊综合评价结果 |
|---|---|---|---|---|---|
| S1 | 0.196 5 | 0.195 0 | 0.546 3 | 0.062 3 | 中度污染 |
| S2 | 0.246 7 | 0.305 0 | 0.448 4 | 0 | 中度污染 |
| S3 | 0.125 4 | 0.416 7 | 0.426 5 | 0.031 5 | 中度污染 |
| S4 | 0.311 7 | 0.302 3 | 0.386 6 | 0 | 中度污染 |
| S5 | 0.055 4 | 0.312 9 | 0.381 7 | 0.250 3 | 中度污染 |
| S6 | 0.583 9 | 0.448 7 | 0 | 0 | 清洁 |
| S7 | 0.332 2 | 0.405 9 | 0.262 0 | 0 | 轻度污染 |
| S8 | 0.315 5 | 0.495 2 | 0.189 4 | 0 | 轻度污染 |
| S9 | 0.889 6 | 0.113 3 | 0 | 0 | 清洁 |
| S10 | 0.471 2 | 0.478 0 | 0.050 8 | 0 | 轻度污染 |
| S11 | 0.247 9 | 0.418 7 | 0.333 8 | 0 | 轻度污染 |
| S12 | 0.244 0 | 0.410 2 | 0.337 2 | 0.008 7 | 轻度污染 |
| S13 | 0.415 8 | 0.511 0 | 0.073 4 | 0 | 轻度污染 |
| S14 | 0.161 1 | 0.417 7 | 0.421 2 | 0 | 中度污染 |
| S15 | 0.589 2 | 0.410 9 | 0 | 0 | 清洁 |
| S16 | 0.233 8 | 0.503 3 | 0.263 0 | 0 | 轻度污染 |

类的生存提供适宜条件[35]。丰水期轻度污染状态的点位增幅较大,由枯水期的2个点位增加到7个点位,所占比例也达到43.75%。轻度污染样点主要位于清河支流上游和清河水库的入库河流,丰水期河流水量增大,使得河水覆盖部分的底质比例增加,为大型底栖动物提供了更多的生存空间[35],同时,丰水期水生植物及河岸带周围植物生长更加茂盛,有利于增加大型底栖动物的种类和数量。与枯水期相比,丰水期中度污染点位所占百分比下降37.5%,其中S7、S10~S13和S16由枯水期的中度污染变成轻度污染状态,这些点主要位于清河干流和支流中上游,丰水期河流水量增大,河岸带植被及水生植物长势良好,能够有效拦截和净化进入河流的污染物,对河流水质起到保护作用。S1~S5、S14位于清河支流马仲河、寇河和清河水库下游,枯水期和丰水期都呈中度污染状态,其中S1在马仲河下游,有来自于昌图县及附近村镇的废水,S5点在西丰县下游,河流水质受到污水和废弃物的影响,S2~S4在寇河S5的下游,其生境条件受到挖沙和乡镇生活污水影响较大,S14在水库下游,距离开原市较近,河道的生境适宜性降低,进而也影响大型底栖动物物种组成,使FBI指数增大和敏感性指数降低,在模糊综合评价中权重和隶属度较大,水质呈中度污染状态。水环境受到人类活动的直接或间接影响[36]。城乡生活污水排放、垃圾的无序堆放、畜禽养殖、农药及化肥的施用、挖沙等对河流水环境造成一定影响,使水中污染物、氮、磷等增加,挖沙会导致水体浑浊,影响具鳃生物的呼吸[37-38]。采用模糊综合评价法对水体污染或健康状态进行评价,将多个水质指标、生物指标或水生态健康评价指标进行转化和计算,最终得到综合性的隶属度值,评价结果更客观全面,能够有效克服单因子评价和主观分析方法的不足[15,39-40]。伍名群[39]采用熵权法赋权对清水江流域水质进行模糊综合评价,充分考虑了多样本间的联系并削弱异常值的影响,评价结果更合理。池仕运等[15]采用综合生物指数法和模糊综合评价法以大型底栖动物生物指数为基础对沙颍河干流进行水质生物学评价,通过对比分析发现,模糊综合评价法强化了指标实测值与水质污染程度隶属度的函数量化关系,使评价结果更符合实际情况。

## 3 结论

(1)清河流域丰水期大型底栖动物物种丰度均值高于枯水期,生物密度为枯水期大于丰水期,两水期之间物种丰度和生物密度无显著性差异,优势生物种类不同。

(2)大型底栖动物Shannon-Wiener多样性、Margalef丰富度和敏感性指数在枯水期和丰水期之间变化较大,差异显著。清河及主要支流上游生物多样性较高且敏感性类群比例较大,下游、乡镇及城区附近的生物类群多样性降低,耐污值高的生物比例增加。

(3)模糊综合评价结果表明,清河枯水期水体呈清洁、轻度污染和中度污染的样点比例分别为12.5%、12.5%和75%。丰水期水体呈清洁(18.75%)和轻度污染(43.75%)状态的样点增加,中度污染(37.5%)状态的比例降低。清河干流及支流上游点位水环境状况相对较好,明显优于城区、乡镇等人居区及下游区域。

**参考文献:**


[1] Maloney K O, Feminella J W. Evaluation of single- and multi-metric benthic macroinvertebrate indicators of catchment disturbance over time at the Fort Benning Military Installation, Georgia, USA[J]. *Ecological Indicators*, 2006, 6(3):469-484.

[2] European Commission. Directive of the European Parliament and of the Council 2000/60/EC establishing a framework for community action in the field of water policy[R]. Brussels: European Commission, 2000.

[3] Gabriels W, Lock K, Pauw N D, et al. Multimetric Macroinvertebrate Index Flanders(MMIF) for biological assessment of rivers and lakes in Flanders(Belgium)[J]. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, 40(3):199-207.

[4] 殷旭旺, 徐宗学, 高 欣, 等. 渭河流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 30(1):40-44.
YIN Xu-wang, XU Zong-xue, GAO Xin, et al. Macrobenthos community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin, northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 30(1):40-44.

[5] Suriano M T, Fonseca-Gessner A A, Roque F O, et al. Choice of macroinvertebrate metrics to evaluate stream conditions in Atlantic Forest, Brazil[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2011, 175(1/2/3/4):87-101.

[6] Chessman B C. Rapid assessment of rivers using macroinvertebrates:A procedure based on habitat-specific sampling, family level identification and a biotic index[J]. *Austral Ecology*, 2010, 20(1):122-129.

[7] Sandin L, Hering D. Comparing macroinvertebrate indices to detect organic pollution across Europe:A contribution to the EC Water Framework Directive intercalibration[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 516(1/2/3):55-68.

[8] 吴东浩, 王备新, 张 咏, 等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2):129-134.
WU Dong-hao, WANG Bei-xin, ZHANG Yong, et al. Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macro-

invertebrate and its perspective in China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2011, 34(2):129-134

[9] Varandas S G, Cortes R M. Evaluating macroinvertebrate biological metrics for ecological assessment of streams in northern Portugal[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2010, 166(1/2/3/4):201-221.

[10] Silva D R O, Herlihy A T, Hughes R M, et al. An improved macroinvertebrate multimetric index for the assessment of wadeable streams in the neotropical savanna[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81:514-525.

[11] 陈 浒, 林 陶, 秦樊鑫. 乌江流域大型底栖动物群落结构及其水质生物评价[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(6):5-11.
CHEN Hu, LIN Tao, QIN Fan-xin. Macroinvertebrate community structure and biological assessment to the water quality of Wujiang River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(6):5-11.

[12] Uttaruk P, Voharndee P, Jusanit P, et al. Development of biotic index based on rapid bioassessment approaches using benthic macroinvertebrates for Chi and Mun headwater streams, northeast Thailand[J]. *Advances in Environmental Sciences*, 2011, 3(1):29-43.

[13] Ntislidou C, Lazaridou M, Tsiaoussi V, et al. A new multimetric macroinvertebrate index for the ecological assessment of Mediterranean lakes[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93:1020-1033.

[14] 潘 峰, 付 强, 梁 川. 模糊综合评价在水环境质量综合评价中的应用研究[J]. 环境工程, 2002, 20(2):58-60.
PAN Feng, FU Qiang, LIANG Chuan. Applying fuzzy synthesize judgement in the study of water environment quality evaluation[J]. *Environmental Engineering*, 2002, 20(2): 58-60.

[15] 池仕运, 舒卫先, 胡菊香, 等. 基于大型底栖动物的沙颍河干流水质生物学评价——两种方法体系的比较分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(增刊1):78-84.
CHI Shi-yun, SHU Wei-xian, HU Ju-xiang, et al. Bio-assessment of water quality based on macroinvertebrates in the mainstream of Shaying River: Comparision of two methodologies[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(Suppl 1):78-84.

[16] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1994.

[17] 大连水产学院. 淡水生物学上册, 分类学部分[M]. 北京:农业出版社, 1982.
Dalian Fisheries University. Freshwater biology (The first volume: Taxology)[M]. Beijing: Agriculture Press, 1982.

[18] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价[M]. 北京:清华大学出版社, 2010.
DUAN Xue-hua, WANG Zhao-yin, XU Meng-zhen. Benthic macroinvertebrate and application in the assessment of stream ecology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

[19] 仇伟光, 王俊才, 张 峥, 等. 辽河流域底栖动物监测图鉴[M]. 北京:中国环境出版社, 2014.
QIU Wei-guang, WANG Jun-cai, ZHANG Zheng, et al. Liaohe River basin monitoring of benthic animal[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.

[20] 万金保, 李媛媛. 模糊综合评价法在鄱阳湖水质评价中的应用[J]. 上海环境科学, 2007, 24(5):215-218.
WAN Jin-bao, LI Yuan-yuan. An application of fuzzy comprehensive evaluation to assessing the water quality of Poyang Lake[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2007, 24(5):215-218.

[21] Shannon-Wiener C E, Weaver W J. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois, 1949:117.

[22] 丁建华, 周立志, 邓道贵. 淮河干流大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(11):1875-1883.
DING Jian-hua, ZHOU Li-zhi, DENG Dao-gui. Community structure of macrozoobenthos and biological evaluation of water quality in the main stream of Huai River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(11):1875-1883.

[23] Margalef D R. Information theory in ecology[J]. *Generation Systems*, 1958, 3:36-71.

[24] 张 静, 于洪贤. 松花江哈尔滨段春季底栖动物群落结构研究及水质评价[J]. 水产学杂志, 2009, 22(2):40-45.
ZHANG Jing, YU Hong-xian. Study on zoobenthos community structure and water quality assessment in Songhua River along Harbin City [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2009, 22(2):40-45.

[25] 吕光俊, 熊邦喜, 刘 敏, 等. 不同营养类型水库大型底栖动物的群落结构特征及其水质评价[J]. 生态学报, 2009, 29(10):5339-5349.
LÜ Guang-jun, XIONG Bang-xi, LIU Min, et al. The community structure of macrozoobenthos and water quality assessment on different trophic types of reservoirs[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (10):5339-5349.

[26] 霍堂斌, 李 喆, 姜作发, 等. 黑龙江中游底栖动物群落结构与水质生物评价[J]. 中国水产科学, 2013, 20(1):177-188.
HUO Tang-bin, LI Zhe, JIANG Zuo-fa, et al. Macrozoobenthos community structure and water quality bioassessment in the mid-reaches of the Heilongjiang River[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1):177-188.

[27] Pielou E C. Shannon′s formula as a measure of specific diversity: Its use and misuse[J]. *American Naturalist*, 1966, 100:463-465.

[28] 李 娣, 李旭文, 牛志春, 等. 江苏省不同营养状况湖泊底栖动物群落结构与多样性比较[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1):163-172.
LI Di, LI Xu-wen, NIU Zhi-chun, et al. A comparative study on macrobenthic community structure and diversity in different trophic status lakes of Jiangsu Province[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, 12 (1):163-172.

[29] Hilsenhoff W L. Rapid field assessment of organic pollution with a family-level biotic index[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1988, 7(1):65-68.

[30] 蔡晓明, 任久长, 宗志祥, 等. 青龙河底栖无脊椎动物群落结构及其水质评价[J]. 应用生态学报, 1992, 3(4):364-370.
CAI Xiao-ming, REN Jiu-chang, ZONG Zhi-xiang, et al. Benthic macroinvertebrate communities in Qinglong River and assessment of its water quality[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(4): 364-370.

[31] 李 宁, 杨春江, 孙瑜旸, 等. 青海湟水河大型底栖动物群落结构及生态系统健康评价[J]. 中国农学通报, 2017, 33(35):141-148.
LI Ning, YANG Chun-jiang, SUN Yu-yang, et al. Community struc-

ture of macrobenthos and assessment of ecosystem health in Huangshui River, Qinghai Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(35):141-148.

[32] 丁建华, 杨 威, 金显文, 等. 赣江下游流域大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4):593-599.
DING Jian-hua, YANG Wei, JIN Xian-wen, et al. Community structure of macrozoobenthos and biological evaluation of water quality in lower reaches of Ganjiang River[J]. *Journal of Lake Science*, 2012, 24(4):593-599.

[33] 顾晓昀, 徐宗学, 王 汨, 等. 北运河水系底栖动物群落结构与水环境质量评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(6):1444-1454.
GU Xiao-yun, XU Zong-xue, WANG Mi, et al. Macroinvertebrates community structure and water quality assessment in the North Canal River Basin, Beijing, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(6):1444-1454.

[34] 段学花, 王兆印, 余国安. 以底栖动物为指示物种对长江流域水生态进行评价[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(3):241-247.
DUAN Xue-hua, WANG Zhao-yin, YU Guo-an. Ecological assessment of the Yangtze River ecosystem with benthic invertebrate as indicator species[J]. *Resources & Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(3):241-247.

[35] 李法云, 郎红伟, 王艳杰, 等. 辽河流域典型支流土地利用方式对大型底栖动物群落时空分布特征的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3):767-777.
LI Fa-yun, LANG Hong-wei, WANG Yan-jie, et al. Impacts of land use on the spatial and temporal distribution characteristics of the macroinvertebrates in the Liao River basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(3):767-777.

[36] Karrouch L, Chahlaoui A, Essahale A. Anthropogenic impacts on the distribution and biodiversity of benthic macroinvertebrates and water quality of the Boufekrane River, Meknes, Morocco[J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2017, 5(7):173-195.

[37] Azrina M Z, Yap C K, Rahim I A, et al. Anthropogenic impacts on the distribution and biodiversity of benthic macroinvertebrates and water quality of the Langat River, Peninsular Malaysia[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2006, 64(3):337-347.

[38] Munyika S, Kongo V, Kimwaga R. River health assessment using macroinvertebrates and water quality parameters: A case of the Orange River in Namibia[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2014, 76/77/78:140-148.

[39] 伍名群. 基于熵权法的清水江流域水质模糊综合评价[J]. 三峡环境与生态, 2013, 35(2):31-35.
WU Ming-qun. Fuzzy Comprehensive evaluation of water quality in Qingshui River basin based on entropy weight method[J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2013, 35(2):31-35.

[40] 吴苏舒, 高士佩, 胡晓东, 等. 基于熵权模糊综合评价法的白马湖生态系统健康评价[J]. 江苏水利, 2018(7):17-23.
WU Su-shu, GAO Shi-pei, HU Xiao-dong, et al. Assessment on the ecosystem health of Baima Lake based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2018(7):17-23.