

DOI: 10.5846/stxb201306241759

任海庆, 袁兴中, 刘红, 张跃伟, 周上博. 环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响. 生态学报, 2015, 35(10): 3148-3156.

Ren H Q, Yuan X Z, Liu H, Zhang Y W, Zhou S B. The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(10): 3148-3156.

环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响

任海庆^{1,2}, 袁兴中^{1,2,3,*}, 刘 红^{1,2}, 张跃伟^{1,2}, 周上博^{1,2}

1 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030

2 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030

3 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030

摘要:底栖无脊椎动物是河流生态系统的重要组成部分,在物质循环和能量流动中是不可或缺的重要环节。其群落结构特点与河流环境因子密切相关,能较好地反映河流生态系统健康状况。综述了物理因子(底质、温度、水深、水流、洪水干扰等)、化学因子(溶氧量、pH 值、磷、氮等)、生物因子(水生植物、竞争和捕食)、人为干扰(电站建设、城镇化等)和综合因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响,并根据国内外研究现状指出水流、海拔和洪水干扰等环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构影响的研究较少或不足,对这些环境因子的研究应是今后河流生态学领域需要着力推进重要内容。深入研究和完善环境因子与底栖无脊椎动物群落结构的关系可为保护底栖无脊椎动物群落、流域水生态系统管理和受损河流生态系统修复提供更为全面的科学依据。

关键词:底栖无脊椎动物; 环境因子; 群落结构

The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate in rivers

REN Haiqing^{1,2}, YUAN Xingzhong^{1,2,3,*}, LIU Hong^{1,2}, ZHANG Yuewei^{1,2}, ZHOU Shangbo^{1,2}

1 College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2 Key Laboratory of Southwest Resource Exploitation and Environmental Disaster Controlling Engineering of Ministry of Education, Chongqing 400030, China

3 State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract: Benthic invertebrate refers to aquatic animals living at the bottom of water in the all or part of life history. As an important component in river ecosystem, it is also an indispensable connection link in energy flow and matter cycle. Benthic invertebrates are characterized by long life cycle, slow action, broad range of types and large body size, which are convenient for collection and observation. The distribution, abundance and diversity of benthic invertebrate can convey information of environmental pollution. Some groups display strong resistance against severe environment, while other groups are sensitive to changes in environmental conditions. The characteristics of benthic invertebrate reflect the health state of river ecosystem. Benthic invertebrate is one type of significant indicator organisms in river health assessment. At present, many scholars mainly focused on river health assessment and the effects of a few environmental factors on benthic invertebrate community structure. The effects of environment factors on community structure of benthic invertebrate are very complex; there are numerous environment factors and the effects of different environment factors on different benthic invertebrate groups are not completely the same. This article discusses the influences of environment factors including physical factors (bottom sediment, water temperature, water depth, water current, etc.), chemical factors (dissolved

基金项目:国家自然科学基金项目(51179214)

收稿日期:2013-06-24; 网络出版日期:2014-05-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzyuan63@aliyun.com

oxygen, total phosphorous, total nitrogen, etc.), biological factors (aquatic plants, competition and predation), anthropogenic disturbance and other combined factors on community structure of benthic invertebrate. Different environment factors impose different impacts on benthic invertebrates. Bottom sediment is an essential condition for all life activities including growth, reproduction, etc. Any species has the strict living temperature range. Community structure of benthic invertebrate is directly influenced by the fluctuation of temperature. Water depth is one of major environment factors of community structure of benthic invertebrate. In general, the density and biomass of benthic invertebrate continuously vary with water depth. Water flow not only affects feed conditions of benthic invertebrate, rivers productivity, competition among species and within species, larval living places, but also has significant impacts on the community structure of river. Flow velocity determines the composition of benthic invertebrate community. Altitude determines the changes of temperature, light and other environment factors and indirectly affects the community structure of benthic invertebrate. Water chemical factors are closely related to community structure of benthic invertebrate. Aquatic plants provide excellent habitat fields for propagation, feeding and living for benthic invertebrate. Benthic invertebrates are affected by both competition and predation; excessive competition and predation often result in the reduction in species diversity, secondary productivity and feeding conditions as well as the changes in community structure of benthic invertebrate. Anthropogenic disturbance (such as power plant construction, thermal discharge and urbanization) is mainly response for the changes of the community structure of benthic invertebrate. The effects of water flow, water velocity, altitude and flood on community structure of benthic invertebrate are seldom reported. These environment factors should be perfected and investigated in the future.

Key Words: benthic invertebrate; environment factors; community structure

底栖无脊椎动物是指生活史的全部或大部分时间生活于水体底质内或之上的水生动物群,是河流水生态系统的重要组成部分,在维持水生态系统的平衡中起着十分重要的作用。底栖无脊椎动物所涉门类众多、生命周期较长、体型较大、活动缓慢;其物种分布、丰富度和多样性能传达环境被污染的信息,部分类群既有对恶劣环境抗性很强的种类,又有对环境条件变化(如溶氧量、pH 值、底质类型等)很敏感的种类。因此,底栖无脊椎动物被广泛认为是河流生态系统健康的指示生物之一^[1-2]。目前,国内外已有不少学者利用底栖无脊椎动物对河流生态系统健康状况进行了评价,但关于河流底栖无脊椎动物群落结构与环境因子关系方面的研究还不够全面。

底栖无脊椎动物是食物链中的重要环节,在水体中能促进有机碎屑分解,通过摄食、排泄和在沉积物中活动,释放营养盐到水体中,同时也能加快营养盐的移动速度^[3]。其群落结构与环境因子联系密切,在不同的季节和生境中,种类组成、丰度都存在明显的差异性^[4]。环境因子对底栖无脊椎动物的影响非常复杂,不仅环境因子众多,而且不同的环境因子对不同的底栖无脊椎动物类群有着不完全一致的作用。因此,研究底栖无脊椎动物群落结构与环境因子的关系具有重要意义,可为保护底栖无脊椎动物群落和流域水生态系统管理提供重要的科学依据,同时也是河流生态学研究的基础,并且一直是研究的热点^[5-8]。本文从物理因子、化学因子、生物因子、人为干扰及综合因子方面综述了对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响,指出环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构相关研究尚需完善之处,并为今后相关的研究方向提供参考。

1 物理因子

1.1 底质

底质是影响河流底栖无脊椎动物群落结构最重要的环境因素之一^[9-10],是底栖无脊椎动物生长、繁殖等一切生命活动的必备条件,其粒径大小、异质性、表面结构、稳定性等对底栖无脊椎动物群落结构的组成影响很大。

国内根据《河流泥沙颗粒分析规程》将底质分为粘粒($<0.004\text{ mm}$)、粉沙($0.004\text{—}0.062\text{ mm}$)、沙粒

(0.062—2.0 mm)、砾石(2.0—16.0 mm)、卵石(16.0—250.0 mm)、漂石(>250.0 mm)六类^[11]。国外河流生态学研究采用 Cummins 的分类方法将底质分为淤泥(<0.05 mm)、细沙(0.05—2 mm)、砂砾(2—16 mm)、卵石(16—64 mm)、圆石(64—256 mm)、漂石(>256 mm)^[12]。底质类型的不同直接影响底栖无脊椎动物群落结构^[13]。就理论上而言,淤泥、细沙和砂砾的稳定性较差,异质性低,底栖无脊椎动物的生物量和多样性较低;卵石、圆石和漂石表面结构复杂,稳定性较好,生物量和多样性较高。王强等^[14]对西南山地源头溪流附石性水生昆虫群落特征及多样性研究发现大圆石(粒径(214.7±29.9) mm)上水生昆虫多度显著高于小圆石(粒径(122.3±12.9) mm), Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰度指数也显著高于小圆石; Hildrew 等^[15]、Reice^[10]、Rabeni 和 Minshall^[16]认为河流底质粒径平均大小影响底栖无脊椎动物群落结构。

底栖无脊椎动物主要取食浮游生物、底栖藻类和水草碎屑,其多样性和丰度随着底质中浮游生物和水草碎屑数量变化而变化。因此底质组成成分不同,将影响底栖无脊椎动物群落结构的组成。Angradi^[17]和 Hawkins^[18]认为包含树叶、砾石、树木等的底质生境比含有沙粒和基岩简单结构的底质生境有更高的底栖无脊椎动物多样性;但是过高的浮游生物、底栖藻类和水草碎屑生物量反而导致生境缺氧,可能导致底栖无脊椎动物多样性和丰度下降,如生活于 Michigan 河的一种摇蚊 *Brillia flavifrons* 主食植物叶子,当底质中富含新鲜植物叶子时较衰败叶子具更高的生长速率^[19]。

1.2 温度

任何物种都生活在严格的温度范围内,温度的变化直接或间接影响底栖无脊椎动物群落结构。Ward 和 Stanford^[20]认为温度格局影响昆虫生命周期,从而导致昆虫密度增加。Hay 等^[21]对 Missouri 河内大型无脊椎动物漂移密度与非生物因子的关系进行了研究,提出水温是河流上游重要的预测因子。全球气候变化对河流底栖无脊椎动物群落的影响一直是研究者关注的重点。Hughes^[22]认为群落结构和组成的变化被作为是生物结构对气候变化的一种信号,气候变化的结果将影响生物的生理机能、物候关系和分布等。Floury 等^[23]人对河流大型无脊椎动物和气候变化进行 30a(1979—2008 年)数据统计,结果显示,相对 30a 前,温度升高 0.9 °C,流速缓慢或者静止的水域中大型无脊椎动物(包括外来物种)逐渐转向耐污种和广适种。除此之外,季节变化对底栖无脊椎动物群落结构也产生一定的影响, Kosnicki 和 Sites^[24]对美国 Missouri Ozark 河流进行了研究,指出在一年内不同季节,底栖无脊椎动物群落结构随着季节变化而变化。

1.3 水深

底栖无脊椎动物群落结构明显的随着水深的变化而变化。Beisel 等^[25]对在中尺度生境特征的影响下,河流群落结构与空间变化的关系研究中,指出除了底质外,河流水深是影响底栖无脊椎动物的重要因素,在很小的范围内,水深与底栖无脊椎动物的均匀度成正相关,与多度成负相关关系。Heino^[26]研究了空间异质性、生境大小和水质对静水中底栖无脊椎动物群落结构的影响,发现刮食者物种丰富度与河流水深成正相关性。杨青瑞和陈求稳^[27]对漓江大型底栖无脊椎动物及其与水环境的关系研究发现,水深是影响大型底栖无脊椎动物群落结构和分布的主要环境因子。

1.4 水流

水流对底栖无脊椎动物群落结构的影响包括流速和流量。通常急流水域中的含氧量一般达到饱和,适合喜氧型底栖无脊椎动物栖息;反之,流速缓慢或者静止的水域中含氧量较低,适合需氧量低的底栖无脊椎动物栖息。流量的增加导致沿岸凋落物输入的增加,为底栖无脊椎动物提供更多食物来源,并且最佳流量对河流生态系统有积极的作用。

一般来说,河流上游(尤其是源头段)流速湍急,河流底质多为岩块、砾石,植物落叶基本没有分解,水质较好,适合蜉蝣目、毛翅目和襁翅目等类群栖息;到河流下游,流速缓慢,底质粒径逐渐变小,主要适合腹足纲、环节动物门等动物栖息。在研究过程中流速被认为是底栖无脊椎动物栖息地生境中重要因子,在讨论时空变化对底栖无脊椎动物影响时,应该把流速的变化考虑在内^[28]。Nelson 和 Lieberman^[29]在流量和其他环境因素对底栖无脊椎动物的影响研究中发现,流速是解释群落结构最重要的变量。Nelson^[30]也提出流速是影响底栖

无脊椎动物群落结构最基本的环境因子。

水流流量不仅影响河流生产力^[31]、种间和种内的竞争力^[32]和稚虫的分布地点^[33],而且对河流底栖无脊椎动物群落结构有显著性影响。孙小玲等^[34]对春季昌江大型底栖无脊椎动物群落结构及功能摄食类群的空间分布研究表明,流量的增加会加速河流中沿岸凋落物的输入,水温的升高会加速凋落物的分解,进而增加河流中有机碳和其他溶解物质的含量,从而决定底栖无脊椎动物的群落结构。Li 等^[35]人在香溪河底栖无脊椎动物和它们对河道环境流量的应用方面建设了生境适宜模型,通过最低要求河道流量(水文级)、最小河道环境流量(生物物种水平)和最佳河道环境流量(生态系统水平)研究发现年平均流量的 42.91%(2.639 m³/s)是保护河流生态系统健康、保持河道生物多样性、减少小水电站影响的最佳河道环境流量。

1.5 洪水干扰

洪水干扰能改变底栖无脊椎动物群落结构组成,洪水持续时间、流量大小、水位波动等因素对底栖无脊椎动物群落结构产生不同程度的影响。在国外,洪水与河流底栖无脊椎动物群落结构关系的相关研究开始较早,但缺乏系统性研究,仍不完善;这方面的研究在国内几乎空白。

Junk 等人在 1989 年提出洪水脉冲理论概念,认为洪水脉冲是“河流-洪泛区”系统生物生存、生产力和相互作用的主要驱动力^[36],其属性主要包括洪水量级、脉冲时间、淹水时间等,此理论用以解释河流洪泛湿地能量及营养的动态变化。当丰水季节,泛滥洪水建立了河流与洪泛区之间的水力联系,洪水径流不断地由河流向洪泛区提供有机营养物质输入,水栖生物及无脊椎动物迅速生长;枯水季节,其河道与洪泛区各自维持自身的营养物质循环^[37]。此理论也指出在洪泛区系统内具有较高的生物量,但受到地形、地貌因素的限制,洪泛区与河流有机质交换会受到影响,在水文连通性不是很好的情况下,洪泛区有机体也可能显著地影响河流系统的食物网^[38],因此,洪泛区是生物多样性研究的热点区域。现阶段对洪泛区动物研究,主要集中在鱼类和水鸟的研究,如 Bayley^[39]对鱼类的研究和 Roshier^[40]对鸟类的研究,但是对底栖无脊椎动物的研究工作非常稀少。

洪水干扰对不同流域内底栖无脊椎动物群落结构的影响已有研究,如 Mundahl 和 Hunt^[41]在美国进行了不同级别的溪流对底栖无脊椎动物影响的研究,发现洪水干扰导致很多溪流中无脊椎动物的密度减少 75%—95%,类群丰富度减少 30%—70%,在一级和二级溪流中,群落结构变得更加简单,但是在四级溪流中没有这种变化;还指出不同的洪水干扰程度对溪流群落结构的恢复需要不同的时间。Bond 和 Downes^[42]对澳大利亚的 8 条人工河流进行研究,结果表明洪水干扰是对底栖无脊椎动物群落影响的重要机制。除此之外,Resh 等^[43]、Lake^[44]也对洪水与底栖无脊椎动物群落结构的关系进行了研究。

1.6 海拔

海拔高低决定了一个区域的温度和光照等环境因子的变化,间接影响底栖无脊椎动物群落结构组成。不同季节底栖无脊椎动物群落结构的不同,除了氨氮、硬度和水温等环境因子外,海拔也是主要的影响因子之一^[45]。Mishra 等^[46]对印度喜马拉雅冰川河流的底栖无脊椎动物分布格局进行了研究,指出在海拔河流中,蜉蝣目、毛翅目、双翅目、襀翅目和鞘翅目占底栖无脊椎动物总量的比例大于 80%。Carvalho 等^[47]研究了巴西半干旱地区间歇性的河流中底栖无脊椎动物结构,发现除底质类型、植物和枯枝落叶外,海拔也是影响底栖无脊椎动物组成的重要因子之一。Loayza-Muro 等^[48]认为高海拔为底栖无脊椎动物群落创造了独特的具有挑战的环境,限制了底栖动物群落的多样性。渠晓东等^[49]对雅砻江锦屏段及其主要支流 25 个采样点的大型底栖动物进行了调查研究,发现 5 月份和 11 月份影响底栖无脊椎动物的主要环境因子为海拔高度、氨氮和硬度等。Carter 等^[50]在三类生境尺度与溪流底栖无脊椎动物群落结构关系的研究中发现,物种组成是随着土地利用的海拔变化而变化的,但物种多样性与海拔之间并没有明显的关系。

2 化学因子

底栖无脊椎动物生活史的全部或者大部分时间都生活在水中,其群落结构与水体中化学因子(包括溶氧

量、pH 值、氮、磷等)有着紧密的联系。

溶氧量是水体中影响底栖无脊椎动物群落结构的重要因素之一,不同的类群对溶氧量需求不同。任淑智^[51]指出底栖无脊椎动物种类的多样性指数与水中溶氧呈显著正相关关系。Buss 等进行了环境恶化和水质对底栖无脊椎动物群落结构影响的研究,提出溶氧量与底栖无脊椎动物群落有密切的关系^[52]。陈小华等以上海地区为例^[53],选取平原河网地区底栖无脊椎动物作为生物评价基准,认为溶氧量是对河道水质评价的重要指标之一。McClelland 和 Brusven^[54]研究发现蜉蝣目物种的敏感度与栖息生境中溶氧量有着密切的关系。Lemly 对污染河流底栖昆虫群落修复的研究中发现溶氧量是直接影响底栖生物的重要因子^[55]。Negi 和 Mangain^[56]研究了季节变化对底栖无脊椎动物的影响,认为底栖无脊椎动物多样性受水中溶氧量控制。

底栖无脊椎动物群落结构与水体中氮、磷含量紧密联系。吴东浩等^[57]在确定西苕溪上游流域大型底栖无脊椎动物河流营养盐浓度阈值中,发现总氮和总磷的突变点分别为 1.1409 mg/L 和 0.1033—0.1035 mg/L,当总氮和总磷超过各自阈值时会导致大型底栖无脊椎动物群落结构的严重退化。Duran^[58]在土耳其对 Behzat 河用底栖无脊椎动物和物化参数监测水质,发现在夏季河流下游段含有较高的磷酸盐和氮离子,从而导致较低的底栖动物丰度。Bourassa 和 Morin^[59]研究发现无脊椎动物的丰度随着总磷含量变化而变化,认为河流的无脊椎动物群落结构变化与磷含量有关。Feece 和 Richardson^[60]在研究加拿大不列颠哥伦比亚省西南部的大河流、内陆河和海岸的底栖无脊椎动物结构组成的过程中,发现底栖动物的丰度与 $\text{NO}_2\text{NO}_3\text{-N}$ 、pH 值和海拔等环境因子有关外,还和总氮的含量有关。王备新等^[61]对常州地区太湖流域上游水系大型底栖无脊椎动物群落结构特征及其与环境的关系进行了研究,指出总氮和总磷对该地区大型底栖无脊椎动物群落结构的影响较大。除总氮、总磷含量水平外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量也影响底栖无脊椎动物群落结构,如吴东浩研究发现 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影响西苕溪底栖动物分布的关键环境因子^[62]。

水体中 pH 值、浊度、电导等对底栖无脊椎动物群落结构也产生一定的影响。pH 值对底栖无脊椎动物的繁殖能力影响很大,pH 值在 5.0 以下时,底栖无脊椎动物的生物量明显减小,繁殖能力也显著减弱^[63]。Thomsen 和 Friberg^[64]指出,pH 值较低直接影响底栖无脊椎动物的出生率,导致底栖无脊椎动物多样性降低。Clements^[65]、Peiffer 等^[66]认为溪流中 pH 值降低能触发重金属的释放,引起底栖无脊椎动物中毒。蒋万祥等^[67]对香溪河底栖无脊椎动物空间分布进行了研究,发现 pH 值、浊度和电导对九冲河大型底栖动物群落结构影响显著。

3 生物因子

3.1 水生植物

水生植物是河流生境的重要组成部分,可为底栖无脊椎动物提供庇护场、繁殖、栖息场所等优良生境^[68-69],因此能显著影响底栖无脊椎动物群落结构和空间分布。水生植物的存在提高了河流生境的异质性,含有水生植被的水域会有更高的底栖无脊椎动物多样性。Kaenel 等^[70]研究了水生植物的管理对底栖无脊椎动物群落结构的影响,指出清除水生植物后,底栖无脊椎动物的总数下降约 65%;同时建议水生植物只能在夏天清除,并将清除的植物放在河床上为无脊椎动物提供庇护场。Percival 和 Whitehead^[71]、Rooke^[72]也得出在相同的河流,覆盖植物的区域内无脊椎动物的丰富性和多样性比无水生植物区域高。

3.2 竞争和捕食

竞争和捕食也是影响底栖无脊椎动物群落结构的因素,过度的竞争和捕食往往造成物种多样性、次级生产力和取食条件下降,导致底栖无脊椎动物群落结构发生变化。如蜉蝣目、毛翅目、摇蚊和颤蚓类等底栖动物在不同密度下进行的培养实验表明,高密度造成同种或异种个体变小,死亡率增加,世代数减少,从而导致生物量降低^[73]。随着渔业活动越来越频繁,渔民过多的放养捕食种类,捕食作用导致底栖无脊椎动物的生物量急剧下降,对底栖无脊椎动物群落结构造成重大影响。Gilinsky^[74]指出鱼类捕食对底栖无脊椎动物密度和种类数有显著的影响。除此之外,食物量的大小对底栖无脊椎动物群落也有一定的影响。水体中叶绿素和藻类

是底栖无脊椎动物的食物来源之一,当它们的现存量发生剧变时,底栖无脊椎动物数量和生物量也随之发生较大变化^[75]。

4 人为干扰

陈浒等^[76]研究了乌江梯级电站开发对大型底栖无脊椎动物群落结构和多样性的影响,表明梯级水库的修建使底质环境差异变小,底栖动物物种丰度、密度和生物多样性降低,群落类型趋于简单,优势类群表现不明显;并且水库建成的年代越久,底栖动物的丰度、密度就越低,群落的组成类群就越少,物种组成以寡毛类和摇蚊类为主。胡德良和杨华南^[77]研究了热排放对湘江湘潭电厂江段大型底栖无脊椎动物群落结构的影响,发现在强增温区没有底栖无脊椎动物,自然水温在 26℃ 以下的季节里,中、低增温区底栖动物种类和数量比自然水体要丰富,多样性指数值相应增高;但是突然停止温排,增温区内喜温动物有可能受冷冲击而死亡。刘东晓等^[78]研究了城镇化对钱塘江中游支流水质和底栖动物群落结构的影响,结果表明随着城镇化水平提高,城镇溪流表现出高氮、磷营养盐水平、敏感底栖动物物种消失、耐污物种个体数量急剧上升等城镇溪流退化的共性现象。

5 综合因子

实际上,在河流生态系统中,每一个环境因子都不是独立地发挥作用,总是和其他环境因子综合作用于底栖无脊椎动物群落结构。张勇等^[79]对钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响进行了研究,表明底栖无脊椎动物受到流域尺度环境因子和河段尺度环境因子的综合影响;流域尺度的关键环境变量是纬度、海拔、样点所在流域大小、森林用地百分比,河段尺度是总氮、总磷、钙浓度、二氧化硅浓度和平均底质得分。Sharma 等^[80]人研究 Tons 河底栖无脊椎动物时指出,河流流速、水深、浊度、溶氧量和底质类型是共同影响底栖无脊椎动物多样性的环境因子。

6 底栖无脊椎动物群落结构的研究展望

底栖无脊椎动物群落结构特征主要取决于环境因子的特点,环境因子的变化影响底栖无脊椎动物的生长、捕食、繁殖和群落的演替等,并最终使整个群落结构发生变化。由于不同类群底栖无脊椎动物在丰度、密度、生物量和多样性等特征上的不同,能够反映河流生态系统中环境因子的特点。对底栖无脊椎动物群落结构与环境因子的研究不仅是生态学研究的基础,也是河流生态学的主要研究内容之一,同时也为保护底栖无脊椎动物群落和受损河流生态系统修复提供了科学依据。

根据国内外研究现状,不少研究者主要是利用底栖无脊椎动物具有易采集、种类多、对各种干扰反应敏感以及比较容易鉴定等特点,用于对河流生态系统健康进行评价,侧重于对底栖无脊椎动物群落结构与河流水质、底质、温度、水深、生物因子和人为干扰之间关系的研究。但是,对于底栖无脊椎动物群落结构与水流、海拔、和洪水干扰等环境因子的研究较少或者不足,因此,对上述环境因子与底栖无脊椎动物群落结构的关系今后是需要完善和重点研究的内容。在底栖无脊椎动物群落结构与环境因子关系的研究中,应注重研究和了解河流底栖无脊椎动物群落的功能群类型,研究底栖无脊椎动物功能群的时空动态及其与综合性环境因子(包括沉积物结构、氧含量、营养元素、有机物含量、颗粒型有机碳、温度、水流、水质、等等)变化的相互关系;研究不同空间尺度的河流生境异质性及多维环境梯度(从源头到河口的纵向梯度,从河流河道到河漫滩、高地的侧向梯度,上行流、下行流的垂直梯度)对底栖无脊椎动物功能群多样性的影响;加强底栖无脊椎动物功能群对河流的自然和人为干扰响应的研究。

参考文献 (References):

- [1] Niemi G J, McDonald M E. Application of ecological indicators. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2004, 35(1): 89-111.

- [2] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. 生态学报, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [3] Covich A P, Palmer M A, Croel T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems. *BioScience*, 1999, 49(2): 119-127.
- [4] Álvarez-Cabria M, Barquín J, Juanes J A. Macroinvertebrate community dynamics in a temperate European Atlantic river. Do they conform to general ecological theory? *Hydrobiologia*, 2011, 658(1): 277-291.
- [5] Johnson R K, Wiederholm T. Classification and ordination of profundal macroinvertebrate communities in nutrient poor, oligo-mesohumic lakes in relation to environmental data. *Freshwater Biology*, 1989, 21(3): 375-386.
- [6] 李强, 杨莲芳, 吴璟, 王备新. 西苕溪 EPT 昆虫群落分布与环境因子的典范对应分析. 生态学报, 2006, 26(11): 3817-3825.
- [7] 闫云君, 李晓宇. 汉江流域黑竹冲河五种优势摇蚊的周年生产量及营养基础分析. 湖泊科学, 2006, 19(2): 585-591.
- [8] 吴璟, 杨莲芳, 李强, 王备新. 西苕溪中上游流域水生甲虫分布与环境的关系. 应用与环境生物学报, 2008, 14(1): 64-68.
- [9] Arunachalam M, Nair K C M, Vijverberg J, Kortmulder K, Suriyanarayanan H. Substrate selection and seasonal variation in densities of invertebrates in stream pools of a tropical river. *Hydrobiologia*, 1991, 213(2): 141-148.
- [10] Reice S R. The role of substratum in benthic macroinvertebrate microdistribution and litter decomposition in a woodland stream. *Ecology*, 1980, 61(3): 580-590.
- [11] 王强. 山地河流生境对河流生物多样性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [12] Cummins K W. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *American Midland Naturalist*, 1962, 67(2): 477-504.
- [13] 段学花, 王兆印, 程东升. 典型河床底质组成中底栖动物群落及多样性. 生态学报, 2007, 27(4): 1664-1672.
- [14] 王强, 袁兴中, 刘红. 西南山地源头溪流附石性水生昆虫群落特征及多样性——以重庆鱼肚河为例. 水生生物学报, 2011, 35(5): 887-892.
- [15] Hildrew A G, Townsend C R, Henderson J. Interactions between larval size, microdistribution and substrate in the stoneflies of an iron-rich stream. *Oikos*, 1980, 35(3): 387-396.
- [16] Rabeni C F, Minshall G W. Factors affecting microdistribution of stream benthic insects. *Oikos*, 1977, 29(1): 33-43.
- [17] Angradi T R. Inter-habitat variation in benthic community structure, function, and organic matter storage in three Appalachian headwater streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996, 15(1): 42-63.
- [18] Hawkins C P. Substrate associations and longitudinal distributions in species of Ephemerellidae (Ephemeroptera: Insecta) from Western Oregon. *Freshwater Invertebrate Biology*, 1984, 3(4): 181-188.
- [19] Stout R J, Taft W H. Growth patterns of a chironomid shredder on fresh and senescent tag alder leaves in two Michigan streams. *Journal of Freshwater Ecology*, 1985, 3(2): 147-153.
- [20] Ward J V, Stanford J A. Ecological factors controlling stream zoobenthos with emphasis on thermal modification of regulated streams // *The Ecology of Regulated Streams*. US: Springer, 1979: 35-53.
- [21] Hay C H, Franti T G, Marx D B, Peters E J, Hesse L W. Macroinvertebrate drift density in relation to abiotic factors in the Missouri River. *Hydrobiologia*, 2008, 598(1): 175-189.
- [22] Hughes L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(2): 56-61.
- [23] Flourey M, Usseglio-Polatera P, Ferreol M, Delattre C, Souchon Y. Global climate change in large European rivers: long-term effects on macroinvertebrate communities and potential local confounding factors. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1085-1099.
- [24] Kosnicki E, Sites R W. Seasonal predictability of benthic macroinvertebrate metrics and community structure with maturity-weighted abundances in a Missouri Ozark stream, USA. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 704-714.
- [25] Beisel J N, Usseglio-Polatera P, Thomas S, Moreteau J C. Stream community structure in relation to spatial variation: the influence of mesohabitat characteristics. *Hydrobiologia*, 1998, 389(1/3): 73-88.
- [26] Heino J. Lentic macroinvertebrate assemblage structure along gradients in spatial heterogeneity, habitat size and water chemistry. *Hydrobiologia*, 2000, 418(1): 229-242.
- [27] 杨青瑞, 陈求稳. 漓江大型底栖无脊椎动物及其与水环境的关系. 水利水电科技进展, 2010, 30(6): 8-10.
- [28] Leunda P M, Oscoz J, Miranda R, Ariño A H. Longitudinal and seasonal variation of the benthic macroinvertebrate community and biotic indices in an undisturbed Pyrenean river. *Ecological Indicators*, 2009, 9(1): 52-63.
- [29] Nelson S M, Lieberman D M. The influence of flow and other environmental factors on benthic invertebrates in the Sacramento River, U.S.A. *Hydrobiologia*, 2002, 489(1/3): 117-129.
- [30] Nelson S M. Response of stream macroinvertebrate assemblages to erosion control structures in a wastewater dominated urban stream in the southwestern U.S. *Hydrobiologia*, 2011, 663(1): 51-69.
- [31] Patterson M R, Sebens K P, Olson R R. In situ measurements of flow effects on primary production and dark respiration in reef corals. *Limnology*

- and Oceanography, 1991, 36(5): 936-948.
- [32] Kim K, Lasker H R. Flow-mediated resource competition in the suspension feeding gorgonian *Plexaura homomalla* (Esper). Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 215(1): 49-64.
- [33] Abelson A, Denny M. Settlement of marine organisms in flow. Annual Review of Ecology and Systematics, 1997, 28(1): 317-339.
- [34] 孙小玲, 蔡庆华, 李凤清, 杨顺益, 谭路. 春季昌江大型底栖无脊椎动物群落结构及功能摄食类群的空间分布. 应用与环境生物学报, 2012, 18(2): 163-169.
- [35] Li F Q, Cai Q H, Fu X C, Liu J K. 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. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 359-367.
- [36] Junk W J, Bayley P B, Sparks R E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, 1989, 106: 110-127.
- [37] 卢晓宁, 邓伟, 张树清. 洪水脉冲理论及其应用. 生态学杂志, 2007, 26(2): 269-277.
- [38] Tockner K, Malard F, Ward J V. An extension of the flood pulse concept. Hydrological Processes, 2000, 14(16-17): 2861-2883.
- [39] Bayley P B. Factors affecting growth rates of young tropical floodplain fishes: seasonality and density-dependence. Environmental Biology of Fishes, 1988, 21(2): 127-142.
- [40] Roshier D A, Robertson A I, Kingsford R T. Responses of waterbirds to flooding in an arid region of Australia and implications for conservation. Biological Conservation, 2002, 106(2): 399-411.
- [41] Mundahl N D, Hunt A M. Recovery of stream invertebrates after catastrophic flooding in southeastern Minnesota, USA. Journal of Freshwater Ecology, 2011, 26(4): 445-457.
- [42] Bond N R, Downes B J. The independent and interactive effects of fine sediment and flow on benthic invertebrate communities characteristic of small upland streams. Freshwater Biology, 2003, 48(3): 455-465.
- [43] Resh V H, Brown A V, Covich A P, Gurtz M E, Li H W, Minshall G W, Reice S R, Sheldon A L, Wallace J B, Wissmar R C. The role of disturbance in stream ecology. Journal of the North American Benthological Society, 1988, 7(4): 433-455.
- [44] Lake P S. Disturbance, patchiness, and diversity in streams. Journal of the North American Benthological Society, 2000, 19(4): 573-592.
- [45] 汪兴中, 蔡庆华, 李凤清, 段树桂. 南水北调中线水源区溪流大型底栖动物群落结构的时空动态. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 803-807.
- [46] Mishra A S, Nautiyal P, Semwal P. Distributional patterns of benthic macro-invertebrate fauna in the glacier fed rivers of Indian Himalaya. Our Nature, 2013, 11(1): 36-44.
- [47] Carvalho L K, Farias R L, Medeiros E S F. Benthic invertebrates and the habitat structure in an intermittent river of the semi-arid region of Brazil. Neotropical Biology and Conservation, 2013, 8(2): 57-67.
- [48] Loayza-Muro R A, Elias-Letts R, Marticorena-Ruiz J K, Palomino E J, Duivenvoorden J F, Kraak M H S, Admiraal W. Metal-induced shifts in benthic macroinvertebrate community composition in Andean high altitude streams. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 29(12): 2761-2768.
- [49] 渠晓东, 曹明, 邵美玲, 黎道丰, 蔡庆华. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流的大型底栖动物. 应用生态学报, 2007, 18(1): 158-162.
- [50] Carter J L, Fend S V, Kennelly S S. The relationships among three habitat scales and stream benthic invertebrate community structure. Freshwater Biology, 1996, 35(1): 109-124.
- [51] 任淑智. 北京地区河流中大型底栖无脊椎动物与水质关系的研究. 环境科学学报, 1991, 11(1): 31-46.
- [52] Buss D F, Baptista D F, Silveira M P, Nessimian J L, Dorvillé L F M. Influence of water chemistry and environmental degradation on macroinvertebrate assemblages in a river basin in south-east Brazil. Hydrobiologia, 2002, 481(1/3): 125-136.
- [53] 陈小华, 康丽娟, 孙从军, 杨青. 典型平原河网地区底栖动物生物指数筛选及评价基准研究. 水生生物学报, 2013, 37(2): 191-198.
- [54] McClelland W T, Brusven M A. Effects of sedimentation on the behaviour and distribution of riffle insects in a laboratory stream. Aquatic Insects, 1980, 2(3): 161-169.
- [55] Lemly A D. Modification of benthic insect communities in polluted streams: combined effects of sedimentation and nutrient enrichment. Hydrobiologia, 1982, 87(3): 229-245.
- [56] Negi R K, Mangain S. Seasonal variation of benthic macro invertebrates from Tons River of Garhwal Himalaya Uttarakhand. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2013, 16(22): 1510-1516.
- [57] 吴东浩, 于海燕, 吴海燕, 周斌, 王备新. 基于大型底栖无脊椎动物确定河流营养盐浓度阈值——以西苕溪上游流域为例. 应用生态学报, 2010, 21(2): 483-488.
- [58] Duran M. Monitoring water quality using benthic macroinvertebrates and physicochemical parameters of Behzat stream in Turkey. Polish Journal of

- Environmental Studies, 2006, 15(5): 709-717.
- [59] Bourassa N, Morin A. Relationships between size structure of invertebrate assemblages and trophy and substrate composition in streams. Journal of the North American Benthological Society, 1995, 14(3): 393-403.
- [60] Reece P F, Richardson J S. Benthic macroinvertebrate assemblages of coastal and continental streams and large rivers of southwestern British Columbia, Canada. Hydrobiologia, 2000, 439(1/3): 77-89.
- [61] 王备新, 徐东炯, 杨莲芳, 沈丽娟, 虞晖. 常州地区太湖流域上游水系大型底栖无脊椎动物群落结构特征及其与环境的关系. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 47-51.
- [62] 吴东浩, 张勇, 于海燕, 杨莲芳, 王备新. 影响浙江苕溪底栖动物分布的关键环境变量指示种的筛选. 湖泊科学, 2010, 22(5): 693-699.
- [63] LaZerte B D, Dillon P J. Relative importance of anthropogenic versus natural sources of acidity in lakes and streams of central Ontario Canada. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1984, 41(11): 1664-1677.
- [64] Thomsen A G, Friberg N. Growth and emergence of the stonefly *Leuctra nigra* in coniferous forest streams with contrasting pH. Freshwater Biology, 2002, 47(6): 1159-1172.
- [65] Clements W H. Benthic invertebrate community responses to heavy metals in the Upper Arkansas River Basin, Colorado. Journal of the North American Benthological Society, 1994, 13(1): 30-44.
- [66] Peiffer S, Beierkuhnlein C, Sandhage-Hofmann A, Kaupenjohann M, Bar S. Impact of high aluminium loading on a small catchment area (Thuringia slate mining area)-Geochemical transformations and hydrological transport. Water, Air, & Soil Pollution, 1997, 94(3/4): 401-416.
- [67] 蒋万祥, 蔡庆华, 唐涛, 吴乃成, 傅小城, 李凤清, 刘瑞秋. 香溪河大型底栖无脊椎动物空间分布. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2443-2448.
- [68] Cattaneo A, Kalff J. The relative contribution of aquatic macrophytes and their epiphytes to the production of macrophyte beds. Limnology and Oceanography, 1980, 25(2): 280-289.
- [69] Harrod J J. The distribution of invertebrates on submerged aquatic plants in a chalk stream. Journal of Animal Ecology, 1964, 33(2): 335-341.
- [70] Kaenel B R, Matthaei C D, Uehlinger U. Disturbance by aquatic plant management in streams: effects on benthic invertebrates. Regulated Rivers: Research and Management, 1998, 14(4): 341-356.
- [71] Percival E, Whitehead H. A quantitative study of the fauna of some types of stream-bed. Journal of Ecology, 1929, 17(2): 282-314.
- [72] Rooke J B. The invertebrate fauna of four macrophytes in a lotic system. Freshwater Biology, 1984, 14(5): 507-513.
- [73] McAuliffe J R. Resource depression by a stream herbivore: effects on distributions and abundances of other grazers. Oikos, 1984, 42(3): 327-334.
- [74] Gilinsky E. The role of fish predation and spatial heterogeneity in determining benthic community structure. Ecology, 1984, 65(2): 455-468.
- [75] Tokeshi M. Resource utilization, overlap and temporal community dynamics: a null model analysis of an epiphytic chironomid community. Journal of Animal Ecology, 1986, 55(2): 491-506.
- [76] 陈浒, 李厚琼, 吴迪, 秦樊鑫. 乌江梯级电站开发对大型底栖无脊椎动物群落结构和多样性的影响. 长江流域资源与环境, 2010, 19(12): 1462-1469.
- [77] 胡德良, 杨华南. 热排放对湘江大型底栖无脊椎动物的影响. 环境污染治理技术与设备, 2001, 2(1): 25-28.
- [78] 刘东晓, 于海燕, 刘翔孺, 胡尊英, 俞建, 王备新. 城镇化对钱塘江中游支流水质和底栖动物群落结构的影响. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1370-1376.
- [79] 张勇, 刘翔孺, 于海燕, 刘东晓, 王备新. 钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响. 生态学报, 2012, 32(14): 4309-4317.
- [80] Sharma A, Sharma R C, Anthwal A. Surveying of aquatic insect diversity of Chandrabhaga river, Garhwal Himalayas. The Environmentalist, 2008, 28(4): 395-404.