



文章栏目：流域水环境整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202211054 中图分类号 X522 文献标识码 A

王力, 王丝可, 左剑恶, 等. 基于浮游细菌生物完整性指数的城市河流健康评价: 以深圳河流域为例[J]. 环境工程学报, 2023, 17(6): 2007-2014. [WANG Li, WANG Sike, ZUO Jiange, et al. Urban river health assessment based on biotic integrity bacterioplankton-index of biotic integrity: A case study of Shenzhen River Basin[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(6): 2007-2014.]

# 基于浮游细菌生物完整性指数的城市河流健康评价: 以深圳河流域为例

王力<sup>1</sup>, 王丝可<sup>2</sup>, 左剑恶<sup>1,3,✉</sup>, 李晓杰<sup>1</sup>, 陈雨<sup>1</sup>

1. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055; 2. 深圳职业技术学院, 深圳 518055; 3. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084

**摘要** 河流中的细菌是生态系统中物质循环的重要参与者, 能反映河流健康状况, 其群落生物指标具有评估城市河流生态状况的潜力。通过调查深圳河流域内深圳河、布吉河和福田河 3 条河流中的浮游细菌群落, 构建了生物完整性指数 (Ba-IBI), 评估了该流域的健康状况。基于河水浮游细菌的 Illumina 高通量测序结果, 通过差异性检验、箱线图筛选和相关性分析方法从 163 个候选指标中筛选出变形菌门、放线菌门和微丝藻菌目相对丰度及门水平 Simpson 多样性指数作为核心指标, 构建 Ba-IBI 评价体系。结果表明, 深圳河流域内的 20 个位点中处于健康状态、亚健康状态、一般状态和较差状态的位点数分别为 7 个、4 个、5 个和 4 个。其中, 深圳河处于一般和较差状态的点位比例高达 85.7%; 健康状况从上游到下游逐渐恶化; 整体健康状况较差。布吉河和福田河健康状况相对较好, 处于亚健康状态。各采样点 Ba-IBI 得分与水质状况的相关性较高 ( $R=0.77$ ,  $P<0.01$ ), 表明 Ba-IBI 能有效评价城市河流的健康状况。本研究结果可为深圳市河流的修复和管理工作提供参考。

**关键词** 城市河流健康评价; 生物完整性指数; 浮游细菌; 深圳河流域

河流具有饮用水供应、纳污、灌溉、航运等诸多功能, 在区域可持续发展中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。为有效识别人类活动、并评估城市化进程<sup>[2-5]</sup>对河流生态系统造成的影响, 诊断河流健康现状, 开展河流管理与保护工作, 对城市河流开展生态健康评价十分必要。生物群落具有综合反映生态系统物理、化学和生物影响的能力<sup>[6]</sup>, 其生物指标被广泛应用于对生态系统健康状况的评估。KARR<sup>[7]</sup>提出了一种基于鱼类的生物完整性指数 (Index of biotic integrity, IBI) 评估河流健康状况的方法。此后, IBI 评价法在对河流<sup>[8]</sup>、湖泊<sup>[9]</sup>、湿地<sup>[10]</sup>和水库<sup>[11]</sup>等系统的生态健康评价中得到广泛应用。细菌作为生态系统中的重要分解者, 具有分布广、繁殖快等特点<sup>[12]</sup>。在受人类活动影响较大的河流中, 虽然细菌群落结构发生改变, 但生物多样性未明显降低<sup>[13-14]</sup>, 仍对环境变化很敏感<sup>[15]</sup>。因此, 细菌具有指示高度损伤的城市河流健康状况的潜力。

目前, 已有研究者使用细菌生物完整性指数 (Bacteria-Index of biotic integrity, Ba-IBI) 指标体系对河流<sup>[16]</sup>、湖泊<sup>[12]</sup>、湿地<sup>[10]</sup>和水库<sup>[11]</sup>等生态状况进行了评价, 结果表明细菌具有反映生态系统健康状况的能力。现有研究大多采用底泥细菌构建评价体系, 但由于目前城市河段的河底衬砌等工程措施, 造成了河流底泥生境特征的同质化, 进而导致底泥细菌群落的同质性<sup>[17]</sup>, 因此, 底泥细菌在城市河流健康评价中的作用可能有限。浮游细菌是生物地球化学过程的重要参与者<sup>[18]</sup>, 其群落

收稿日期: 2022-11-10; 录用日期: 2023-03-15

基金项目: 深圳市高等院校稳定支持计划 (WDZC20200819163549002); 深圳市科创委可持续发展科技专项 (KCXFZ202002011008448)

第一作者: 王力 (1997—), 男, 硕士研究生, 627057719@qq.com; ✉通信作者: 左剑恶 (1968—), 男, 博士, 教授, jiane.zuo@tsinghua.edu.cn

结构与环境因素有密切联系<sup>[19]</sup>。黄艺等<sup>[12]</sup>和苏瑶等<sup>[20]</sup>构建了基于浮游细菌的生物完整性指数,成功应用在对滇池流域和城市河流的健康评价中。

深圳河流域受到居民生活、工业生产、交通运输等人类活动的影响,存在氮磷超标的问题,生态系统的完整性遭到了破坏。以深圳市深圳河流域内的3条河流为研究对象,分析各河流的细菌群落结构与水质指标间的关系,通过构建基于浮游细菌的生物完整性指数,探讨Ba-IBI评价体系在受人类活动影响较大的城市河流区域的适用情况,并评估其在城市河流生态健康评价中应用的可行性,以期为城市河流治理工作提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样点设置

选取深圳市深圳河流域内的深圳河、布吉河和福田河作为研究对象,根据流向在河道布设采样点。深圳河流域<sup>[21]</sup>位于东经 $111^{\circ}00' \sim 114^{\circ}123'$ 和北纬 $22^{\circ}27' \sim 22^{\circ}29'$ ,面积 $312.5 \text{ km}^2$ 。深圳河是深圳河流域的干流,是深圳与香港的界河,属于雨源型河流,同时接纳深圳市的大量污废水。布吉河和福田河均属于深圳河的一级支流<sup>[22]</sup>。在深圳河、布吉河和福田河分别设置7个、4个和3个采样点,采样点分布如图1所示。

### 1.2 样品采集与分析

样品采集于2021年10月至11月、2022年5月,pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)和水温(T)等水质参数使用多参数测定仪(Multi 3630 IDS, WTW)现场测定。每个采样点收集3份水样进行混合,将混合后的1.5 L水样作为最终样品。取其中1 L水样储存于聚乙烯塑料瓶中进行后续水质分析。分析指标包括化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )等,分析方法参考《水与废水监测分析方法》<sup>[23]</sup>。另外0.5 L水样储存于灭菌的塑料瓶内,运回实验室后使用 $0.22 \mu\text{m}$ 的微孔滤膜抽滤,含滤出物的膜片保存在 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱,用于后续细菌群落组成的测定。

采用16S rRNA测序分析水样中浮游细菌的群落组成。DNA提取、PCR和测序均由上海美吉生物医药科技有限公司完成,其中PCR扩增选用338F/806R引物对细菌16S rRNA基因的V3~V4区进行扩增。对测序结果进行拼接、质控过滤等处理后,将所有高质量序列按照操作分类单元(Operational Taxonomic Units, OTU)序列相似度97%进行聚类。聚类结果与Sliva 138/16s\_bacteria数据库对比,进行物种分类注释,设置比对阈值为70%。使用Past 3.0软件计算Simpson、Shannon、Chao1等 $\alpha$ 多样性指数。使用R语言(v4.2.1, <http://www.r-project.org/>)进行Kruskal-Wallis检验、Spearman相关性分析、冗余分析(Distance-based redundancy analysis, dbRDA)、层次分割(Hierarchical partitioning, HP)等。采用Origin Pro 2021b软件进行了箱线图、柱状图的绘制。

### 1.3 Ba-IBI评价体系的构建

#### 1.3.1 参考点的确定

在对河流进行健康评价的过程中,参考点起到为其余点位提供对照的作用<sup>[24]</sup>,应选择处于不受人为干扰的原始状态的点位,但城市河流被大量的人类活动干扰,很难找到处于理想状态下的采样点。因此,选择水质、生境等因素受干扰较小的点位作为参考点。

为了选择受人为干扰较小的点位,参考文献<sup>[25-26]</sup>,依据《地表水环境质量标准》(GB3838-

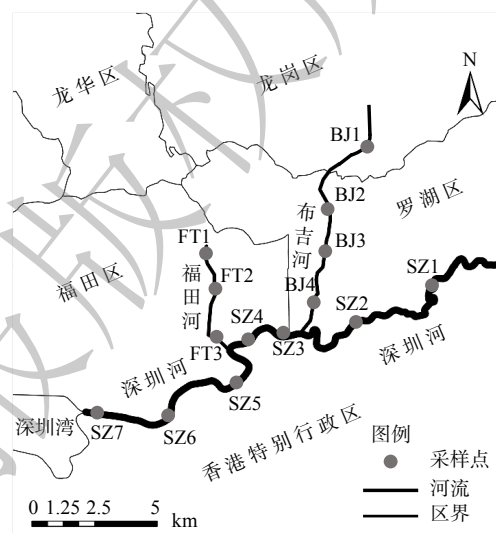


图1 深圳河流域研究区域及采样点位示意

Fig. 1 Study area and sampling sites in Shenzhen River Basin

2002)对DO、NH<sub>3</sub>-N、TP和COD共4项因子赋分。各水质参数达到I、II、III、IV和V类标准,分别计5、4、3、2和1分,未达到V类标准计0分,各水质因子得分相加为该采样点水质总分。水质总分大于75%分位数的点位设为参考点,其余采样点设为受损点。

### 1.3.2 候选指标的确定与筛选

参考此前的研究<sup>[11,12]</sup>,选择多样性指标、群落组成指标和耐受性指标作为候选指标。其中,多样性指标包括在不同分类水平上Simpson、Shannon、Chao1、Menhinick等 $\alpha$ 多样性指数;群落组成指标包括不同分类水平上优势物种的相对丰度,以及一些具有代表性的细菌群落的比值<sup>[27]</sup>;耐受性/敏感性指标由对环境干扰具有耐受性/敏感性的细菌群落的相对丰度组成。

候选指标的筛选过程参考文献<sup>[11]</sup>,依次为差异性检验、箱线图筛选和相关性分析。首先,通过Kruskal-Wallis检验筛选出在参考点和受损点具有显著差异的指标( $P<0.05$ )。其次,通过箱线图比较各候选指标区分参考点和受损点的能力( $IQ\geq 2$ ),剔除箱体存在重叠的指标。最后,对候选指标进行Spearman相关性分析,若两候选指标间的相关系数 $|R|\geq 0.7$ 且 $P<0.05$ ,则认为两指标之间具有显著相关性,并保留其中一个指标。

### 1.3.3 指标得分及评价标准

根据筛选得到的核心指标构建Ba-IBI。采用比值法对核心指标赋分,依据其5分位数和95分位数进行计算,指标值的计算如公式(1)和(2)<sup>[27]</sup>。当指标随着干扰的增加而增大时,采用式(1);而当指标随着干扰的增加而减小时,采用式(2)。最终,Ba-IBI得分为各项指标得分之和。

$$\text{指标得分} = \frac{(\text{最大值} - \text{点位值})}{(\text{最大值} - 5\text{分位数})} \quad (1)$$

$$\text{指标得分} = \frac{\text{点位值}}{95\text{分位数}} \quad (2)$$

参考文献<sup>[20,28]</sup>,以参考点Ba-IBI得分的25%分位数作为健康状态的评价标准,Ba-IBI得分大于该值的位点处于健康状态;将小于25%分位数的分布范围3等分,分别划分为亚健康、一般和较差状态。

## 2 结果与分析

### 2.1 参考点的选择

根据1.3.1中所述的打分标准,对各采样点的DO、NH<sub>3</sub>-N、TP、COD赋分,综合水质得分为各项水质参数得分的累和,结果见表1。各点位综合水质得分为8~15,综合水质得分的75%分位数为14,选择综合水质得分 $\geq 14$ 分的位点为参考点,即设置SZ1、BJ1、BJ2、FT3、BJ1<sub>s</sub>、BJ3<sub>s</sub>、FT1<sub>s</sub>、FT2<sub>s</sub>为参考点,其余位点为受损点。

### 2.2 候选指标库的构建与指标筛选

根据高通量测序的结果构建候选指标库。多样性指标包括门、纲、目、科和属水平上的Taxa、Chao1、Simpson、Shannon、Evenness、Brillouin、Dominance等多样性指数;群落组成指标包括在门、纲、目、科、属水平上的优势物种的相对丰度;耐受性/敏感性指标参考文献<sup>[11]</sup>的构建流程,其构建方法如图2所示。采用dbRDA分析细菌群落结构与水质参数的关系(图2(a)),发现RDA1轴和RDA2轴对细菌群落分布变化的解释率分别为43.47%和19.95%;使用rdacca.hp包<sup>[29]</sup>中的HP分析各水质参数对细菌群落的解释率,结果显示T、pH、DO、TN与细菌群落结构具有较显著的相关关系(图2(b))。进一步分析T、pH、DO、TN与各细菌类群间的Spearman相关性,分别得到与T、pH、DO、TN显著相关的细菌类群( $R>0.7, p<0.05$ ),由此组成耐受性/敏感性指标。根据以上计算分析结果构建的候选指标库共包含163个候选指标。

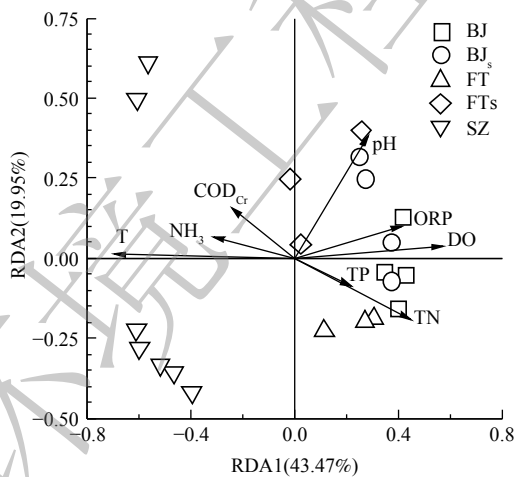
为得到构建Ba-IBI的核心指标,对163个候选指标进行差异性检验、箱线图筛选和相关性分析。首先,对候选指标进行Kruskal-Wallis检验,得到在参考点和受损点间有显著区别( $p<0.05$ )的指标。其次,进行箱线图筛选,结果如图3所示,保留了6个有效区分参考点和受损点的候选指

表1 各采样点主要水质参数及综合得分

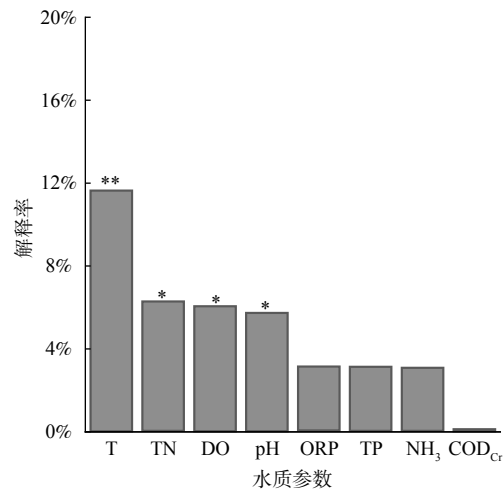
Table 1 Main water quality parameters and comprehensive scores of each sampling site

| 编号                | T/℃      | pH        | DO/(mg·L <sup>-1</sup> ) | ORP/mV     | COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | TP/(mg·L <sup>-1</sup> ) | TN/(mg·L <sup>-1</sup> ) | NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> ) | 综合水质得分 |
|-------------------|----------|-----------|--------------------------|------------|--|--------------------------|--------------------------|--|--------|
| SZ1               | 32.3±0.2 | 6.82±0.19 | 7.06±0.12                | 208.0±5.2  | 11.50±0.62                               | 0.23±0.08                | 8.77±0.22                | 0.30±0.03                                | 15     |
| SZ2               | 31.3±0.2 | 6.85±0.13 | 5.23±0.09                | 103.9±3.8  | 20.28±1.82                               | 0.63±0.10                | 5.32±0.18                | 0.97±0.08                                | 9      |
| SZ3               | 31.0±0.3 | 6.90±0.21 | 4.82±0.17                | 121.1±6.2  | 20.84±1.15                               | 0.49±0.04                | 7.35±0.13                | 0.80±0.12                                | 8      |
| SZ4               | 31.8±0.1 | 6.97±0.23 | 3.49±0.20                | 130.6±2.0  | 24.77±1.63                               | 0.45±0.07                | 7.51±0.24                | 0.97±0.04                                | 8      |
| SZ5               | 31.8±0.2 | 7.03±0.16 | 3.56±0.14                | 125.6±8.5  | 18.51±0.55                               | 0.39±0.04                | 7.48±0.23                | 1.20±0.17                                | 9      |
| SZ6               | 31.2±0.1 | 7.40±0.22 | 5.25±0.07                | 144.9±5.6  | 28.66±0.90                               | 0.36±0.05                | 4.24±0.25                | 1.16±0.07                                | 8      |
| SZ7               | 30.3±0.2 | 7.59±0.29 | 6.47±0.26                | 162.3±9.5  | 24.68±1.42                               | 0.38±0.02                | 3.07±0.18                | 0.63±0.09                                | 11     |
| BJ1               | 21.0±0.2 | 7.63±0.11 | 8.29±0.13                | 213.7±10.2 | 35.07±0.80                               | 0.05±0.02                | 7.57±0.21                | 0.22±0.05                                | 14     |
| BJ2               | 21.9±0.3 | 7.41±0.15 | 8.13±0.15                | 194.9±6.8  | 12.63±0.75                               | 0.41±0.03                | 6.67±0.17                | 0.30±0.03                                | 14     |
| BJ3               | 21.5±0.1 | 7.49±0.16 | 8.61±0.20                | 204.3±4.3  | 15.67±1.34                               | 0.44±0.07                | 7.57±0.19                | 0.20±0.05                                | 13     |
| BJ4               | 20.4±0.3 | 7.42±0.18 | 8.54±0.09                | 220.6±7.4  | 19.90±1.65                               | 0.41±0.09                | 6.27±0.13                | 0.17±0.08                                | 13     |
| FT1               | 25.1±0.3 | 6.87±0.21 | 7.04±0.11                | 252.6±7.6  | 14.60±0.74                               | 1.16±0.07                | 9.87±0.30                | 0.34±0.04                                | 13     |
| FT2               | 24.0±0.1 | 7.26±0.13 | 8.07±0.13                | 226.6±5.1  | 15.33±1.39                               | 1.22±0.11                | 9.87±0.14                | 0.72±0.05                                | 12     |
| FT3               | 22.5±0.1 | 7.29±0.34 | 7.46±0.19                | 208.5±9.3  | 14.37±0.97                               | 0.25±0.03                | 9.43±0.18                | 0.45±0.09                                | 15     |
| BJ <sub>s</sub> 1 | 26.9±0.3 | 7.62±0.23 | 8.32±0.14                | 137.1±3.5  | 17.25±1.20                               | 0.38±0.05                | 8.63±0.20                | 0.37±0.06                                | 14     |
| BJ <sub>s</sub> 2 | 27.3±0.2 | 6.90±0.17 | 7.32±0.16                | 145.4±10.4 | 18.00±0.56                               | 0.36±0.06                | 9.19±0.15                | 0.92±0.06                                | 12     |
| BJ <sub>s</sub> 3 | 27.2±0.2 | 7.09±0.15 | 7.89±0.10                | 159.3±5.1  | 11.85±0.33                               | 0.88±0.10                | 8.55±0.30                | 0.37±0.04                                | 14     |
| BJ <sub>s</sub> 4 | 27.5±0.3 | 7.32±0.18 | 7.35±0.17                | 269.0±8.3  | 14.80±1.15                               | 0.81±0.07                | 8.75±0.11                | 0.52±0.03                                | 12     |
| FT <sub>s</sub> 1 | 28.1±0.1 | 7.18±0.16 | 7.95±0.13                | 297.5±8.8  | 9.40±0.47                                | 0.51±0.03                | 8.34±0.17                | ND                                       | 15     |
| FT <sub>s</sub> 2 | 29.0±0.1 | 7.43±0.21 | 7.87±0.11                | 273.4±4.7  | 9.55±0.27                                | 0.50±0.06                | 9.32±0.25                | ND                                       | 15     |

注：“s”表示在该点位的第二次取样；“ND”表示水质结果低于检测限。



(a) 细菌群落分布变化与环境因子的dbRDA分析



(b) 各水质参数解释总变化量的比例

图2 dbRDA分析和层次切割分析

Fig. 2 DbrDA and hierarchical cutting analysis

标，分别为变形菌门相对丰度、放线菌门相对丰度、酸微菌纲相对丰度、微丝藻菌目相对丰度、Dominance指数和Simpson多样性指数。上述指标在参考点和受损点的箱体无重叠，表明这些指标

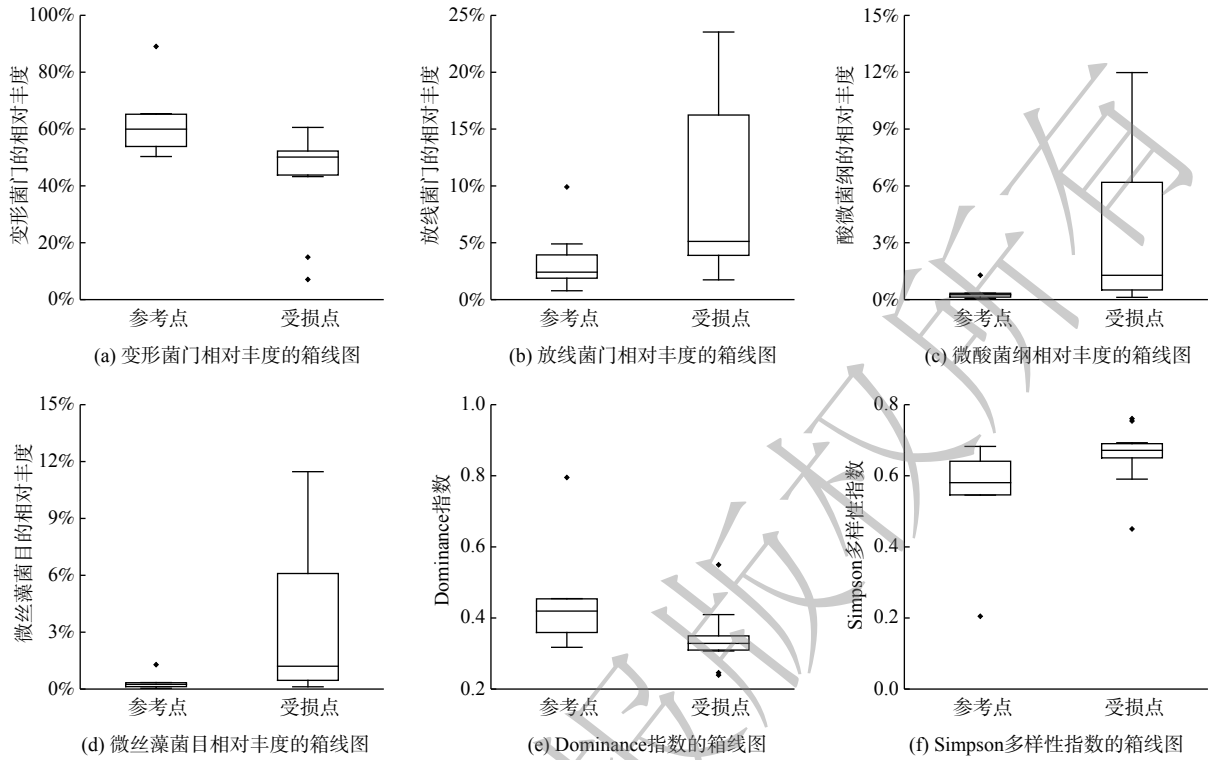


图 3 核心指标对参考点和受损点的区分能力

Fig. 3 Discriminatory power of core metrics for reference and impaired sites

的区分能力较强。再次，分析这 6 个候选指标两两间的 Spearman 相关性，结果发现门水平的 Dominance 指数和 Simpson 多样性指数、酸微菌纲相对丰度和微丝藻菌目相对丰度之间均有显著的相关性 ( $R>0.7, p<0.05$ )。最终，得到了 4 个构建 Ba-IBI 的核心指标，分别为变形菌门相对丰度、放线菌门相对丰度、微丝藻菌目相对丰度和门水平的 Simpson 多样性指数。

### 2.3 深圳河流域 Ba-IBI 评价

深圳河流域各采样点位的核心指标 Ba-IBI 得分如图 4 所示。各位点 Ba-IBI 得分为 0.56~3.97，选取的 8 个参考点中 6 个位点处于健康状态，BJ2 和 BJ3 处于亚健康状态；深圳河 7 个点位的健康状况分别为健康 1 个、一般 2 个、较差 4 个，有 85.7% 的点位的健康状况是一般和较差；布吉河各点位两次采样的 Ba-IBI 得分基本一致，处于健康和亚健康状态；福田河第一次采样的健康状况处于一般状态，第二次处于健康状态。深圳河各样点 Ba-IBI 得分呈现出从 SZ1 值 SZ6 逐渐下降的趋势，而 SZ7 样点的得分略有上升，这也与深圳河的水质状况变化相吻合，可能是 SZ7 样点靠近入海口，受海水影响较大。本研究对深圳河的评价结果与高雯琪等<sup>[30]</sup>对深圳河河流生境的评价结果基本一致。

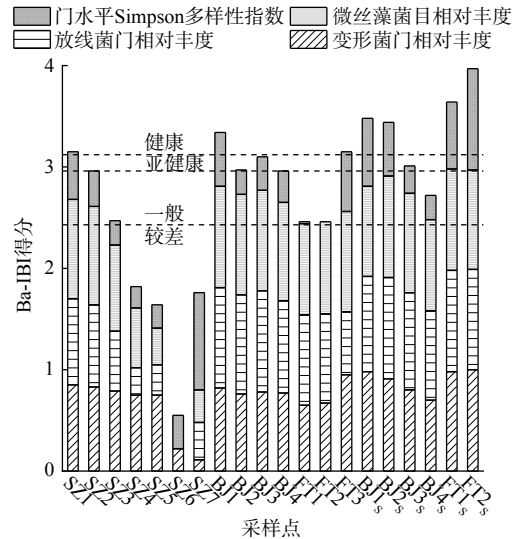


图 4 各采样点 Ba-IBI 得分及健康状况

Fig. 4 Ba-IBI score and health status of each sampling site

本研究的 Ba-IBI 评价结果与高雯琪等<sup>[30]</sup>对深圳河河流生境的评价结果基本一致。

### 3 讨论

#### 3.1 Ba-IBI 评价方法的可靠性

利用各核心指标与水质参数的相关性来确定核心指标的合理性,结果如表2所示。变形菌门相对丰度与TP、COD有相关性 ( $R>0.5, P<0.05$ ),放线菌门相对丰度与T、DO、ORP、COD、 $\text{NH}_3$ 和TN具有相关性 ( $R>0.5, P<0.05$ ),微丝藻菌目与T、DO、COD、TN和 $\text{NH}_3$ 有相关性 ( $R>0.5, p<0.05$ ),故筛选得到的核心指标具有合理性。根据筛选所得的4个核心指标构建的Ba-IBI评价结果具有良好的灵敏度,能较好地地区分参考点和受损点(图5(a))。通过dbRDA分析得到4个与细菌群落分布变化相关的水质参数分别为T、pH、DO、TN。通过多元线性回归分析Ba-IBI结果与上

表2 核心指标与水质参数的 Pearson 相关系数

Table 2 The Pearson correlation coefficient between the core metrics scores and the water quality parameters

| 水质指标                   | 变形菌门<br>相对丰度 | 放线菌门<br>相对丰度 | 微丝藻菌目<br>相对丰度 | 门水平Simpson<br>多样性指数 |
|------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------------|
| T                      | -0.16        | 0.56**       | 0.52*         | -0.14               |
| pH                     | -0.14        | -0.08        | 0.11          | -0.38               |
| DO                     | 0.3          | -0.80**      | -0.64**       | -0.22               |
| ORP                    | 0.29         | -0.53*       | -0.43         | -0.25               |
| COD                    | -0.52*       | 0.51*        | 0.51*         | 0.15                |
| TP                     | -0.09        | -0.19        | -0.14         | 0.4                 |
| TN                     | 0.69**       | -0.55*       | -0.64**       | 0.05                |
| $\text{NH}_3\text{-N}$ | -0.47*       | 0.74**       | 0.66**        | 0.39                |

注: \*表示 $P<0.05$ , \*\*表示 $P<0.01$ 。

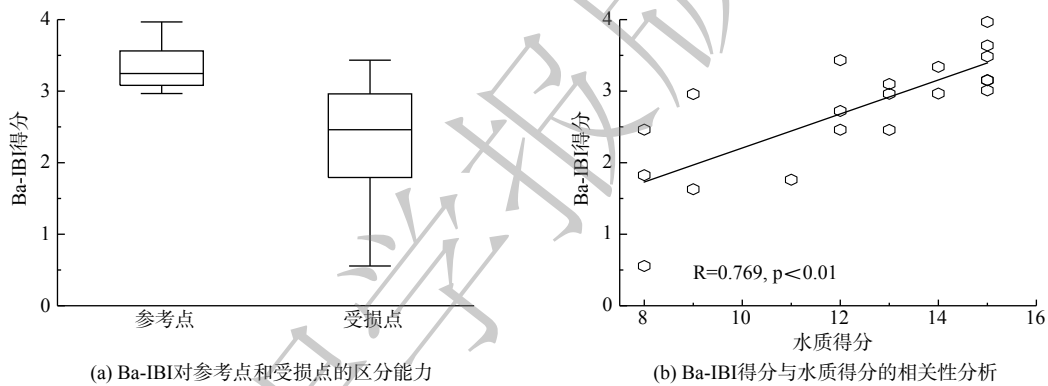


图5 Ba-IBI 可靠性验证

Fig. 5 Reliability validation of Ba-IBI

述4种水质参数的相关性,结果表明DO与Ba-IBI存在较好的线性关系 ( $P<0.01$ ),其次是TN ( $P<0.1$ );这表明部分水质参数与Ba-IBI之间存在一定的线性关系,Ba-IBI对水质参数的变化具有较好的响应模型 ( $R=0.73, P<0.01$ )。文献[12,20,25,31]报道IBI得分与水质状况的相关系数普遍为0.6~0.8。而本研究各点位Ba-IBI得分与水质得分相关性较高 ( $R=0.77, p<0.01$ ) (图5(b)),这表明Ba-IBI能较好地反映样点水质状况,并评估城市河流的健康状况。

#### 3.2 浮游细菌作为指示生物潜力

在所有的候选指标中,经过差异性检验、箱线图筛选、相关性分析等步骤,筛选得到了4个核心指标。其中,放线菌门广泛分布于水生和陆生系统中,能利用腐殖酸和难降解有机物生长<sup>[32]</sup>,并分解去除橡胶、塑料、杀虫剂和重金属等物质<sup>[33]</sup>,发挥着推动物质循环利用、降解复杂有机物的作用<sup>[34]</sup>。由于放线菌具有降解重金属和有机物共同污染的能力,被认为是进行生物修复的候选菌。微丝藻菌目能分泌有助于矿化难降解有机物的生物活性化合物,可能是水解复杂底物的关键异养菌<sup>[35]</sup>。这些研究表明,浮游细菌作为分解者,密切参与了河流生态系统中的物质循环,与多种环境因子之间存在联系,可指示水环境的健康状况。

此前基于微生物构建的IBI大多采用的是沉积物或生物膜的微生物群落数据,但在部分城市河流,由于河底淤积、河道硬化等工程措施导致的底泥生境扰动或底泥缺失限制了底泥细菌在城市河流健康评价中的应用。因此,开发基于浮游细菌的指标体系可以一定程度上打破底泥生境缺失带来的局限。

## 4 结论

1) 采用浮游细菌作为指示生物, 构建了城市河流生态健康评价指标体系 Ba-IBI, 指标包括变形菌门、放线菌门、微丝藻菌目相对丰度和 Simpson 多样性指数。该 Ba-IBI 与水质状况的相关性较高表明其能够较好的反映河流健康状况。

2) 对深圳河流域内的深圳河、布吉河和福田河采用 Ba-IBI 评价河流状态, 结果表明深圳河从上游到下游健康状况逐渐恶化, 85.7% 的点位处于一般和较差状态, 整体健康状况较差; 布吉河和福田河健康状况相对较好, 处于亚健康状态。

3) Ba-IBI 的评价结果与水质状况有较好的相关性, 表明浮游细菌能起到指示生物的作用, 本文构建的 Ba-IBI 能反映城市河流不同点位细菌群落完整性变化, 为城市河流的管理和修复工作提供参考。目前本研究尚存在一些不足, 只关注了 Ba-IBI 与水质的关系, 缺少与河流生境的对比; 同时由于样本量较少导致测试集验证指标准确性的环节缺失, 建议在后期的研究中继续完善。

## 参考文献

- [1] BEST J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 7-21.
- [2] CHUNG M G, FRANK K A, POKHREL Y, et al. Natural infrastructure in sustaining global urban freshwater ecosystem services[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(12): 1068-1075.
- [3] MCDONALD R I, WEBER K F, PADOWSKI J, et al. Estimating watershed degradation over the last century and its impact on water-treatment costs for the world's large cities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(32): 9117-9122.
- [4] MICHALAK A M. Study role of climate change in extreme threats to water quality[J]. *Nature*, 2016, 535(7612): 349-350.
- [5] PALMER M A. Beyond infrastructure[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 534-535.
- [6] DUDLEY J L. Restoring Life in Running Waters: Better Biological Monitoring[J]. *BioScience*, 1999, 49(10): 827.
- [7] KARR J R. Assessment of Biotic Integrity Using Fish Communities[J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [8] WU J, MAO R, LI M, et al. Assessment of aquatic ecological health based on determination of biological community variability of fish and macroinvertebrates in the Weihe River Basin, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 267: 110651.
- [9] WU Z, KONG M, CAI Y, et al. Index of biotic integrity based on phytoplankton and water quality index: Do they have a similar pattern on water quality assessment? A study of rivers in Lake Taihu Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 395-404.
- [10] NIU L, ZOU G, GUO Y, et al. Eutrophication dangers the ecological status of coastal wetlands: A quantitative assessment by composite microbial index of biotic integrity[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151620.
- [11] LI Y, YANG N, QIAN B, et al. Development of a bacteria-based index of biotic integrity (Ba-IBI) for assessing ecological health of the Three Gorges Reservoir in different operation periods[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 255-263.
- [12] 黄艺, 舒中亚. 基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价——以滇池流域为例[J]. *环境科学*, 2013, 34(08): 3010-3018.
- [13] VENTER O, SANDERSON E W, MAGRACH A, et al. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12558.
- [14] LEAR G, DOPHEIDE A, ANCIÓN P, et al. A comparison of bacterial, ciliate and macroinvertebrate indicators of stream ecological health[J]. *Aquatic Ecology*, 2011, 45(4): 517-527.
- [15] LEAR G, BOOTHROYD I K G, TURNER S J, et al. A comparison of bacteria and benthic invertebrates as indicators of ecological health in streams[J]. *Freshwater Biology*, 2009, 54(7): 1532-1543.
- [16] 董婧, 卢少奇, 伍娟丽, 等. 基于微生物完整性指数的北京市城市河道生态系统健康评价[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(5): 1411-1419.
- [17] 赵隽莹, 张伟, 郭道宇, 等. 衬砌对河道底泥细菌群落同质化的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(2): 854-862.
- [18] FALKOWSKI P G, FENCHEL T, DELONG E F. The Microbial Engines That Drive Earth's Biogeochemical Cycles[J]. *Science*, 2008, 320(5879): 1034-1039.
- [19] ZHANG W, LEI M, LI Y, et al. Determination of vertical and horizontal assemblage drivers of bacterial community in a heavily polluted urban river[J]. *Water Research*, 2019, 161: 98-107.
- [20] 苏瑶, 许育新, 安文浩, 等. 基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1270-1279.
- [21] 高晓薇, 刘家宏. 深圳河流域城市化对河流水文过程的影响[J]. *北京大学学报*, 2012, 48(1): 153-159.
- [22] 张志峰, 边朝辉. 深圳市布吉河水环境分析及治理方案研究[J]. *水利科技与经济*, 2016, 22(8): 9-12.
- [23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [24] 王为木, 蔡旺炜. 生物完整性指数及其在水生态健康评价中的应用进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(4): 517-524.
- [25] NIU L, LI Y, WANG P, et al. Development of a microbial community-based index of biotic integrity (MC-IBI) for the assessment of ecological status of rivers in the Taihu Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018,

- 85: 204-213.
- [26] LI Y, GAO L, NIU L, et al. Developing a statistical-weighted index of biotic integrity for large-river ecological evaluations[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111382.
- [27] YANG N, LI Y, ZHANG W, et al. Reduction of bacterial integrity associated with dam construction: A quantitative assessment using an index of biotic integrity improved by stability analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 75-83.
- [28] 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 等. 基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价: 以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例[J]. *环境科学*, 2016, 37: 3413-3422.
- [29] LAI J, ZOU Y, ZHANG J, et al. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca. hp R package[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(4): 782-788.
- [30] 高雯琪, 陆颖, 屈霄, 等. 城镇化背景下河流生境评价——以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(22): 8783-8793.
- [31] 谢孟星, 钱新, 刘彤, 等. 基于微生物完整性指数的河流健康评价——以无锡市为例[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(3): 1112-1120.
- [32] GENILLOUD O, GONZÁLEZ I, SALAZAR O, et al. Current approaches to exploit actinomycetes as a source of novel natural products[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2011, 38(3): 375-389.
- [33] POLTI M A, APARICIO J D, BENIMELI C S, et al. Simultaneous bioremediation of Cr(VI) and lindane in soil by actinobacteria[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 88: 48-55.
- [34] ALVAREZ A, SAEZ J M, DAVILA COSTA J S, et al. Actinobacteria: Current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2017, 166: 41-62.
- [35] MIKSCH S, MEINERS M, MEYERDIERKS A, et al. Bacterial communities in temperate and polar coastal sands are seasonally stable[J]. *ISME Communications*, 2021, 1(1): 29.
- (责任编辑: 靳炜)

## Urban river health assessment based on biotic integrity bacterioplankton-index of biotic integrity : A case study of Shenzhen River Basin

WANG Li<sup>1</sup>, WANG Sike<sup>2</sup>, ZUO Jiane<sup>1,3,\*</sup>, LI Xiaojie<sup>1</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>

1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

\*Corresponding author, E-mail: jiane.zuo@tsinghua.edu.cn

**Abstract** Anthropogenic impacts on urban rivers induced the macrobiotic species disappearance and the biodiversity losses, which reduced the accuracy of bioassessment. Bacteria are important decomposers in the ecosystem material cycle and have the potential to indicate the health status of rivers. The development of biological indicators based on bacterial community for assessing aquatic ecological status is urgently needed. In this study, bacterioplankton-index of biotic integrity (Ba-IBI) was constructed to evaluate the status of three urban rivers in Shenzhen River Basin. Based on the Illumina high-throughput sequencing results of planktonic bacteria, the core indicators were identified by difference examination, boxplot screening and correlation analysis. Among the 163 candidate indicators, the relative abundance of Proteobacteria, Actinomycetes, Microfilariidae and Simpson index at the phylum level were regarded as the core indicators to develop the Ba-IBI. The results showed that 7, 4, 5 and 4 of the 20 sites in the Shenzhen River basin were in healthy state, sub-healthy state, general state and poor state, respectively. The Shenzhen River was in poor states, with 85.7% of the points in the general or poor states, and the health status gradually deteriorated from the upstream to the downstream. Buji River and Futian River were in sub-health states. There was a high correlation between Ba-IBI score and water quality ( $R=0.77$ ,  $P<0.01$ ) suggesting that Ba-IBI could effectively evaluate the health states of urban rivers. This study can provide a reference for the restoration and management of rivers in Shenzhen.

**Keywords** urban river health assessment; index of biotic integrity; bacterioplankton; Shenzhen River Basin