

渭河流域大型底栖动物群落结构 及其与环境因子的关系*

殷旭旺^{1,2} 徐宗学^{1**} 高欣³ 白海锋² 武玮¹ 宋进喜⁴

(¹北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; ²大连海洋大学水产与生命学院辽宁省水生生物学重点实验室, 辽宁大连 116023; ³中国环境科学研究院, 北京 100012; ⁴西北大学城市与环境学院, 西安 710069)

摘要 于2011年10月对渭河流域45个采样点的大型底栖动物进行调查采样. 共采集到大型底栖动物116属(种), 其中水生昆虫91(属)种, 占78.4%; 软体动物12种, 占10.3%; 环节动物9种, 占7.8%; 甲壳动物4种, 占3.4%. 利用大型底栖动物的物种组成以及物种相对丰度数据, 应用双向指示种分析和无偏对应分析将45个样点分为3组. 第1组样点的指示物种为锯形蜉属1种(*Serratella* sp.)、纹石蛾属1种(*Hydropsyche* sp.)和朝大蚊属1种(*Antocha* sp.); 第2组样点指示物种为虻属1种(*Tabanus* sp.)、*Alotanypus venustus*、Pelecorynchidae 1种、*Liodessus* sp. 和霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*); 第3组指示物种为黑翅蜉(*Ephemera nigroptera*)和半球多脉扁螺(*Polypylis hemisphaerula*). 典范对应分析表明, 卵石+砾石型底质、流速、电导率、水深和总氮显著影响了渭河流域底栖动物群落的空间分布.

关键词 渭河 大型底栖动物 空间分布特征 指示物种 环境因子

文章编号 1001-9332(2013)01-0218-09 **中图分类号** Q958.8 **文献标识码** A

Macrobenthos community structure and its relationships with environmental factors in Weihe River basin, Northwest China. YIN Xu-wang^{1,2}, XU Zong-xue¹, GAO Xin³, BAI Hai-feng², WU Wei¹, SONG Jin-xi⁴ (¹College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ²Liaoning Province Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China; ³Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; ⁴College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710069, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 218–226.

Abstract: In October 2011, an investigation was conducted on the macrobenthos at 45 sampling sites in the Weihe River basin of Northwest China. A total of 116 macrobenthos species were collected, of which, 91 species (78.4%) were aquatic insects, 12 species (10.3%) were mollusks, 9 species (7.8%) were annelids, and 4 species (3.4%) were crustaceans. According to the species composition and relative abundance of macrobenthos, the 45 sampling sites could be divided into three groups by using two-way indicator species analysis (TWINSpan) and detrended correspondence analysis (DCA). In the first group, *Serratella* sp., *Hydropsyche* sp., and *Antocha* sp. were the indicator species. In the second group, *Tabanus* sp., *Alotanypus venustus*, one species of Pelecorynchidae, *Liodessus* sp., and *Limnodrilus hoffmeisteri* were the indicator species. In the third group, *Ephemera nigroptera* and *Polypylis hemisphaerula* were the indicator species. The canonical correspondence analysis (CCA) indicated that ‘cobble + boulder’ type substrate, current velocity, water conductivity, water depth, and water total nitrogen content had significant effects on the spatial distribution of macrobenthos in Weihe River basin.

Key words: Weihe River; macrobenthos; spatial distribution characteristics; indicator species; environmental factor.

* 国家水体污染控制与治理重大科技专项(2009ZX07212-002-003)、科技部国际合作项目(2009DFA22980)和国家自然科学基金项目(51279005, 51079123)资助.

** 通讯作者. E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

2012-03-31 收稿, 2012-11-13 接受.

水域生态学主要发源于水生昆虫学和渔业生物学^[1],因此,对水生动物的研究一直是水生态学研究的一个重要部分.大型底栖动物是水生态系统中分布最为广泛的物种之一,不仅是流水水体(河流)同样也是净水水体(湖泊和水库)以及河口生态系统的重要组成部分^[2-4].大型底栖动物以各种附着藻类、悬浮有机物颗粒以及河岸带的凋落物为食物来源,并为处于水生态系统食物链最高级的鱼类提供食物^[5].大型底栖动物的类群组成决定了河流中物质循环和能量流动的方式^[6-8].因此,大型底栖动物群落生态学研究,对河流的保护、利用和管理具有重要的指导作用^[9].

近年来有关渭河流域水生生物群落的调查研究少有报道,本研究选取渭河全流域为研究区域,于2011年10月在渭河全流域布点45个进行采集调查,以期初步了解渭河流域大型底栖动物的空间分布特征以及同环境要素之间的相关性,为渭河流域水域生态学的研究提供基础资料.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

渭河发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,是黄河流域面积最大、水量最多的第一大支流,于陕西潼关汇入黄河.渭河全长818 km,流域面积13.43万km².上游以及北岸泾河、洛河等支流均流经黄土高原,夹带大量泥沙.中、下游渠道纵横,自汉至唐,皆为关中漕运要道.渭河接纳的支流有葫芦河、泾河、洛河等.渭河流域属干旱半干旱大陆性气候,年均温在6~13℃,年降水量500~800 mm,其中6—9月占60%,多为短时暴雨,冬春降水较少,春旱、伏旱频繁.渭河属不对称水系,北岸支流源远流长,主要流经黄土高原,洪枯流量相差悬殊,泥沙含量大,以悬移质为主,是渭河的主要来沙支流;南岸支流较短,主要流经土石山区,比降较大,水流湍急,泥沙以推移质为主,水力资源较为丰富.500 km²以上的一级支流从北岸汇入的有秦祁河、咸河、散渡河、葫芦河、牛头河、通关河、千河、漆水河、泾河、石川河、北洛河,从南岸汇入的有榜沙河、大南河、末加昔河、石头河、黑河、涝河、泮河、灞河.

1.2 样点设置

全流域共设置样点45个,其中,渭河及其支流共设置23个(W₁~W₂₃);泾河及其支流共设置13个(J₁~J₁₃);北洛河及其支流共设置9个(L₁~L₉)(图1).

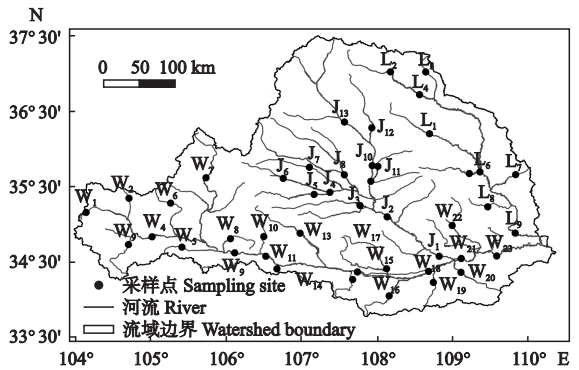


图1 渭河流域采样站点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Weihe River basin.

1.3 采样方法、分类与鉴定

在所选定站点的100 m范围之内,使用索伯网(Surber,网口为30 cm×30 cm,网孔径为500 μm)随机采集2个平行样本.中下游水深较大的样点于近岸处取样.将网内所有采集物经过60目网筛转入300 mL塑料瓶中,并加入90%的酒精溶液保存.在实验室内采用人工挑拣的方法将底栖动物样品转入100 mL的塑料瓶中,同时加入95%的酒精溶液保存待检.在显微镜或解剖镜下进行分类和计数,样品尽量鉴定到属或种.

1.4 水体理化因子测定

每次采集底栖动物之前,先在样点100 m的范围内随机采集2个水体样本,低温保存待测.现场用YSI-85型多参数水质监测仪测定水温、pH、溶解氧、电导率、盐度、悬浮物和总溶解固体.总氮、总磷、碱度、硬度、化学需氧量(COD_{Mn})、硅酸盐均在实验室内测定,测定方法参考《国家地面水环境质量标准(GB 3838—2002)》^[10].现场用MAGELLAN全球定位系统(eXplorist-200)测定海拔及经纬度,使用手持式流速仪(FP111)于采集底栖动物的位置测定水下15 cm的流速^[2].

1.5 栖息地评价

对渭河流域各采样点的栖息地环境质量进行评价时,选取10个栖息地环境质量评价指标(qualitative habitat evaluation index, QHEI),包括底质、栖境复杂性、速度和深度结合特征、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度、河岸土地利用类型等,每项20分,总分200分,共计4个得分等级(健康、较好、一般和较差).所有点位的栖息地评分均由同一位调查者完成,以消除由于人为误差导致的评价结果不一致.各评价指标的判定标准详见文献[11].

1.6 数据处理

大型底栖动物群落划分采用 TWINSpan (two-way indicator species analysis) 及 DCA (detrended correspondence analysis) 结合的方法^[2]. 利用 PCORD 5 进行 TWINSpan 及指示种的分析. 环境因子的 PCA、底栖动物群落的 DCA 以及同环境因子的 CCA (canonical correspondence analysis) 排序分析均使用 CANOCO 4.5. 各环境因子在分析之前先进行 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验. 对不符合正态性假设的数据, 以 $\lg(1+x)$ 进行尝试, 转换后能满足假设的, 以转换后的数据代替进行主成分分析; 仍不能满足的, 仍采用原始数据进行主成分分析. 所有环境变量在分析前通过中心化和标准化使其均数为 0, 标准差为 1. 底栖动物群落数据使用物种的相对丰度, 并且进行 $\lg(1+x)$ 转换, 对转换后的数据矩阵进行 DCA 分析, 若 DCA 分析结果中最大的梯度长度 (length of gradient) 大于 4.0, 则使用 CCA 单峰模型分析群落数据和环境变量之间的关系, 小于 3.0 则使用 RDA (Redundancy analysis) 线性模型, 介于 3.0~4.0 之间两者均可^[12].

使用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 检测 DCA 样点分组之间群落结构的指标, 如物种的丰富度、Shannon 多样性指数以及各个分组的指示种是否存在组间差异. 进行方差分析之前, 对各变量进行 Levene 检验和逐组的 Kolmogorov-Smirnov 检验, 分别确定其方差同质性和分布正态性. 对不能同时满足两项要求的环境变量进行对数转换 $\lg(1+x)$, 转换后能同时满足两项条件的, 对转换后数据进行单因素方差分析; 仍不能满足的, 则用非参数 Kruskal-Wallis 检验^[12]. Levene 检验、Kolmogorov-Smirnov 检验、one-way ANOVA 和 Kruskal-Wallis 检验均使用 SPSS 12.0 完成.

2 结果与分析

2.1 底栖动物群落结构及空间分布格局

2011 年 10 月, 于渭河流域 45 个样点采集并鉴定大型底栖动物 116 (属) 种, 隶属于 7 纲 16 目 56 科. 其中, 水生昆虫 91 (属) 种, 占 78.4%; 软体动物 12 种, 占 10.3%; 环节动物 9 种, 占 7.8%; 甲壳动物 4 种, 占 3.4%. 渭河流域大型底栖动物水生昆虫主要由 EPT 类 (E: 蜉蝣目 Ephemeroptera; P: 襀翅目 Plecoptera; T: 毛翅目 Trichoptera) 和双翅目的摇蚊幼虫组成. 其中, EPT 类水生昆虫共 16 (属) 种, 主要常见种为韦氏四节蜉 (*Baetis vaillanti*)、锯形蜉属 1 种

(*Serratella* sp.)、细裳蜉属 1 种 (*Leptophlebia* sp.)、动蜉属 1 种 (*Cinygma* sp.)、大襀科 1 种 (Pteronarcyidae)、纹石蛾属 1 种 (*Hydropsyche* sp.)、舌石蛾科 1 种 (Glossosomatidae). 摇蚊幼虫共 20 (属) 种, 其中, 常见种为三带环足摇蚊 (*Cricotopus trifasciatus*)、*Aotanypus venustus*、半折摇蚊 (*Chironomus semireductus*). 软体动物常见种为椭圆萝卜螺 (*Radix swinhoei*)、卵萝卜螺 (*Radix ovata*) 和半球多脉扁螺 (*Polypylis hemisphaerula*).

2011 年 10 月的调查结果显示, 全流域单个站点物种数最高为 25 (属) 种, 位于渭河干流 W₁₂ 站点. 该站点海拔 877 m, 底质主要以直径 >64 mm 的砾石和卵石为主. 该站点大型底栖动物全部为水生昆虫, 其中喜清洁水体的 EPT 类水生昆虫有 12 (属) 种, 占 48%.

利用 TWINSpan 和 DCA 分析 2011 年 10 月渭河流域大型底栖动物的空间分布特征. 渭河流域全部样点根据底栖动物群落结构特征的相似性分为 3 组 (图 2). 第 1、2 轴的特征值分别为 0.546 和 0.426. 前 2 个排序轴累积解释了物种数据累积变量的 22.8%, 4 个排序轴总共解释了 31.3%. 第 1 组样点主要由分布于渭河的站点组成, 包括了渭河上游及中游的站点以及下游的个别站点; 第 2 组样点主要由分布于泾河以及洛河中上游的站点组成; 第 3 组样点主要由分布于渭河、泾河以及洛河下游的站点组成. 由于渭河的 W₂₀、W₂₁、W₂₃ 站点以及洛河的 L₉ 站点未采集到底栖动物, 故未对其进行计算.

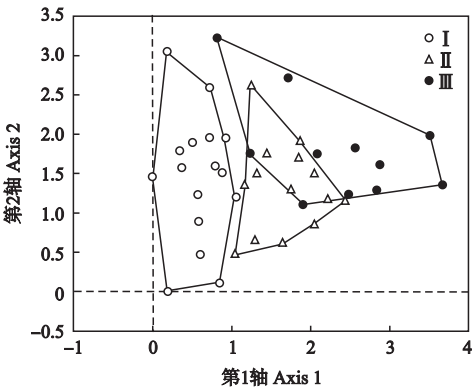


图 2 渭河流域大型底栖动物采样点 DCA 分布图
Fig.2 DCA distribution map of sampling sites in the Weihe River basin.

I: 第 1 组 Group 1 W₁、W₂、W₃、W₄、W₅、W₉、W₁₁、W₁₃、J₁、L₅、L₈、W₁₂、W₁₄、W₁₆、J₈、W₁₀; II: 第 2 组 Group 2 L₂、W₁₇、J₁₂、L₁、L₃、L₄、L₆、J₁₀、J₇、W₈、J₅、J₆、J₁₁、J₄; III: 第 3 组 Group 3 W₆、W₇、W₁₉、J₁₃、L₇、J₂、J₃、W₁₅、W₁₈、W₂₂、J₉. 下同 The same below.

2.2 底栖动物指示生物及优势类群分析

利用 PCORD 5 对 DCA 分析出的 3 组底栖动物进行指示物种分析. 从表 1 可以看出,第 1 组样点的指示物种为锯形蜉属 1 种、纹石蛾属 1 种、朝大蚊属 1 种 (*Antocha* sp.);第 2 组样点指示物种为虻属 1 种、*Alotanypus venustus*、Pelecorhynchidae 1 种、*Liodes-*
sus sp.、霍甫水丝蚓;第 3 组指示物种为黑翅蜉、半球多脉扁螺. 部分指示物种的密度标准差较平均值大,例如,霍甫水丝蚓的标准差 (539.0) 约是丰度 (383.8) 的 1.5 倍,约是中值 (105.6) 的 5 倍,而且,

即便是在同一组的各个站点间差异也较大,表明其分布具有一定的空间差异性^[3,13].

运用 one-way ANOVA 分析渭河流域大型底栖动物优势类群在 DCA 分组中的差异情况,结果见表 2. 其中,水生昆虫 (蜉蝣目和毛翅目)、寡毛类水丝蚓和软体动物存在组间显著差异. 而蜉蝣目锯形蜉属 1 种、毛翅目纹石蛾属 1 种、双翅目朝大蚊属 1 种、虻属 1 种、*Alotanypus venustus*、Pelecorhynchidae 1 种、鞘翅目 *Liodes-*
sus sp.、寡毛类霍甫水丝蚓和软体动物半球多脉扁螺存在组间差异.

表 1 渭河流域大型底栖动物指示种及丰度
Table 1 Indicator species and average density of macrobenthos in the Weihe River basin

组别 Group	指示种 Indicator species	指示值 Indicator value	P 值 P value	平均丰度 Average density (ind · m ⁻²)	
				数值 Value	中值 Median
第 1 组 Group 1	锯形蜉属 1 种 <i>Serratella</i> sp.	31. 2	0. 017	64. 4±56. 3	44. 4
	纹石蛾属 1 种 <i>Hydropsyche</i> sp.	64. 7	0. 001	169. 1±175. 2	150. 0
	朝大蚊属 1 种 <i>Antocha</i> sp.	31. 2	0. 015	78. 9±86. 6	72. 2
第 2 组 Group 2	虻属 1 种 <i>Tabanus</i> sp.	35. 4	0. 014	11. 1±9. 6	5. 6
	<i>Alotanypus venustus</i>	47. 3	0. 003	142. 6±108. 3	144. 4
	Pelecorhynchidae 1 种	21. 4	0. 049	16. 7±5. 6	16. 7
	<i>Liodes-</i> <i>sus</i> sp.	25. 7	0. 034	5. 6±0	5. 6
	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	59. 2	0. 001	383. 8±539. 0	105. 6
第 3 组 Group 3	黑翅蜉 <i>Ephemera nigroptera</i>	26. 8	0. 024	9. 3±3. 2	11. 1
	半球多脉扁螺 <i>Polypylis hemisphaerula</i>	78. 6	0. 000	11. 7±7. 1	11. 1

表 2 渭河流域大型底栖动物物种 DCA 分组样点中物种丰富度、丰度、Shannon 多样性指数及优势类群相对丰度比较
Table 2 Comparison of richness, abundance, Shannon diversity index and relative abundance of dominant taxa in DCA grouping sites of macrobenthos species in Weihe River basin

项目 Item	优势类群 Dominant taxa	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	P 值 P value
物种丰富度 Richness per site		9. 25±5. 98	9. 93±5. 53	7. 55±2. 91	0. 514 ^b
丰度 Abundance (ind · m ⁻²)		840. 63±935. 20	841. 27±786. 49	306. 57±635. 22	0. 082 ^{ab}
Shannon 多样性指数		1. 85±0. 81	1. 99±0. 84	2. 09±0. 51	0. 719 ^b
Shannon diversity index					
相对丰度	水生昆虫 Aquatic insect	95. 68±6. 92	58. 79±26. 19	51. 21±26. 72	0. 000 ^{ac *}
Relative abundance (%)	蜉蝣目 Ephemeroptera	24. 22±24. 74	20. 88±23. 51	5. 63±9. 45	0. 038 ^{ac *}
	锯形蜉属 1 种 <i>Serratella</i> sp.	2. 33±4. 08	0	0	0. 013 ^{ac *}
	黑翅蜉 <i>Ephemera nigroptera</i>	0	0. 02±0. 08	1. 21±2. 66	0. 054 ^{ac}
	毛翅目 Trichoptera	28. 48±26. 12	3. 63±7. 65	6. 60±14. 61	0. 001 ^{ac *}
	纹石蛾属 1 种 <i>Hydropsyche</i> sp.	27. 71±26. 49	3. 63±7. 65	6. 60±14. 61	0. 001 ^{ac *}
	双翅目 Diptera	39. 18±31. 79	24. 98±18. 47	35. 13±30. 81	0. 695 ^{ab}
	朝大蚊属 1 种 <i>Antocha</i> sp.	1. 75±2. 89	0	0	0. 013 ^{ac *}
	虻属 1 种 <i>Tabanus</i> sp.	0. 03±0. 13	3. 04±6. 77	0	0. 020 ^{ac *}
	<i>Alotanypus venustus</i>	1. 16±2. 74	3. 33±4. 83	0. 11±0. 37	0. 006 ^{ac *}
	Pelecorhynchidae 1 种	0	0. 73±2. 01	0	0. 048 ^{ac *}
	鞘翅目 Coleoptera	1. 81±3. 84	1. 32±3. 77	0. 87±2. 73	0. 346 ^{ac}
	<i>Liodes-</i> <i>sus</i> sp.	0	0. 19±0. 38	0. 02±0. 08	0. 049 ^{ac *}
	半翅目 Hemiptera	0. 37±1. 06	3. 88±7. 57	2. 52±3. 64	0. 219 ^{ac}
	寡毛类 Oligochaeta	2. 98±5. 95	39. 32±26. 06	29. 82±27. 57	0. 000 ^{ab *}
	霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	2. 56±5. 97	37. 25±27. 31	19. 40±20. 39	0. 000 ^{ac *}
	软体动物 Molluscs	1. 21±3. 02	1. 22±1. 78	18. 81±20. 04	0. 000 ^{ac *}
	半球多脉扁螺 <i>Polypylis hemisphaerula</i>	0. 32±0. 90	0. 30±0. 65	14. 61±20. 07	0. 000 ^{ac *}
	甲壳动物 Crustacea	0. 10±0. 39	0. 02±0. 08	0. 05±0. 15	0. 966 ^{ac}

a) 数据进行 lg(1+x) 转换 Data transformed lg(1+x); b) 单因素方差分析 one-way ANOVA; c) 非参数检验 Non-parametric test (Kruskal-Wallis test). * P<0.05. 下同 The same below.

2.3 环境变量特征

对各环境变量进行主成分分析(PCA),前2个轴的特征值分别为0.244和0.137,而负载值如表3所示.第1、2主成分分别解释了总的环境变量变异的24.4%和11.7%.前4个主成分共解释了总变异的56.4%.

负载值越高,表明环境变量与主成分的关系越密切.在第1主成分上高负载值的环境变量有:海拔、河宽、水深、流速、流量、栖息地评分、卵石型底质、电导率、盐度、溶解氧、碱度和硬度.第2主成分上高负载值的环境变量有:除上述变量外,还有沙石型底质、硅酸盐和化学需氧量.根据DCA分组情况,第1组样点基本分布在第2象限,该类站点的大

表3 渭河流域各环境因子在PCA分析中前4个主成分上的负载值
Table 3 PCA loadings of each environmental variable on the first four axes for the Weihe River basin

项目 Item	第1主成分 PC 1	第2主成分 PC 2	第3主成分 PC 3	第4主成分 PC 4
海拔 Altitude	0.4367 *	0.5681 *	0.1631	0.3035 *
水温 Water temperature	-0.3328 *	-0.7134 *	-0.1860	-0.1252
河宽 Channel width	-0.4960 *	-0.5908 *	-0.0778	-0.2897
水深 Water depth	-0.3940 *	-0.2346	0.3910 *	-0.1512
流速 Current velocity	-0.5979 *	0.2058	0.2342	-0.1524
流量 Flow	-0.6899 *	-0.4284 *	0.1739	-0.2137
栖息地评分 Habitat score	-0.6187 *	0.1124	0.2327	0.1031
卵石+巨砾石 Cobble plus boulder	-0.6295 *	0.2780	0.0993	0.2813
小卵石+沙砾 Pebble plus gravel	-0.3436 *	0.3245 *	0.3183 *	0.4559 *
淤泥+粘土 Silt plus clay	0.1892	0.2732	-0.1506	-0.1038
沙子 Sand	0.3596 *	-0.5749 *	-0.2988	0.3512 *
基岩 Bedrock	0.2741	-0.0022	0.0049	-0.7792 *
电导率 Conductivity	0.8027 *	0.0863	0.1090	-0.2509
盐度 Salinity	0.8029 *	0.2152	-0.1251	-0.2055
溶解氧 Dissolved oxygen	-0.5414 *	0.6413 *	-0.1830	-0.1576
悬浮物 Seston	0.1159	-0.0488	0.4465 *	-0.2671
总溶解固体 Total dissolved soild	0.1257	-0.2675	0.7134 *	-0.0528
总氮 Total nitrogen	0.2620	-0.3135 *	0.5262 *	-0.0640
总磷 Total phosphorus	-0.1812	0.2202	0.5840 *	-0.1478
碱度 Alkalinity	0.7159 *	-0.1251	0.5275 *	0.2599
硬度 Hardness	0.8247 *	0.2084	0.0449	-0.2903
化学需氧量 COD _{Mn}	0.3617 *	-0.4330 *	0.3405 *	0.3806 *
硅酸盐 Silicate	0.2971	-0.5094 *	-0.2356	0.1541
pH	-0.2543	0.1907	0.1261	-0.2715

型底栖动物主要同流速、卵石型底质、栖息地评分以及溶解氧呈正相关,而同沙石型底质、电导率、高锰酸盐指数、碱度、硬度呈负相关.第2组样点基本分布在第1象限,主要同海拔和淤泥型底质呈正相关,而同河宽、水深、流量及水温呈负相关.第3组样点基本分布在3、4象限,主要同沙石型底质、河宽、电导率、碱度、硬度以及悬浮物呈正相关,同卵石型底质、流速以及栖息地评分呈负相关.综上,第1、2主成分主要代表了从源头和支流上的站点逐步向中下游站点过渡的一个梯度,沿着这个梯度,河流的底质类型逐步由以大粒径的鹅卵石为主过渡到以泥沙为主的底质类型,并且海拔逐步降低,河宽、流速、流量、水温以及栖息地评分都逐步下降;但是某些敏感的水化学指标诸如总氮、电导率、碱度、硬度和化学需氧量随着由上游站点逐步过渡到中下游站点而升高,在近城市的河段达到最大.通过对渭河流域各主要环境变量的主成分分析,可以确定渭河流域上游站点受人为干扰较小,中下游由于城市和农业用地面积的增加,人为干扰强度逐步上升.

对渭河流域大型底栖动物DCA分组站点环境因子的比较结果显示,共有8个环境变量存在组间差异,分别为盐度、溶解氧、总溶解颗粒、总氮、总磷、硬度、硅酸盐和卵石+巨砾石底质类型(表4).

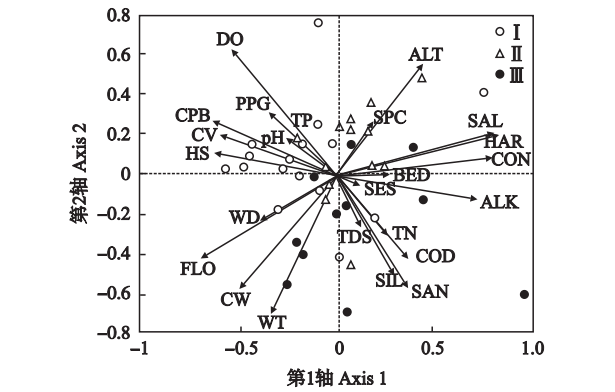


图3 渭河流域环境变量的主成分分析
Fig. 3 PCA of the environmental variables in the DCA grouping sites of macrobenthos species in Weihe River basin.
ALT:海拔 Altitude; WT:水温 Water temperature; CW:河宽 Channel width; WD:水深 Water depth; CV:流速 Current velocity; FLO:流量 Flow; HS:栖息地评分 Habitat score; WCPB:卵石+巨砾石 Cobble plus boulder; PPG:小卵石+沙砾 Pebble plus grave; SPC:淤泥+粘土 Silt plus clay; SAN:沙子 Sand; BED:基岩 Bedrock; CON:电导率 Conductivity; SAL:盐度 Salinity; DO:溶解氧 Dissolved oxygen; SES:悬浮物 Seston; TDS:总溶解固体 Total dissolved solids; TN:总氮 Total nitrogen; TP:总磷 Total phosphorus; ALK:碱度 Alkalinity; HAR:硬度 Hardness; COD:化学需氧量 COD_{Mn}; SIL:硅酸盐 Silicate. 下同 The same below.

表 4 渭河流域大型底栖动物 DCA 分组样点的环境因子比较

Table 4 Comparison of environmental factors in the DCA grouping sites of macrobenthos species in Weihe River basin

项目 Item	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	P 值 P value
海拔 Altitude (m)	1113.4±525.7	1098.9±272.2	920.7±458.1	0.485 ^b
水温 Water temperature (℃)	13.0±2.6	11.6±2.1	13.1±2.8	0.202 ^b
pH	8.4±0.2	8.4±0.4	8.2±0.3	0.195 ^b
电导率 Conductivity (μS·cm ⁻¹)	861.5±979.8	1057.2±1006.2	1224.1±1240.2	0.408 ^{ab}
盐度 Salinity (‰)	0.5±0.7	0.8±0.8	0.7±0.8	0.000 ^{ac*}
溶解氧 Dissolved oxygen (mg·L ⁻¹)	7.9±0.8	7.1±0.1	5.8±2.0	0.001 ^{b*}
悬浮物 Seston (mg·L ⁻¹)	1.1±2.4	0.4±0.4	2.1±4.8	0.562 ^{ac}
总溶解固体 Total dissolved solid (mg·L ⁻¹)	264.0±185.8	395.3±213.0	836.1±805.9	0.013 ^{ab*}
总氮 Total nitrogen (mg·L ⁻¹)	84.7±55.1	129.8±81.8	179.9±59.5	0.008 ^{b*}
总磷 Total phosphorus (mg·L ⁻¹)	53.4±28.1	47.5±19.1	51.1±28.4	0.003 ^{b*}
碱度 Alkalinity (mg·L ⁻¹)	162.3±56.6	208.8±29.9	227.2±121.8	0.077 ^{ac}
硬度 Hardness (mg·L ⁻¹)	207.3±300.4	320.6±198.7	280.4±225.7	0.019 ^{ab*}
化学需氧量 COD _{Mn} (mg·L ⁻¹)	4.3±1.2	4.5±1.8	6.6±4.1	0.064 ^{ab}
硅酸盐 Silicate (mg·L ⁻¹)	9.3±1.9	11.0±2.9	11.7±4.2	0.013 ^{b*}
栖息地评分 Habitat score	116.9±20.4	103.7±22.4	99.8±19.1	0.085 ^b
河宽 Channel width (m)	46.7±44.5	16.3±11.1	51.0±43.1	0.095 ^{ab}
水深 Water depth (cm)	27.5±9.6	27.0±12.8	32.0±21.5	0.991 ^{ac}
流速 Current velocity (m·s ⁻¹)	0.7±0.4	0.6±0.2	0.5±0.3	0.647 ^{ab}
流量 Flow (m ³ ·s ⁻¹)	7.2±6.2	2.5±2.7	12.3±18.9	0.088 ^{ab}
卵石+巨砾石 Cobble plus boulder (%)	38.4±26.3	15.3±13.2	15.7±20.4	0.009 ^{ab*}
小卵石+沙砾 Pebble plus gravel (%)	34.6±24.8	42.9±32.7	21.8±27.0	0.194 ^b
淤泥+粘土 Silt plus clay (%)	0	7.1±18.2	0	0.138 ^{ac}
沙子 Sand (%)	20.8±33.3	13.3±25.8	35.3±37.4	0.410 ^{ac}
基岩 Bedrock (%)	6.25±25.0	21.4±42.6	27.2±46.7	0.323 ^{ac}

2.4 影响底栖动物空间分布的主要环境因子的识别

将渭河流域环境因子同底栖动物结构数据进行 CCA 分析,从表 5 可以看出,前 2 个排序轴的特征值分别为 0.355 和 0.270. 不同环境因子对 CCA 轴的贡献不同. 前 4 个轴表达了环境因子 66.8% 的信息,其中,第 1 轴的贡献率最大,达 22.9%. 通过对环境因子的 *t* 检验,排除一些贡献小的因子(表 6),保留卵石+巨砾石、流速、电导率、水深、总氮(图 4).

表 5 CCA 分析中各轴的重要值、物种变量以及物种-环境因子的累积百分数

Table 5 Eigenvalue of each axis, cumulative percentage of species and species-environmental variables in CCA

轴 Axis	重要值 Eigenvalue	物种-环境 因子相关性 Species- environment correlation	物种变量 累积百分数 Cumulative percentage of species data variance	物种-环境变量 累积百分数 Cumulative percentage of species- environment variance
1	0.355	0.866	7.9	22.9
2	0.270	0.843	14.0	40.4
3	0.243	0.739	19.4	56.1
4	0.165	0.655	23.1	66.8

结果显示,卵石+巨砾石型底质类型和流速主要影响了全流域蜉蝣目和毛翅目类等水生昆虫的分布,电导率和总氮影响了寡毛类水丝蚓的分布,水深主要影响了软体动物的分布.

表 6 CCA 分析中影响底栖动物群落分布的环境因子的统计信息

Table 6 Statistical information of environmental variables which influenced the distribution of macrobenthos in CCA

项目 Item	环境因子筛选 Forward selection of environmental variables		环境因子同前 2 个轴的相关系数 Coefficient of selected environmental variables and the first two axes	
	F 值 F value	P 值 P value	轴 1 Axis 1	轴 2 Axis 2
卵石+巨砾石 Cobble plus boulder	1.76	0.012	-0.790	-0.296
流速 Current velocity	1.74	0.022	0.824	-0.344
电导率 Conductivity	1.66	0.023	0.155	-0.533
水深 Water depth	1.61	0.032	-0.431	0.303
总氮 Total nitrogen	1.43	0.041	0.404	0.002

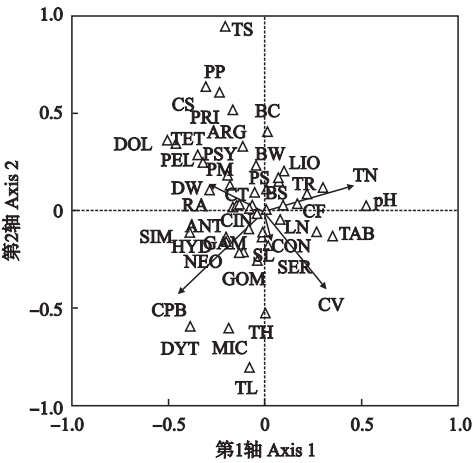


图4 渭河流域环境因子同物种组成的 CCA 分析双序图

Fig.4 CCA biplot of environmental variables and species composition in the Weihe River basin.

TS:中华颤蚓 *Tubifex sinicus*; CS:半折摇蚊 *Chironomus semireductus*; PRI:*Prionocera* sp.; BC:中国小豆螺 *Bythinella chinensis*; TET:*Tetanocera* sp.; ARG:*Argia extrauea*; DOL:长足虻科 *Dolichopodidae*; PEL:曲臂虻科 *Pelecorhynchidae*; PSY:*Psychoda* sp.; BW:葦氏白勃石蛭 *Barbronia weberi*; PM:秀丽白虾 *Palaemon modestus*; RS:椭圆萝卜螺 *Radix swinhoi*; LIO:*Liodesuss* sp.; TR:流水长跗摇蚊 *Tanytarsus Rheotanytarsus*; CT:三带环足摇蚊 *Cricotopus trifasciatus*; BS:苏式尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi*; RA:耳萝卜螺 *Radix auricularia*; CF:速疾环足摇蚊 *Cricotopus fugax*; PH:半球多脉扁螺 *Polypylis hemisphaerula*; CIN:动蜉属 1 种 *Cinygma* sp.; GLO:舌石蛾属 1 种 *Glossosoma* sp.; LH:霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri*; SIM:蚋属 1 种 *Simulium* sp.; AN:朝大蚊属 1 种 *Antocha* sp.; GAM:钩虾属 1 种 *Gammarus* sp.; TAB:虻属 1 种 *Tabanus* sp.; HYD:纹石蛾属 1 种 *Hydropsyche* sp.; SL:射线裂脊蚌 *Schistodesmus lampreyanus*; NEO:*Neelmis* sp.; GOM:箭蜉属 1 种 *Gomphus* sp.; SER:锯形蜉属 1 种 *Serratella* sp.; TH:*Tricula humida*; DYT:龙虱科 *Dytiscidae*; MIC:*Microvelia* sp.; TL:裂片长跗摇蚊 *Tanytarsus lobatufrons*; PP:*Palpomyia pruinescens*.

3 讨 论

3.1 大型底栖动物群落结构及环境因子特征

结合环境因子的主成分分析,渭河流域从源头到中下游站点主要以人类活动强度和自然环境因子的梯度变化为主要表现形式,体现在海拔、河流宽度、水深、流速及流量随上游到中下游逐步增大,而河流的底质类型从以直径较大的卵石和砾石为主过渡到以直径逐渐减小的卵石和小砾石为主,下游站点则完全以淤泥或者泥沙为主;水环境因子诸如总氮、电导率、化学需氧量及水体硬度和碱度等逐步增加.大型底栖动物的群落组成与水动力学指标及人类活动强度的显著相关性证明了之前的研究结果,即水动力学指标、底质类型及水体理化因子是影响大型底栖动物空间分布的主要因素^[14-15].

渭河流域的大型底栖动物主要以水生昆虫(蜉蝣目、毛翅目、襁翅目、双翅目、鞘翅目)、寡毛类环虫及软体动物为主,一些广布种也在本调查有所

发现,如四节蜉属(*Baetis*)、纹石蛾属(*Hydropsyche*)主要分布在 DCA 第 1 组的上游支流站点,该类站点主要的环境因子特征为高溶解氧、卵石+砾石型底质、流速快、流量大、栖息地评分高等.其他广布种如霍甫水丝蚓等寡毛类环虫及半球多脉扁螺等软体动物则主要分布在 DCA 第 2、3 组的中下游站点,该类站点主要以河宽、淤泥及泥沙底质类型、高电导率及高硬度等为特征(图 3).有研究表明,随着河流级别的增加,物种丰富度随之增加,并在中间级别的站点达到最大,而后降低^[16].本研究结果与之近似,物种丰富度在中游站点(第 2 组样点)达到最大,而后在下游站点(第 3 组样点)降到最低.

3.2 环境因子同底栖动物群落结构的关系

作为影响河流生态系统的主要因子,如本研究中的河道形态及水体理化指标等环境变量在全流域范围内的变化非常显著.其中一些环境变量同其他变量之间存在着一定的相关性,因此,在强调和解释单个变量同物种分布之间的关系时应更加慎重.而本研究中所涉及的主要环境变量通过数据分析和和其他研究被证实为影响群落结构的指示因子,宜于更广泛地应用于其他流域或者地区^[15,17-21].

有研究表明,河流的底质类型不仅影响大型底栖动物的群落分布,而且也是一个较为方便测量的指示因子^[15,22-27].在 CCA 的进一步筛选结果中,卵石+砾石型底质对底栖动物的分布起到了最重要的影响作用.附石性的水生昆虫幼虫(蜉蝣目、毛翅目、襁翅目)在多石的底质类型以及流速较快的站点密度较大,淤泥和泥沙类的底质类型则更适合寡毛类及软体动物存活,而该类站点则主要以电导率高、水深等为主要特征,表明电导率和水深是显著影响上述两种类群的环境因子^[28].由于具有大量的孔隙,卵石+砾石类底质可以为底栖动物提供应对非生物扰动和生物间相互作用的缓冲场所,从而对底栖动物的分布具有重要影响^[29].此外,因为能为成虫提供产卵场所、为幼虫提供保护以及为固着生物提供栖息地等,该底质通过为底栖动物提供庇护而提高了物种的丰度^[15].在水生态系统中,氮、磷是衡量水体富营养化程度的关键指标,其含量影响底栖动物分布,其中氮为主要制约因素^[3].总氮在河流中作为重要的营养盐指标能够显著影响大型底栖动物的物种组成和分布^[30].

近些年,越来越多的学者将注意力逐步放在流域性与局部变量对河流生态系统的影响上,一些研究结果支持用流域性的变量替代水环境因子作为预

测水生生物群落分布的环境因子,也有一些学者持不同意见^[15]。本研究中,尽管流速和水深作为显著影响底栖动物分布的环境因子在 CCA 分析中被保留下来,但是其他一些被认为是同样可以影响群落分布的因子如海拔和河宽并未呈现显著的影响效果。

Marshall 和 Elliott^[31]将影响生物群落结构的变量分为 3 类:环境因子、生物间的相互作用以及生物因子可以影响环境因子的方式。而大多数的多元变量分析主要关注环境因子。本研究中涉及到的环境变量有限,且不足以解释物种的大多数变化。CCA 分析结果显示,还有近 50% 有关物种组成和环境变量之间的相关性研究并未被涉及。因此,其他环境因子诸如沉积物中的重金属含量^[32]、食物资源的可用性(附着藻类、枯叶作为食物)^[33]、物种间的作用^[34]、土地利用类型及河岸带植被均需要在今后的研究中作为影响底栖动物分布的因素而加以考虑^[35-36]。

参考文献

- [1] Cai Q-H (蔡庆华), Wu G (吴刚), Liu J-K (刘建康). Watershed Ecology: A new approach for diversity research and conservation of aquatic ecosystem. *Science & Technology Review* (科技导报), 1997 (5): 24–26 (in Chinese)
- [2] Qu X-D (渠晓东), Cao M (曹明), Shao M-L (邵美玲), *et al.* Macrobenthos in Jinping reach of Yanglongjiang River and its main tributaries. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18** (1): 158–162 (in Chinese)
- [3] Gao X (高欣), Niu C-J (牛翠娟), Hu Z-J (胡忠军). Macrobenthos community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22** (12): 3329–3336 (in Chinese)
- [4] Zhu X-J (朱晓君), Lu J-J (陆健健). Functional groups of zoobenthos in the intertidal zone of Jiuduansha, the Yangtze River estuary. *Zoological Research* (动物学研究), 2003, **24** (5): 355–361 (in Chinese)
- [5] Rosi-Marshall EJ, Wallace JB. Invertebrate food webs along a stream resource gradient. *Freshwater Biology*, 2002, **47**: 129–141
- [6] Higgins RP, Thiel H. Introduction to the Study of Meiofauna. Washington D. C.: Smithsonian Institution Press, 1988
- [7] Hutchinson GE. A Treatise on Limnology. New York: John Wiley and Sons Inc., 1993
- [8] Townsend CR, Thompson RM, McIntosh AR, *et al.* Disturbance, resource supply and food-web architecture in streams. *Ecology Letters*, 1998, **1**: 200–209
- [9] Heino J, Muotka T, Mykra H, *et al.* Defining macroinvertebrate assemblage types of headwater streams: Implications for bioassessment and conservation. *Ecological Applications*, 2003, **13**: 842–852
- [10] State Environmental Protection Administration (国家环境保护总局), General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (国家质量监督检验检疫总局). Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838–2002). Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [11] Zheng B-H (郑丙辉), Zhang Y (张远), Li Y-B (李英博). Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2007, **27** (6): 928–936 (in Chinese)
- [12] Yu HC, Xian WW. The environment effect on fish assemblage structure in water adjacent to the Changjiang (Yangtze) River estuary (1998–2001). *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, **27**: 443–456
- [13] Gao F (高峰), Yin H-B (尹洪斌), Hu W-P (胡维平), *et al.* Ecological characteristics of macrobenthos communities in Chaohu Basin in spring and their relationship with environmental factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21** (8): 2132–2139 (in Chinese)
- [14] Qu XD, Tang T, Xie ZC, *et al.* Distribution of the macroinvertebrate communities in the Xiangxi River system and relationships with environmental factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, **20**: 233–238
- [15] Jiang XM, Xiong J, Qiu JW, *et al.* Structure of macroinvertebrate community in relation to environmental variables in a subtropical Asian river system. *International Review of Hydrobiology*, 2010, **95**: 42–57
- [16] Minshall GW, Petersen RC, Nimz CF. Species richness in streams of different size from the same drainage basin. *American Naturalist*, 1985, **125**: 16–38
- [17] Reice SR. The role of substratum in benthic macroinvertebrate microdistribution and litter decomposition in a woodland stream. *Ecology*, 1980, **61**: 580–590
- [18] Starck JD. Performance of the macroinvertebrate community index: Effects of sampling method, sample replication, water depth, current velocity, and substratum on index values. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1993, **27**: 463–478
- [19] Heino J. Lentic macroinvertebrate assemblage structure along gradients in spatial heterogeneity, habitat size and water chemistry. *Hydrobiologia*, 2000, **418**: 229–242
- [20] Cortes RMV, Ferreira MT, Oliveira SV, *et al.* Macroinvertebrate community structure in a regulated river segment with different flow conditions. *River Research and Applications*, 2002, **18**: 367–382
- [21] Kaller MD, Kelso WE. Association of macroinvertebrate assemblages with dissolved oxygen concentration and wood surface area in selected subtropical streams of the southeastern USA. *Aquatic Ecology*, 2007, **41**: 95–110
- [22] Hawkins CP, Murphy ML, Anderson NH. Effect of canopy, substrate composition, and gradient on the structure of macroinvertebrate communities in Cascade Range stream of Oregon. *Ecology*, 1982, **63**: 1840–1856

- [23] Culp JM, Walde SJ, Davies RW. Relative importance of substrate particle size and detritus to stream benthic macroinvertebrate microdistribution. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1983, **40**: 1568–1574
- [24] Minshall GW. Aquatic insect substratum relationships// Resh VH, Rosenberg DM. The Ecology of Aquatic Insects. New York: Praeger Publishers, 1984: 358–400
- [25] Ormerod SJ, Edwards RW. The ordination and classification of macroinvertebrate assemblages in the catchments of the River Wye in relation to environmental factors. *Freshwater Biology*, 1987, **17**: 533–546
- [26] Collier KJ, Wilcock RJ, Meredith AS. Influence of substrate type and physico-chemical conditions on macroinvertebrate faunas and biotic indices of some lowland Waikato, New Zealand, streams. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1998, **32**: 1–19
- [27] Buss DF, Baptista DF, Nessimian JL, *et al.* Substrate specificity, environmental degradation and disturbance structuring macroinvertebrate assemblages in neotropical streams. *Hydrobiologia*, 2004, **518**: 179–188
- [28] Miserendino ML. Macroinvertebrate assemblages in Andean Patagonian rivers and streams: Environmental relationships. *Hydrobiologia*, 2001, **444**: 147–158
- [29] Beisel JN, Usseglio-Polatera P, Thomas S, *et al.* Stream community structure in relation to spatial variation: The influence of mesohabitat characteristics. *Hydrobiologia*, 1998, **389**: 73–88
- [30] Wu D-H (吴东浩), Yu H-Y (于海燕), Wu H-Y (吴海燕), *et al.* Estimation of river nutrients thresholds based on benthic macroinvertebrate assemblages a case study in the upper reaches of Xitiao Stream in Zhejiang, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(2): 483–488 (in Chinese)
- [31] Marshall S, Elliott M. Environmental influences on the fish assemblage of the Humber estuary, U. K. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **46**: 175–184
- [32] Clements WH. Benthic invertebrate community responses to heavy metals in the Upper Arkansas River Basin, Colorado. *Journal of the North American Benthological Society*, 1994, **13**: 30–44
- [33] Richardson JS. Food, microhabitat, or both? Macroinvertebrate use of leaf accumulations in a montane stream. *Freshwater Biology*, 1992, **27**: 169–176
- [34] Englund G, Sarnelle O, Cooper SD. The importance of data-selection criteria: Meta analysis of stream predation experiments. *Ecology*, 1999, **80**: 1132–1141
- [35] Zampella PA, Bunnell JF, Procopio NA, *et al.* Macroinvertebrate assemblages in blackwater streams draining forest land and active and abandoned cranberry bogs. *Wetlands*, 2008, **28**: 390–400
- [36] Dudgeon D. The influence of riparian vegetation on macroinvertebrate community structure in four Hong Kong streams. *Journal of Zoology*, 1988, **216**: 609–627

作者简介 殷旭旺,男,1980年生,副教授.主要从事水域生态学研究. E-mail: yinxuwang@dlou.edu.cn

责任编辑 肖红
