

DOI: 10.5846/stxb201809011865

李丽娟, 崇祥玉, 盛楚涵, 殷旭旺, 徐宗学, 张远. 太子河大型底栖动物摄食功能群对河岸带土地利用类型的响应研究. 生态学报, 2019, 39(22):

Li L J, Chong X Y, Sheng C H, Yin X W, Xu Z X, Zhang Y. Response of riparian land-use types to functional groups of benthic macroinvertebrates in Taizi River, Liaoning Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22):

太子河大型底栖动物摄食功能群对河岸带土地利用类型的响应研究

李丽娟¹, 崇祥玉¹, 盛楚涵¹, 殷旭旺^{1,*}, 徐宗学², 张 远³

1 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, 大连 116023

2 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

3 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 流域水生态保护技术研究室, 北京 100012

摘要:为研究太子河大型底栖动物摄食功能群对河岸带土地利用类型的响应关系,于2012年5月对太子河流域底栖动物和水环境因子和土地利用类型进行野外调查及数据分析。结果表明:1)太子河流域底栖动物群落在4种不同土地利用类型内具有极显著差异,平均丰度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数在森林用地中最高,分别为8.86、0.73和0.94,平均密度在森林耕作用地中最高(782.75个/m²),除食碎屑者功能群(S),其他摄食功能群在不同土地利用类型内无差异($P>0.05$)。2)太子河土地利用类型与水环境因子之间的 Pearson 分析表明,森林用地与 EC、TDS、TN、NH₃-N、COD_{Mn} 之间呈显著负相关性,与 DO、IOS 之间呈显著正相关性;耕地与 DO 和 IOS 之间呈显著负相关性;城镇用地与 EC、TDS 和 TN 之间呈正相关性。3)太子河土地利用类型与底栖动物功能群之间的 Spearman 分析表明森林用地与食碎屑者(S)、刮食者(SC)和收集者(GC)呈正相关性。耕地与食碎屑者(S)、滤食者(FC)之间呈负相关性,城镇用地与刮食者(SC)和收集者(GC)之间呈显著负相关性。4)底栖动物功能群和水环境因子之间的典范对应分析表明,食碎屑者(S)功能群主要受底质指数(IOS)驱动,其他功能群与环境因子之间无相关性。因此,水环境因子和底栖动物群落参数比摄食功能群更能反映人类活动对土地利用的改变,水环境和底栖动物群落研究可为河岸带土地利用保护提供理论依据。

关键词:土地利用类型;大型底栖动物;摄食功能群;环境因子

Response of riparian land-use types to functional groups of benthic macroinvertebrates in Taizi River, Liaoning Province

LI Lijuan¹, CHONG Xiangyu¹, SHENG Chuhan¹, YIN Xuwang^{1,*}, XU Zongxue², ZHANG Yuan³

1 Liaoning Provincial Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

2 College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

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

Abstract: River ecosystems are the most affected habitats globally by human activities, such as the changes of land use in the riparian of river. Macroinvertebrate is an important component of aquatic organisms in freshwater ecosystems and is an important biological indicator of bio-assessment in rivers. Macroinvertebrates have been widely used to evaluate the interference and impact of human activities on river ecosystems. Here, we aim to understand the effects of different land use types on the feeding function groups of macroinvertebrate and to evaluate the responses of macroinvertebrates to changes of

基金项目:辽宁省优秀人才支持计划项目(LR2015009);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07202012);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1807228)

收稿日期:2018-09-01; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinxuwang@dlou.edu.cn

riparian land use types in the Taizi River Basin (TRB). Based on data of 42 sites, we found that the macroinvertebrate communities were significantly different in four land use types. The average abundance, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness of macroinvertebrates were the highest values in the forest land with 8.86, 0.73 and 0.94, respectively. There were significant negative correlations of forest land and EC, TDS, TN, $\text{NH}_3\text{-N}$, and COD_{Mn} using Pearson analysis, and between farmland and DO, IOS. By Spearman analysis, the results indicated that forest land was positively correlated with shredders, scrapers and collector-gatherers, while farmland was negatively correlated with shredders and collector-filterers. Canonical correspondence analysis showed that shredders were mainly driven by IOS. In general, the environmental factors and macroinvertebrate community reflect change of human activities more effectively than the functional groups based on our study. The research on water environment and macroinvertebrate community structure can provide a theoretical basis for riparian land use protection.

Key Words: land use; macroinvertebrate; feeding function group; environment factors

在河流生态系统中,河岸带土地利用类型的变化对水环境和水生生物有着重要影响^[1-2]。近几十年来,世界上大部分地区的河流生态系统遭受到严重退化,造成其退化的主要原因是周围人类活动导致河岸土地利用类型发生变化,进而影响到河流水环境质量和水生生物多样性^[3]。在世界范围内的土地利用类型变化中,农业用地在河岸带所占比例较大,研究^[4]表明农业是全球土地利用类型变化的主要驱动因素,大量的耕种造成森林和湿地的退化,严重威胁了河流生态系统的健康发展。因此,研究河岸带土地利用类型与水环境和水生生物之间的关系对于保护河流生态系统健康尤为重要。已有研究通过水生生物的物种指示作用及群落组成来评估河流生态系统在时间和空间上的潜在变化^[5-6]。

大型无脊椎底栖动物是淡水生态系统的重要组成部分,是河流生物评价中的重要生物指示类群之一。它们具有生命周期长、迁移能力弱、易于采集和鉴定、对环境变化响应敏感等特点^[7-9],被广泛应用于评价人类活动对河流生态系统的干扰和影响^[10-12]。底栖动物功能群是具有相同生态功能的底栖动物的组合^[13-14],近几十年来,基于其获取食物来源的形态学和行为适应的摄食功能群(FFG)分类方法已经作为评估环境条件对水生生物影响的重要工具^[15]。FFG既可以反映大型底栖动物的群落结构特征和生境适应性特征,也可以反映人类活动的干扰程度及河流生态系统受损状况^[16-17]。FIERRO等^[18]发现人类活动导致土地利用的改变对河流生物多样性有很大的影响,尤其是对河岸带植物多样性、水环境质量和底栖动物群落结构等方面的改变;底栖动物群落多样性在原始森林区最高,在农业用地区 and 人工种植林区最低,且指示种以非昆虫物种为主;对底栖动物摄食功能群的研究表明收集者功能群丰度在摄食功能群中所占比例最大,但摄食功能群在不同土地利用内没有差异性。Yamada等^[19]研究表明底栖动物的群落结构模式和功能群组成有不同的影响因素,即使底栖动物生活在同一个生态系统中,但其群落结构和功能群组成是由不同机制决定的,主要取决于生态特性,例如其分散能力和微生境等。Miserendino等^[15]研究表明在城镇用地内底栖动物收集者功能群的密度最高,农业用地内滤食者功能群和收集者功能群的密度最高,而森林用地内滤食者功能群和植食者功能群的密度均较高。

本研究旨在研究流域内四种土地利用类型(森林用地、森林耕作用地、耕地和城镇建设用地)对水环境的影响,重点是评估底栖动物摄食功能群对河岸带土地利用类型的响应关系,同时提出河岸缓冲区的合理土地利用方式,以期当地环境保护机构进行有效的河岸管理和水生生物保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和采样点设置

太子河流域(122°30'E—124°50'E、40°30'N—41°40'N)位于我国辽宁省东部,干流全长 413 km,流域面积 13880 km²,属于温带季风气候,四季分明,年内温差较大,降雨多集中在 6—8 月,占全年总降雨量的 71.2%;

水系发源于辽宁省新宾县境内的长白山脉,向西流经本溪、辽阳、鞍山三市,在三岔河与浑河汇合形成大辽河后至营口注入渤海^[20](图 1)。太子河流域四种土地利用类型的划分(森林用地、森林耕作用地、耕地和城镇建设用地)参照李丽娟等^[21]。于 2012 年 5 月,对太子河流域进行底栖动物样品采集和野外调查研究,该流域共设置采样点位 42 个,采样点设置如图 1。其中,森林用地、森林耕作用地、耕地和城镇建设用地中采样点位分别为 6 个、19 个、9 个、8 个。

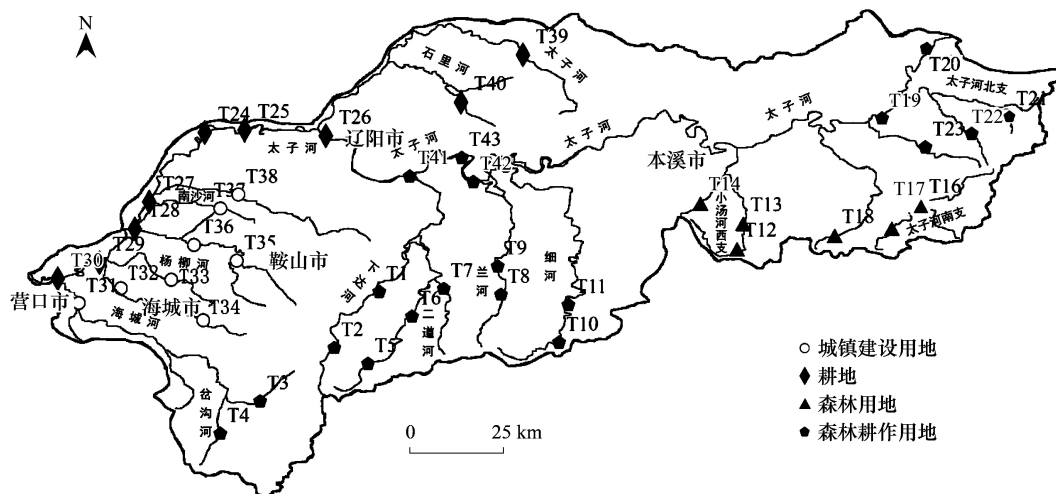


图 1 太子河 42 个采样点在 4 种土地利用类型中的分布

Fig.1 Location of the 42 sampling sites distributed in four land use types of Taizi River

1.2 底栖动物样品采集与鉴定

于 2012 年 5 月,对太子河四种土地利用类型中的 42 个点位进行底栖动物样品采集(图 1),使用索伯网(Surber net,网口尺寸为 30 cm×30 cm,网孔径为 500 μm)或彼得逊采泥器(1/16)完成样品采集,在每个样点的 100m 范围之内随机采集 2 个平行样本,现场挑出底栖动物,并用 90%的酒精固定,然后带回实验室进行鉴定。参考相关文献^[22-27],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。

1.3 水环境调查

太子河河岸带各采样点水体的电导率(EC)、总溶解固体(TDS)、溶解氧(DO)和 pH 采用水质分析仪(YSI Pro 2000, YSI, 美国)现场测定;水深使用流速仪现场测定;底质含沙量用底质分样筛网(孔径分别为 16、8、4、2、1 mm)测定;底质指数特征 IOS(Index of Substrate, 底质指数)(巨砾>256 mm, 鹅卵石 256 mm>64 mm, 碎石 64 mm>4 mm, 淤泥<4 mm)。IOS^[28]计算公式: $IOS = 0.08\%V_{\text{漂石}} + 0.07\%V_{\text{大卵石}} + 0.06\%V_{\text{小卵石}} + 0.05\%V_{\text{大圆石}} + 0.04\%V_{\text{小圆石}} + 0.03\%V_{\text{粗砾}} + 0.02\%V_{\text{细砾}} + 0.01V_{\text{砂}}$ (V 为测量出不同底质类型的体积,升);另采集一份 2 L 水样,在低温(4 ℃)条件下送回实验室,根据《水和废水监测分析方法》^[29]测定悬浮物(SS)、COD_{Mn}(高锰酸盐指数)、TP(总磷)、TN(总氮)、NH₃-N(氨氮)。

1.4 数据分析

根据以往研究^[15,18,19],根据食性将底栖动物分为食碎屑者(S)、刮食者(SC)、收集者(GC)、滤食者(FC)和捕食者(P)。用 CANOCO4.5 软件对底栖动物摄食功能群和环境因子进行典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA);用 Pcord 5.0 进行多响应置换过程分析(multi-response permutation procedures, MRPP)和指示种分析(indicator species analysis, ISA);用 BioDiversityPro 软件计算 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数;对不同土地利用类型下的环境因子和底栖动物群落结构及功能群进行单因素方差分析以及 Duncan 检验,进一步应用 Pearson 和 Spearman 分析检验土地利用类型、环境因子和底栖动物摄食功能群三者之间的相关性。单因素方差分析用底栖动物的密度数据进行统计,统计分析在 SPSS 17.0 软件包上进行。

2 结果

2.1 太子河流域水环境质量

太子河流域不同土地利用类型下的水环境参数比较见文献^[30]。太子河流域水环境参数的整体特征见表 1。上下游之间水环境质量相差较大,上游水质较好,中下游受污染严重,水质较差。电导率和总溶解固体最小值分别为 58.3mg/L 和 52.65mg/L,出现在上游森林区域;其最大值分别为 1392mg/L 和 912.5mg/L,出现在中下游地区。溶解氧平均值为 9.34mg/L,最大值为 14.7mg/L,出现在上游地区;最小值 1.9mg/L,出现在下游城镇地区。总磷、总氮和高锰酸盐指数最大值出现在下游城镇区。

表 1 太子河流域水环境参数的整体特征

Table 1 The status of water quality for 42 sites sampled in the Taizi River watershed

项目 Index	平均值 Mean	标准误差 Standard error	最小值 Minimum	最大值 Maximum
电导率 (EC)/(mg/L)	446.18	46.35	58.30	1392.00
溶解氧 (DO)/(mg/L)	9.34	0.42	1.9	14.7
总溶解固体 (TDS)/(mg/L)	204.46	31.18	52.65	912.5
氨氮 (NH ₃ -N)/(mg/L)	1.24	0.34	0.07	10.14
总氮 (TN)/(mg/L)	4.43	0.84	0.31	24.8
总磷 (TP)/(mg/L)	0.15	0.03	0.01	1.33
高锰酸盐指数 (COD _{Mn})/(mg/L)	1.93	0.25	0.36	7.08
IOS	4.5	0.61	0.2	13.25

2.2 底栖动物功能群

太子河流域共采集到底栖动物 37 种,分 5 纲 9 目 14 科,优势种为动蜉、摇蚊属和水丝蚓属。多响应置换过程分析结果显示太子河流域 4 种土地利用类型之间的底栖动物群落结构具有明显的空间异质性 ($P=0.002$)。

单因素方差分析表明(见表 2),底栖动物群落中的平均丰度和 Shannon-Wiener 多样性指数在不同土地利用类型内具有极显著差异 ($P<0.001$),在森林用地中最高,分别为 8.86 和 0.94;平均密度、Pielou 均匀度指数和食碎屑者功能群在不同土地利用类型内具有显著差异 ($P<0.05$);滤食者、收集者、捕食者和刮食者功能群在不同土地利用类型内差异性不显著 ($P>0.05$)。

表 2 不同土地利用类型中的底栖动物功能群比较

Table 2 Comparison of macroinvertebrate functional groups under different land use types (MR: mean richness; MD: mean density; H: Shannon-Wiener diversity index; J: Pielou evenness)

项目 Index	森林用地 Forest	森林耕作用地 Combination	耕地 Farmland	城镇用地 Urban	<i>P</i>
平均丰度 MR	8.86±0.88	4.37±0.61	1.44±0.29	1.63±0.46	<0.000
平均密度 MD	344.44±59.55	782.75±159.54	28.40±26.53	429.51±153.56	0.006
香浓多样性指数 H	0.73±0.05	0.56±0.07	0.27±0.06	0.21±0.11	<0.000
均匀度指数 J	0.94±0.01	0.84±0.07	0.74±0.14	0.36±0.18	0.010
食碎屑者功能群 S	9.13±5.24	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.003
收集者功能群 GC	233.73±53.37	556.43±167.78	22.53±9.21	744.10±688.12	0.393
滤食者功能群 FC	12.70±10.19	31.58±15.37	0.00±0.00	0.00±0.00	0.263
刮食者功能群 SC	59.52±33.14	65.94±42.12	1.23±.123	24.30±24.30	0.634
捕食者功能群 P	29.37±17.59	128.80±89.69	4.63±4.29	286.111±69.67	0.328

数据以平均值±标准误差形式表示

采用指示种分析方法检测太子河流域指示种分布情况,分析结果见表 3。由表 3 表明:太子河流域共检测出 7 个指示物种,其中动蜉、*Polycentropus* sp. 和 *Neuroclipsis* sp. 是森林用地和森林耕作用地的指示种 ($P < 0.05$),分别属于刮食者(SC)和食碎屑者功能群(S);梯形多足摇蚊是耕地的指示种 ($P < 0.05$),属于收集者功能群(GC);霍甫水丝蚓和中华新米虾是城镇用地的指示种 ($P < 0.05$),属于收集者功能群(GC)。

表 3 太子河流域不同土地利用类型下的指示种分析

Table 3 Indicator species of different land use types in the Taizi River Basin

物种 Species	功能群 Functional groups	指示值 Indicator Values				P
		森林用地 Forest	森林耕作用地 Combination	耕地 Farmland	城镇用地 Urban	
<i>Cinygmmina</i> sp. (动蜉)	SC	56	0	0	0	0.0004
<i>Polycentropus</i> sp.	S	29	0	0	0	0.025
<i>Neuroclipsis</i> sp.	S	0	29	0	0	0.0248
<i>Polypedilum scabraenum</i> (梯形多足摇蚊)	GC	1	0	25	0	0.049
<i>Procladius paradoxus</i> (等叶裸须摇蚊)	P	0	0	0	25	0.048
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> (霍甫水丝蚓)	GC	0	0	0	37	0.033
<i>Neocaridina denticulata sinensis</i> (中华新米虾)	GC	3	0	0	44	0.002
total	2	1	1	3	<0.05	

2.3 土地利用类型、水环境质量和底栖动物摄食功能群之间的关系

太子河土地利用类型与水环境因子之间的 Pearson 分析表明(见表 4),森林用地与 EC、TDS、TN、NH₃-N、COD_{Mn}之间呈显著负相关性 ($P < 0.01$),与 DO、IOS 之间呈显著正相关性 ($P > 0.01$);森林耕作用地和环境因子之间无相关性 ($P > 0.05$);耕地与 DO 和 IOS 之间呈显著负相关性 ($P < 0.01$);城镇用地与 EC、TDS 和 TN 之间呈正相关性 ($P < 0.05$)。

表 4 四种土地利用类型和环境因子之间的 Pearson 分析

Table 4 Person's correlation between land use types and water environmental indicators

项目 Index	电导率 EC	溶解氧 DO	总溶解固体 TDS	氨氮 NH ₃ -N	总氮 TN	总磷 TP	高锰酸盐指数 COD _{Mn}	底质指数 IOS
森林用地 Forest	-0.515 **	0.513 **	-0.518 **	-0.481 **	-0.548 **	-0.101	-0.550 **	0.492 **
森林耕作用地 Combination	0.066	0.146	0.064	-0.129	-0.107	-0.02	-0.146	0.056
耕地 Farmland	0.593 **	-0.654 **	0.596 **	0.600 **	0.587 **	0.207	0.673 **	-0.491 **
城镇用地 Urban	0.316 *	-0.118	0.316 *	0.246	0.396 **	0.064	0.275	-0.232

* * 代表 0.01, * 代表 0.05

太子河土地利用类型与底栖动物功能群之间的 Spearman 分析表明(见表 5),森林用地与食碎屑者(S)、刮食者(SC)和收集者(GC)呈正相关性 ($P < 0.05$),而森林耕作用地和底栖动物功能群之间没有相关性 ($P > 0.05$)。耕地与食碎屑者(S)、滤食者(FC)之间呈负相关性 ($P < 0.05$),城镇用地与刮食者(SC)和收集者(GC)之间呈显著负相关性 ($P < 0.01$)。捕食者与 4 种土地利用类型之间没有相关性 ($P > 0.05$)。

表 5 四种土地利用和底栖动物功能群之间的 Spearman 分析

Table 5 Spearman nonparametric correlations between macroinvertebrate functional groups and land use types

项目 Index	食碎屑者 S	刮食者 SC	滤食者 FC	收集者 GC	捕食者 P
森林用地 Forest	0.345 *	0.360 *	0.267	0.356 *	0.129
森林耕作用地 Combination	-0.24	0.073	0.263	0.207	-0.243
耕地 Farmland	-0.310 *	-0.233	-0.436 **	-0.22	-0.232
城镇用地 Urban	-0.252	-0.471 **	-0.215	-0.450 **	-0.022

底栖动物摄食功能群和水环境因子之间的典范对应分析表明(图2),食碎屑者功能群(S)与IOS(底质指数)呈显著相关性($P<0.05$),滤食者功能群(FC)、收集者功能群(GC)、刮食者功能群(SC)与DO(溶解氧)呈显著相关性,捕食者功能群(P)与水环境因子之间无相关性($P>0.05$)。

3 讨论

研究表明河岸带土地利用类型对河流底质类型和底栖动物摄食功能群有着重要影响^[15],河岸带为森林用地的河流底质类型以石块、碎石为主,IOS 较高;而河岸带为耕地的河流底质类型以泥沙为主,IOS 较低,这是由于河岸带的树木被大量砍伐用作耕种,河道变宽,流速变缓,河道内泥沙淤积严重,从而导致含沙量较高,这与 Brisbois 等人^[14]的研究结果相似。不同的河流底质类型影响着底栖动物摄食功能群的分布,*Polycentropus* sp.等食碎屑者功能群(S)喜清洁水体,分布于底质类型以石块为主的森林用地;摇蚊、水丝蚓等收集者功能群(GC)耐污性较强,多分布于底质类型以淤泥和沙质为主的耕地和城镇用地。

本研究结果强调了不同土地利用类型的底栖动物群落结构具有差异性。太子河流域底栖动物的平均丰度和平均密度在森林用地中最高,

在耕地中最低,Shannon-Wiener 多样性指数在城镇用地中最低,说明农业活动和城镇化会影响到底栖动物

群落结构的变化^[31]。不同土地利用类型下的指示种分析表明森林用地的指示种为动蜉和 *Polycentropus* sp.,森林耕作用地的指示种为 *Polycentropus* sp, *Cinygma* sp 和 *Polycentropus* sp.,均为清洁水体指示种。耕地的指示种为等叶裸须摇蚊,城镇用地的指示种为霍甫水丝蚓和中华新米虾,这与其他研究结果相类似,例如 Solis 等^[32]研究结果表明腹足动物和翅亚目是农业用地的指示物种,端足目是蓄水区的指示物种,不同土地利用类型下底栖动物群落结构具有显著差异性。

研究表明除食碎屑者功能群外,其他摄食功能群在不同土地利用类型下无显著差异性。森林用地内河流底质类型以石块或卵石为主,枯枝落叶等有机碎屑较多,食碎屑者功能群主要分布在森林用地。而其他摄食功能群在不同土地利用之间无显著差异性,主要由于自森林耕作用地至城镇建设用地人类活动干扰增强,氮磷等有机污染物进入河流,水质均受到不同程度污染,底栖动物摄食功能群以收集者功能群和滤食者功能群为主。这与 Ferrio 等人的研究结果相近,底栖动物摄食功能群不能够完全反映不同程度的人类活动对河岸带土地利用的影响^[18]。

太子河流域土地利用类型与环境因子之间的相关性分析表明,森林用地与 DO、IOS 之间呈显著正相关,与 EC、TDS、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 之间呈显著负相关,表明人类活动对森林用地区干扰较小,水质较好,这与 Zhang 等^[16]对太子河河岸带不同宽度下的森林用地与环境因子的研究结果不尽相同。耕地与 DO 和 IOS 之间呈显著负相关,城镇用地与 EC、TDS 和 TN 之间呈正相关,表明耕作活动和城镇建设对河流干扰性较强,水质受到一定程度的污染,这与丁森等人对太子河源头土地利用与环境因子的研究结果较为一致^[33]。河岸带频繁的人类活动对河流水环境质量造成了严重损害,进而影响到底栖动物群落结构的变化。

已有相关研究表明收集者功能群和滤食者功能群主要出现在城镇用地和农业用地^[34-35]。太子河流域土地利用类型与底栖动物功能群之间的 Spearman 分析表明:森林用地与食碎屑者(S)、刮食者(SC)和收集者

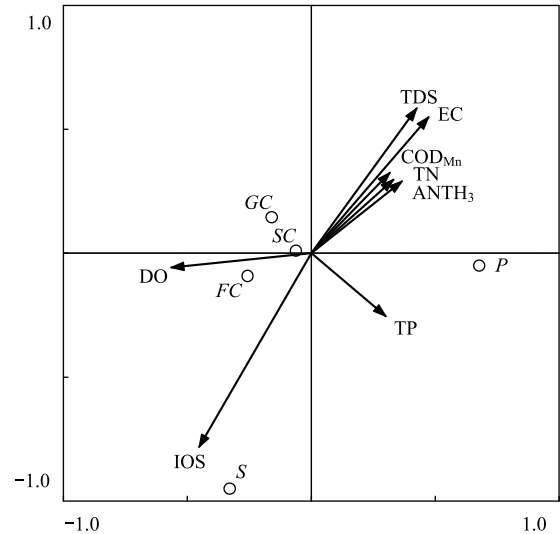


图2 底栖动物功能群和水环境因子之间的典范对应分析

Fig. 2 Canonical correspondence analysis between macroinvertebrate functional groups and water environmental factors in the Taizi River Basin

S: 食碎屑者功能群; SC: 刮食者功能群; GC: 收集者功能群; FC: 滤食者功能群; P: 捕食者功能群

(GC)呈正相关;耕地与食碎屑者(S)、滤食者(FC)之间呈负相关;城镇用地与刮食者(SC)和收集者(GC)之间呈显著负相关。Valdovinos 等对智利河流的研究结果表明原始森林区食碎屑者功能群的密度和生物量高于人类活动区^[35],这与本研究结果较为相似。

4 结论

本文从土地利用类型与底栖动物之间关系的角度出发,并结合流域环境、水文等自然属性特征,将会使得土地利用划分更具科学性和实用性,亦可进一步了解由于人类活动而导致河流生态环境健康变化特点及变化趋势。根据本研究结果,我们建议对太子河上游进行良好保持,对中下游要加强治理,尤其控制中下游河岸带耕作用地和城镇用地面积,构建和谐健康稳定的太子河河流生态系统。

参考文献 (References):

- [1] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2004, 35: 257-284.
- [2] Wang L Z, Lyons J, Kanehl P, Gatti R. Influences of watershed land use on habitat quality and biotic integrity in Wisconsin stream. *Fisheries*, 1997, 22(6): 6-12.
- [3] Perry J, Vanderklein E. *Water Quality: Management of a Natural Resource*. Cambridge, MA: Blackwell Science, 1996.
- [4] Lambin E F, Geist H J. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Germany: Springer, 2006.
- [5] 殷旭旺, 张远, 渠晓东, 孟伟. 太子河着生藻类群落结构空间分布特征. *环境科学研究*, 2013, 26(5): 502-508.
- [6] 顾晓昀, 徐宗学, 王汨, 殷旭旺, 刘麟菲, 张欣, 左德鹏. 北运河水系底栖动物群落结构与水环境质量评价. *湖泊科学*, 2017, 29(6): 1444-1454.
- [7] Birk S, Bonne W, Borja A, Brucet S, Courrat A, Poikane S, Solimini A, van de Bund W, Zampoukas N, Hering D. Three hundred ways to assess Europe surface waters: an almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological Indicators*, 2012, 18: 31-41.
- [8] 王备新, 杨莲芳. 用河流生物指数评价秦淮河上游水质的研究. *生态学报*, 2003, 23(10): 2082-2091.
- [9] 池仕运, 彭建华, 万成炎, 邹曦, 李明. 湖北省三道水库底栖动物的初步研究. *湖泊科学*, 2009, 21(5): 705-712.
- [10] 蔡琨, 张杰, 徐兆安, 吴东浩, 张咏, 王备新. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 74-82.
- [11] 张义, 程龙, 尹洪斌, 高俊峰, 张志明, 蔡永久. 巢湖流域不同水系大型底栖动物群落结构及影响因素. *湖泊科学*, 2017, 29(1): 200-215.
- [12] 童春富, 陆健健. 草坪无脊椎动物群落物种多样性及功能群研究. *生物多样性*, 2002, 10(2): 149-155.
- [13] Merritt R W, Cummins K W. *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. 3rd ed. Dubuque, USA: Kendall/Hunt, 1996.
- [14] Brisbois M G, Jamieson R, Gordon R, Stratton G, Madani A. Assessing ecosystem health in rural mixed land-use watersheds//*Proceedings of the 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment Conference Proceedings*. Concepcion, Chile: ASABE, 2008.
- [15] Miserendino M L, Masi C I. The effects of land use on environmental features and functional organization of macroinvertebrate communities in Patagonian low order streams. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 311-319.
- [16] Zhang Y, Zhao R, Kong W J, Geng S W, Bentsen C V, Qu X D. Relationships between macroinvertebrate communities and land use types within different riparian widths in three headwater streams of Taizi River, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2013, 28(3): 307-328.
- [17] Barbour M T, Gerritsen J, Snyder B D, Stribling J B. *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*. 2nd ed. Washington, D C: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [18] Fierro P, Bertrán C, Tapia J, Hauenstein E, Peña-Cortés F, Vergara C, Cerna C, Vargas-Chacoff L. Effects of local land-use on riparian vegetation, water quality, and the functional organization of macroinvertebrate assemblages. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 724-734.
- [19] Yamada K, Tanaka Y, Era T, Nakaoka M. Environmental and spatial controls of macroinvertebrate functional assemblages in seagrass ecosystems along the Pacific coast of northern Japan. *Global Ecology and Conservation*, 2014, 2: 47-61.
- [20] 殷旭旺, 渠晓东, 李庆南, 刘颖, 张远, 孟伟. 基于着生藻类的太子河流域水生生态系统健康评价. *生态学报*, 2012, 32(6): 1677-1691.
- [21] 李丽娟, 金文, 王博涵, 项珍龙, 殷旭旺, 徐宗学, 张远. 太子河河岸带土地利用类型与硅藻群落结构的关系. *环境科学研究*, 2015, 28(11): 1662-1669.
- [22] Chen D N, Zhang G Q. *Fauna Sinica Phylum Mollusca Class Gastropoda*. Beijing: Science Press, 2002.

- [23] Wang Z R. Fauna Sinica Phylum Mollusca Class Bivalvia. Beijing: Science Press, 2002.
- [24] Thorp J H, Covich A P. Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates. 2nd ed. New York: Academic Press, 2001.
- [25] 王桢瑞. 中国动物志—软体动物门—双壳纲. 北京: 科学出版社, 2002.
- [26] Yang T. Fauna Sinica Annelida Hirudinea. Beijing: Science Press, 2002.
- [27] Merritt R W, Cummins K W, Berg M B. An Introduction to the Aquatic Insects of North American. 4th Edition. Kendall: Hunt Publishing, 2008.
- [28] Allan J D, Castillo M M. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. 2nd ed. The Netherlands: Springer, 2007.
- [29] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [30] 李丽娟, 张吉, 吴丹, 殷旭旺, 徐宗学, 张远. 太子河流域鱼类功能群结构与多样性对土地利用类型的响应. 生态学报, 2017, 37(20): 6863-6874.
- [31] Liu L F, Xu Z X, Yin X W, Li F L, Dou T W. Development of a multimetric index based on benthic macroinvertebrates for the assessment of urban stream health in Jinan City, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(5): 205.
- [32] Solis M, Mugni H, Hunt L, Marrochi N, Fanelli S, Bonetto C. Land use effect on invertebrate assemblages in Pampasic streams (Buenos Aires, Argentina). Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(9): 539.
- [33] 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟. 影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析. 环境科学, 2012, 33(7): 2272-2280.
- [34] Ometto J P, Gessner A, Martinelli L A, Bernardes M C, Krusche A W, Camargo P B. Macroinvertebrate community as indicator of land-use changes in tropical watersheds, southern Brasil. International Journal of Ecohydrology and Hydrobiology, 2004, 4(1): 35-47.
- [35] Valdovinos C. Procesamiento de detritus ripariano por macroinvertebrados bentónicos en un estero boscoso de Chile central. Revista Chilena de Historia Natural, 2001, 74(2): 445-453.