DOI:10.15928/j.1674-3075.202011020314

太子河河流等级对鱼类群落结构及环境因子的影响

崇祥玉[1],宋碧曾[1],梁 珊[1],汪 冰[1],殷旭旺[1],孔维静[2]

(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,辽宁 大连 116023;
2. 中国环境科学研究院流域水生态保护技术研究室,北京 100012)

摘要:河流等级是一种用于评价河流生物多样性及环境特征的重要分类标准。以太子河流域为研究区域探究河流等级与鱼类群落分布之间的关系以及鱼类群落分布特征与环境因子之间的响应关系,并将太子河主要支流作为独立流域单元进行相同等级河流之间鱼类群落分布差异的比较。共设置125个点位,分3次调查鱼类群落和水环境理化特征,调查共采集到鱼类18 883尾,分属23科60种,洛氏鱥、宽鳍鱲、北方条鳅、棒花鱼为优势种,分别占鱼类总数的35.52%、8.58%、6.63%、5.53%。太子河流域鱼类群落结构在不同河流等级之间有显著差异,指示种分析表明洛氏鱥与北方条鳅是上游河段的指示种,短须颌须鮈与东北雅罗鱼是中游河段的指示种,鲴、大鳞副泥鳅及鰕虎鱼类是下游河段的指示种;摄食功能群在各级河流也有显著差异,杂食性鱼类的比例及物种数在三级河流和五级河流较高,昆虫食性的鱼类在一级河流和二级河流比例较高,昆虫食性鱼类的物种数在五级河流较高。河流等级对鱼类群落的物种丰富度和多样性水平有显著影响(F=3.644,P=0.008;F=2.543,P=0.043),最大值出现在三级河流。各等级河流之间总氮和氨氮有显著差异;相同等级河流之间电导率、水温和氨氮等环境因子存在显著差异。太子河流域不同河流等级鱼类群落结构有显著的差异,相同等级河流的鱼类分布特征也有显著差异,但这种鱼类群落结构的空间差异性不受水环境理化因子的影响。

关键词:河流等级;环境因子;物种多样性;鱼类群落结构

中图分类号:Q178.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2022)02-0086-09

河流是一个由干流以及各支流组成的一个复杂叶脉状结构,为了系统化描述河流结构,Horton(1945)和Strahler(1957)将河流进行了等级划分,将没有支流的小河流划分为一级河流,两个一级河流汇入后形成二级河流,以此类推。Kuehne(1962)将Horton-Strahler河流等级划分引入到河流生态学研究中,指出通过将河流划分为不同的等级可以进行河流的比较,并发现河流鱼类有明显的纵向演替特征。此后河流等级划分被广泛应用到河流生态系统研究中。

从源头到河口,河流水体中环境因子的梯度变化影响着河流的生境复杂性(Vannote et al,1980),这种水体环境因子梯度变化的观念主导了早期河流生态研究,为描述鱼类群落结构沿着河流梯度变化的模式提供了有效思路(Humphries et al,2014)。研究表明在不同等级河流中,鱼类群落结构往往表现出明显的差异性,而且从上游到下游区域物种丰富度随河流等级而增加,在中游河段达到最大值,在下游河段减小(Vannote et al,1980;Sui et al,2014;Torgersen et al,2006),据推测这种差异性通常与河流环境因子的差异有关(王文剑等,2013;Aumen et al,1990);而对在同一流域中相同等级河流之间鱼类群落结构是否有趋同性目前尚不明确。河流连续统理论预测河流环境条件的梯度变化极大地影响着河流鱼类的分布和丰度,造成了鱼类沿河流纵向梯度的分布格局(Vannote et al,1980;Araújo et al,2009),这种分布格局是受河岸植被、海拔、水深、河宽、水温、流速和底质等因素影响的(Sun et al,2014;Papastergiadou et al,2015;Sun et al,2018),但对于影响鱼类群落结构的主要物理及化学因子还有待进一步研究。

综上所述,在河流等级与鱼类群落空间差异相关性的研究领域还有以下科学问题可以验证:(1)不同等级河流鱼类群落结构是否具有明显的差异性,相同等级河流的鱼类群落结构是否表现为趋同(2)不同等级河流中理化因子是否有显著性差异,相同等级河流之间水体理化因子是否表现为趋同。太子河上游位于长白山中部山区,流域中上游有大小支流近百条,流域面积大于100 km^{2}的有9条,是辽宁省较大的河流之一(殷旭旺等,2012),且具有完整的河

收稿日期:2020-11-02

基金项目:国家自然科学基金(41977193);辽宁省"兴辽英才计划"(XLYC1807228);科技部基础资源调查专项(2019FY101704)。

作者简介:崇祥玉,1996年生,女,硕士研究生。E-mail: 2237635277 @qq.com

通信作者:殷旭旺。E-mail: yinxuwang@dlou.edu.cn

流等级体系。本文以太子河流域为例在全流域范围内进行水生态调查拟检验以上问题。

1　材料和方法

1.1　采样点设置

太子河属于辽河水系，流经本溪、鞍山、辽阳3座城市，全长413 km，流域面积为13 883 km²（殷旭旺等，2012），根据Horton-Strahler河流分类方法，将太子河分为5个等级。共设置125个点位（吴丹等，2019），分3次对太子河流域进行采样，采样点设置如图1，1~5级河流各设置点位21、33、15、6、26个。

1.2　样品采集

根据生境的代表性和可达到性，在提前设计好的各点位附近选择场地。可涉水的小型河流（水深≤1.0 m）以背负式电鱼器在采样站位上下游400 m范围内采集鱼类样品，每次采样时间约为30 min；不可涉水的大型河流（水深>1.0 m）以挂网法和电渔法配合进行，即在河岸浅水区以电鱼器进行鱼类采集，在深水区以电鱼器和挂网的方式进行采集，挂网时间为1 h，为采集到较为全面的鱼类数据，采用了3种不同网目大小的渔网（6 cm×6 cm、12 cm×12 cm、20 cm×20 cm）（韩洁等，2018）。现场将采集的鱼类样品分类鉴定至物种水平，活体放回采样点，鉴定不出的物种则用8%甲醛固定后带回实验室进一步鉴定。鉴定的参考文献为《辽宁省动物志·鱼类》（刘禅馨和秦克静，1987）、《中国动物志·硬骨鱼纲》（李思忠和张春光，2011）。

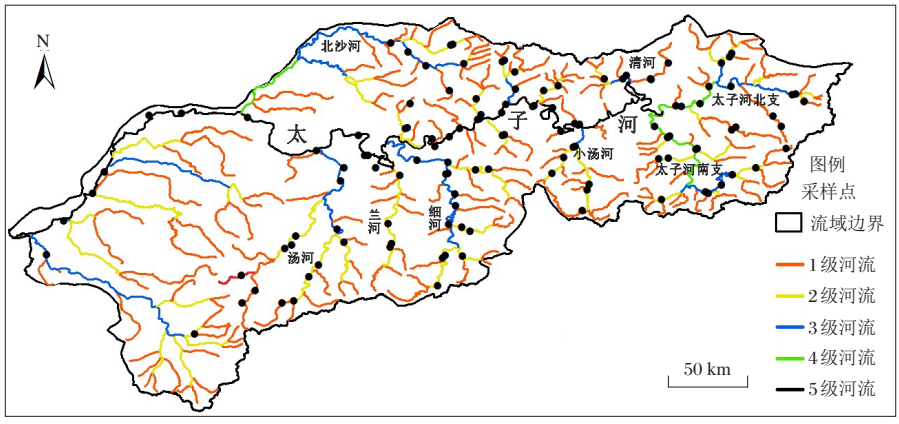


图1　太子河采样点示意

Fig.1　Location of sampling sites in the Taizi River basin

1.3　水体理化性质的测定

水体理化指标采取现场测定和实验室测定相结合的方式。现场用水质分析仪（YSI Pro 2000，YSI Incorporated，美国）测定水温（WT）、电导率（COND）、pH、溶解氧（DO），用MAGELLAN全球定位系统（eXplorist-200）测定各站点的经纬度。各位点采集2 L水样，低温保存，送回实验室48 h内按照标准方法测定总磷（TP）、总氮（TN）等环境因子（闵文武等，2016）。

1.4　数据分析与处理

1.4.1　太子河支流的等级划分处理　将太子河各支流汤河、兰河、细河、小汤河、太子河南支、太子河北支、清河及北沙河作为独立流域单元也进行等级划分，每个支流各划分为3个等级用来进行相同等级河流之间鱼类群落及环境因子差异性的比较，统计各支流1~3级河流的样点数，如表1。

1.4.2　数据分析　用Biodiversity Professional 2.0计算香农维纳多样性指数，用SPSS 23进行数据的相关性分析，鱼类相对多度数据和环境因子（除pH）全部进行lg（x+1）转换。在Pcord 5.0软件上进行多响应置换过程（multi-response permutation procedure，MRPPs）和指示种分析（indicator value analysis，IVA），同样鱼类相对多度数据进行lg（x+1）数据转换。对水环境理化因子进行主成分分析（principal component analysis，PCA），以判定影响太子河水环境质量的主要环境因子。对环境因子进行除趋势对应分析（detrended correspondence analysis，DCA），若4个轴的最大特征值大于4，则选择典范对应分析（canonical correspondence analysis，CCA）；若4个轴的最大特征值小于3则选择冗余分析；若4个轴的最大特征值介于3~4，则二者皆可。主成分分析（PCA）、除趋势对应分析（DCA）和典范对应分析（CCA）在Canoco 4.5上完成，箱体图与柱状图的绘制在Origin 8.5上进行，太子河流域点位设置图在ArcMap 9.3上完成。

表 1 各支流 1~3 级河流样点数

Tab.1 Number of first, second and third order streams in each tributary

支流名称	河流样点数/个		
	一级河流	二级河流	三级河流
汤河	4	6	3
兰河	0	2	0
细河	0	7	6
小汤河	0	4	2
太子河南支	2	5	4
太子河北支	6	3	3
清河	3	0	2
北沙河	0	3	3

2 结果与分析

2.1 太子河鱼类指示种

3 次系统性调查共采集到鱼类 18 883 尾，分属 23 科 60 种，其中洛氏鱥（*Phoxinus lagowskii*）、宽鳍鱲（*Zacco platypus*）、北方条鳅（*Nemachilus nudus*）、棒花鱼（*Abbottina rivularius*）为优势种，分别占鱼类总数的 35.52%、8.58%、6.63%、5.53%。

对太子河流域的鱼类群落进行指示种（IVA）分析，如表 2。除二级河流没有检测出指示种外，其余各级河流均可检测出指示种，一级河流的指示种为洛氏鱥和北方条鳅，三级河流指示种为短须颌须鮈（*Gnathopogon imberbis*），四级河流的指示种为东北雅罗鱼（*Leuciscus waleckii*），五级河流的指示种为鰲（*Hemiculter leucisculus*）、青鳉（*Oryzias latipes*）、大鳞副泥鳅（*Paramisgurnus dabryyanus*）、子陵栉鰕虎鱼（*Ctenogobius giurinus*）和黄带克丽鰕虎鱼（*Gymnogobius laevis*）。

2.2 鱼类摄食功能群分布

根据食性将太子河流域鱼类分为 5 个功能类群——鱼食性、植食性、杂食性、昆虫食性及底栖动物食性（图 2）。总体上，杂食性和昆虫食性的鱼类在各级流域中所占的比例较高，鱼食性和底栖动物食性的鱼类比例较低；杂食性鱼类在五级河流的比例极显著高于一级河流（$P<0.01$）、二级河流（$P<0.01$），在三级河流的比例显著高于一级河流（$P<0.05$）和二级河流（$P<0.05$）；昆虫食性的鱼类在一级河流的比例极显著高于三级河流（$P<0.01$）和五级河流（$P<0.01$），显著高于四级河流（$P<0.05$），在二级河流的比例极显著高于三级河流（$P<0.01$）和五级河流（$P< 0.01$），其他食性的鱼类在各级河流之间差异不显著（$P>0.05$）。

在不同等级河流中，杂食性鱼类的物种数有极显著差异（$P<0.01$），三级河流的杂食性鱼类物种数显著高于一级河流（$P=0.012$）与二级河流（$P<0.01$），五级河流的杂食性鱼类物种数极显著高于一级河流（$P<0.01$）和二级河流（$P<0.01$）；昆虫食性鱼类的物种数在各等级河流中也有显著差异（$P=0.026$），五级河流中昆虫食性的物种数极显著高于一级河流（$P<0.01$）和四级河流（$P<0.01$），显著高于二级河流（$P=0.027$）。

2.3 鱼类多样性沿河流等级梯度的分布

单因素方差分析表明，河流等级对鱼类群落的物种丰富度和多样性水平有显著影响（$F=3.644$，$P=0.008$；$F=2.543$，$P=0.043$）（图 3）。鱼类香农维纳多样性指数与物种丰富度呈现中间级别河流高于两端级别河流的趋势，三级河流最高，且最大值也出现在三级河流。

2.4 MRPP 分析

鱼类相对多度数据 MRPP 分析结果见表 3。太子河各级河流鱼类群落结构有明显的空间异质性（$P<0.001$）。将各支流中相同等级河流的鱼类相对多度数据进行 MRPP 分析，结果显示一、二、三级河流鱼类群落结构均有极显著的差异（$P<0.001$）。

表 2 太子河流域各河流等级的指示种

Tab.2 Indicator species of different stream orders in the Taizi River basin

指示种	指示值					*P*
	一级河流	二级河流	三级河流	四级河流	五级河流	
洛氏鱥 *Phoxinus lagowskii*	27	24	15	12	9	0.0092
北方条鳅 *Nemachilus nudus*	27	20	6	12	6	0.0368
短须颌须鮈 *Gnathopogon imberbis*	0	0	13	0	0	0.0480
东北雅罗鱼 *Leuciscus waleckii*	0	0	0	12	0	0.0388
鰲 *Hemiculter leucisculus*	0	0	2	2	18	0.0322
青鳉 *Oryzias latipes*	2	1	5	0	23	0.0236
大鳞副泥鳅 *Paramisgurnus dabryyanus*	0	0	0	0	41	0.0008
子陵栉鰕虎鱼 *Ctenogobius giurinus*	0	0	3	0	19	0.0330
黄带克丽鰕 *Gymnogobius laevis*	0	0	1	0	30	0.0018

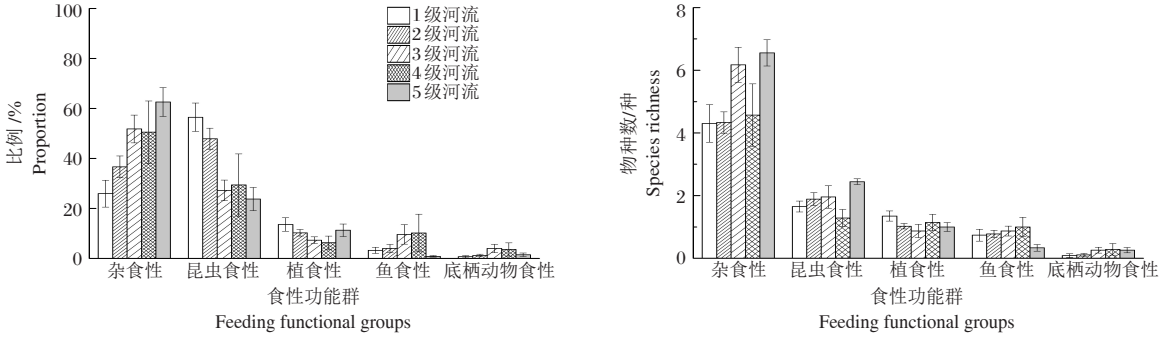
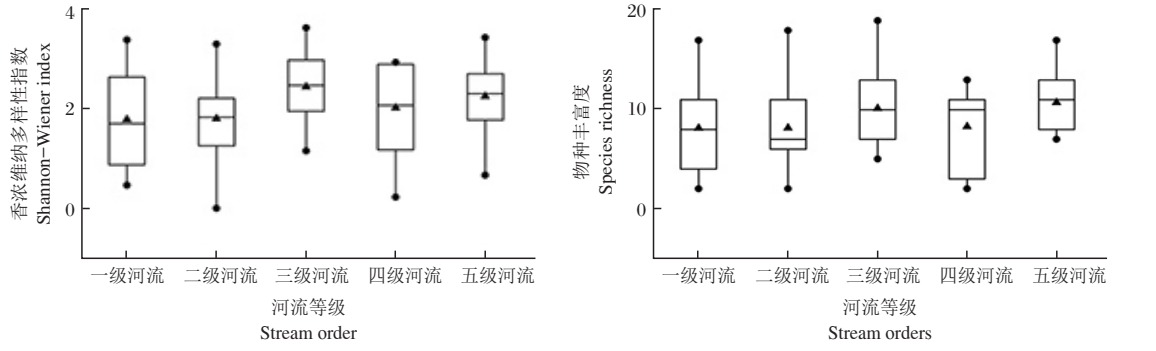


图2　不同河流等级鱼类摄食功能群结构

Fig.2　Structure of fish feeding functional groups in rivers at different stream orders



“•”表示最大值与最小值;“□”表示25%分位数和75%分位数;“—”表示中位数;“▲”表示平均值。

图 3　鱼类香农指数和物种丰富度

"•" maximum and minimum values;"□" 1st and 3rd quartiles;"—" median;"▲" average.
(1st quartile = 25th percentile and 3rd quartile = 75th percentile)

Fig. 3　Box and whisker plots of the fish Shannon index and species richness for the rivers of each stream order

表 3　各支流相同等级河流鱼类群落结构的MRPP分析结果

Tab.3　Multi-response permutation procedure for fish community structure in different tributaries of the same stream order

支流比较	一级河流	二级河流	三级河流
汤河VS兰河	——	P>0.05；T=-1.610；A=0.040	——
汤河VS细河	——	P=0.004；T=-3.523；A=0.058	P>0.05；T=-0.323；A=0.007
汤河VS小汤河	——	P=0.003；T=-4.574；A=0.170	P<0.001；T=-1.686；A=0.134
汤河VS太子河南支	——	P=0.007；T=-3.744；A=0.088	P=0.012；T=-2.992；A=0.186
汤河VS太子河北支	P=0.002；T=-3.929；A=0.138	P>0.05；T=-1.679；A=0.040	P>0.05；T=-0.978；A=0.034
汤河VS清河	P>0.05；T=-0.234；A=0.011	——	——
汤河VS北沙河	——	P=0.011；T=-2.732；A=0.064	P>0.05；T=-0.952；A=0.046
兰河VS细河	——	P>0.05；T=-1.384；A=0.039	——
兰河VS小汤河	——	P=0.011；T=-2.897；A=0.133	——
兰河VS太子河南支	——	P>0.05；T=-1.384；A=0.039	——
兰河VS太子河北支	——	P>0.05；T=0.149；A=-0.005	——
兰河VS清河	——	——	——
兰河VS北沙河	——	P=0.016；T=-3.016；A=0.171	——
细河VS小汤河	——	P=0.006；T=-3.672；A=0.098	P>0.05；T=-2.639；A=0.052
细河VS太子河南支	——	P>0.05；T=-1.559；A=0.029	P=0.003；T=-3.998；A=0.109
细河VS太子河北支	——	P>0.05；T=1.040；A=-0.022	P>0.05；T=-1.324；A=0.026
细河VS清河	——	——	P>0.05；T=-1.459；A=0.025
细河VS北沙河	——	P<0.001；T=-5.531；A=0.149	P=0.023；T=-2.608；A=0.069
小汤河VS太子河南支	——	P>0.05；T=0.709；A=-0.027	P>0.05；T=-1.805；A=0.142
小汤河VS太子河北支	——	P>0.05；T=-0.549；A=0.028	——
小汤河VS清河	——	——	——
小汤河VS北沙河	——	P=0.011；T=-3.289；A=0.276	——
太子河南支VS太子河北支	P=0.007；T=-4.335；A=0.558	P>0.05；T= 0.816；A=-0.025	P>0.05；T=-1.549；A=0.095
太子河南支VS清河	——	——	P=0.048；T=-1.899；A=0.144
太子河南支VS北沙河	——	P=0.007；T=-3.584；A=0.162	P=0.009；T=-3.347；A=0.211
太子河北支VS清河	P=0.005；T=-3.616；A=0.133	——	P<0.001；T= -0.131；A=0.005
太子河北支VS北沙河	——	P= 0.025；T= -2.652；A=0.143	P>0.05；T=-1.529；A=0.054
清河VS北沙河	——	——	——

2.5　鱼类群落与环境因子的关系

太子河流域水环境理化因子主成分分析结果如表4，鱼类群落结构与水环境因子的除趋势对应分析结果如表5。

4个轴的最大特征值均大于3，故本文选择典范对应分析。将PCA筛选出的各级河流的物理及化学环境因子与鱼类群落数据进行CCA分析，结果如图4。二级河流中COD_{Mn}（MCT，F=2.05，P=0.008）是显著影响鱼类群落的环境因子，4个化学环境变量共解释了全部物种变异的31.9%（轴1和轴2分别解释了4.6%和1.4%）以及全部物种和环境变异的100%（轴1和轴2分别解释了76.5%和23.5%）。四级河流中COD_{Mn}（MCT，F=1.60，P=0.049）是显著影响鱼类群落的环境因子，4个化学环境变量共解释了全部物种变异的78.9%（轴1和轴2分别解释了24.9%和18.4%）以及全部物种和环境变异的100%（轴1和轴2分别解释了48.8%和35.9%）。其余各级河流中环境因子对鱼类群落结构影响不显著（P>0.05）。

表4　太子河流域水环境理化因子的主成分分析

Tab.4　Principal component analysis of physicochemical factors of the water environment in Taizi River basin

河流	物理因子主成分	化学因子主成分
一级河流	COND、WT、pH	TN、COD_{Mn}
二级河流	COND、DO、pH	TN、COD_{Mn}
三级河流	COND、pH	TP、TN、COD_{Mn}
四级河流	COND、DO、pH	TN、COD_{Mn}、NH3-N
五级河流	WT、DO、pH	TN、COD_{Mn}、NH3-N

表5　太子河流域鱼类群落结构与水环境因子的DCA分析

Tab.5　Detrended correspondence analysis of fish community structure and water environmental factors in Taizi River basin

因子	一级河流	二级河流	三级河流	四级河流	五级河流
物理因子	3.6662	6.071	4.551	5.146	6.040
化学因子	3.6662	6.071	4.551	5.146	6.040

注：表中所列数据为4个轴的最大特征值。

Note: Data listed in the table are the maximum eigenvalues of the 4 axes.

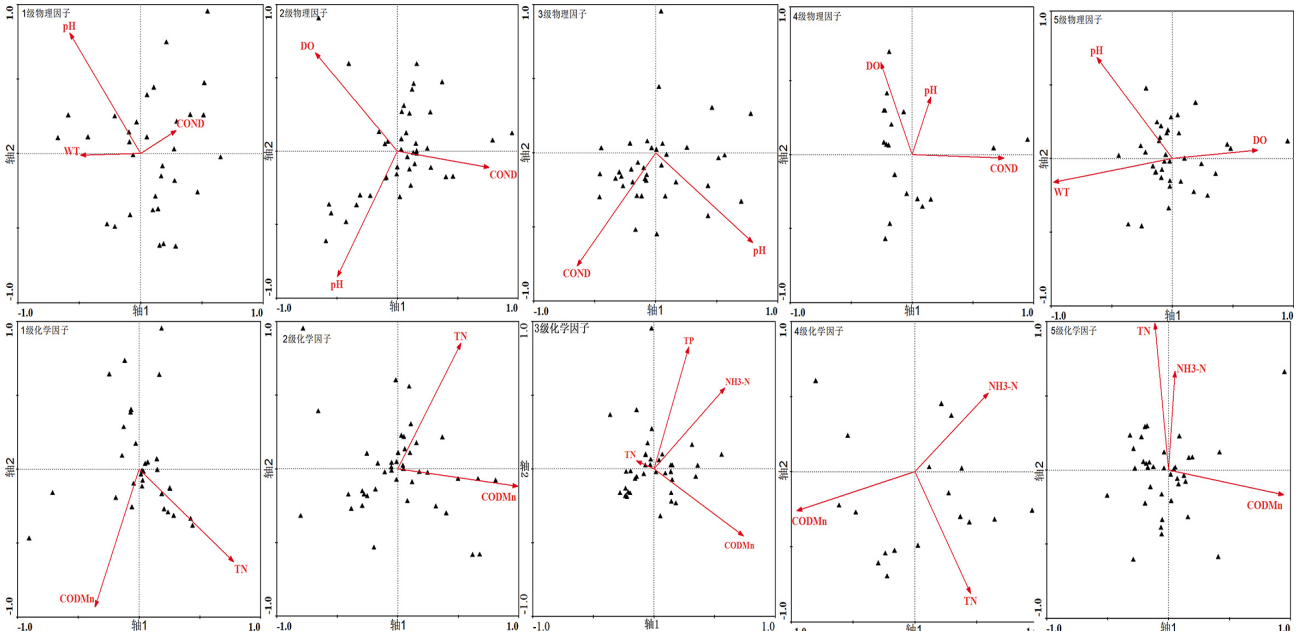


图4　太子河水环境理化因子与鱼类群落的典范对应分析

Fig. 4　Canonical correspondence analysis between the physicochemical factors of the water environment and fish community for rivers of each stream order in Taizi River basin

单因素方差分析结果见表6。总氮（P<0.01）和氨氮（P<0.05）在各级河流之间存在显著的差异，其他环境因子在各级河流之间差异不显著（P>0.05），总氮和氨氮在三级河流和五级河流的平均值高于其他各级河流。

将各支流相同等级河流的环境因子进行单因素方差分析，见表7。结果表明各支流一、二、三级河流的电导率差异极显著（P<0.01），一级河流中水温也有极显著的差异（P<0.01），三级河流的氨氮也有显著差异（P<0.05）。

表 6　太子河流域各级河流环境因子的单因素方差分析

Tab.6　One-way ANOVA of environmental factors for rivers of all stream order in the Taizi River basin

环境因子	一级河流	二级河流	三级河流	四级河流	五级河流	*P*	*F*
电导率/ μs·cm^{-1}	283.13±29.27^{a}	320.75±24.43^{a}	355.67±44.76^{a}	204.09±33.93^{a}	351.71±25.60^{a}	0.107	1.968
总磷/mg·L^{-1}	0.05±0.01^{a}	0.05±0.001^{a}	0.16±0.06^{a}	0.04±0.02^{a}	0.09±0.02^{a}	0.070	2.398
总氮/ mg·L^{-1}	2.03±0.42^{a}	2.38±0.24^{a}	3.05±0.42^{ab}	1.19±0.29^{a}	4.05±0.48^{c}	<0.001	5.772
高锰酸盐指数/mg·L^{-1}	2.65±0.35^{a}	2.58±0.21^{a}	3.43±0.45^{a}	3.85±0.88^{a}	3.22±0.57^{a}	0.332	1.160
水温/℃	17.09±0.87^{a}	17.83±0.48^{a}	18.32±0.64^{a}	16.33±1.24^{a}	18.26±0.75^{a}	0.530	0.796
溶解氧/mg·L^{-1}	12.22±0.70^{a}	10.95±0.58^{a}	11.04±0.70^{a}	11.54±1.80^{a}	10.51±0.65^{a}	0.368	1.084
氨氮/ mg·L^{-1}	0.27±0.07^{a}	0.32±0.06^{a}	0.46±0.12^{a}	0.18±0.04^{a}	0.73±0.17^{b}	0.011	3.569
pH	8.14±0.21^{a}	8.10±0.12^{a}	8.05±0.16^{a}	8.12±0.40^{a}	8.13±0.15^{a}	0.994	0.036

注：表中所列数据为平均值±标注差，同行数据带有不同字母表示差异显著（P<0.05）。

Note：The data listed in the table are reported as the Mean ± SD, the data in the same row with different letters indicate significant differences（P<0.05）.

表 7　太子河各支流同级河流环境因子的单因素方差分析

Tab. 7　One-way ANOVA of environmental factors of rivers at the same stream order in each tributary

环境因子	一级河流	二级河流	三级河流
电导率/ μs·cm^{-1}	P<0.001，F=16.058	P<0.001，F=15.794	P=0.004，F=19.359
总磷/ mg·L^{-1}	P=0.557，F=1.979	P=0.379，F=6.406	P=0.114，F=2.076
总氮/ mg·L^{-1}	P=0.623，F=0.609	P=0.174，F=1.647	P=0.097，F=2.201
高锰酸盐指数/ mg·L^{-1}	P=0.450，F=2.642	P=0.591，F=0.783	P=0.774，F=0.536
水温/℃	P=0.009，F=6.480	P=0.163，F=1.691	P=0.403，F=1.103
溶解氧/ mg·L^{-1}	P=0.771，F=0.378	P=0.703，F=0.632	P=0.156，F=9.319
氨氮/ mg·L^{-1}	P=0.539，F=0.761	P=0.126，F=9.986	P=0.037，F=13.372
pH	P=0.956，F=0.088	P=0.783，F=3.204	P=0.992，F=0.795

3　讨论

3.1　河流等级与鱼类群落分布特征

众多研究发现，沿着河流等级的梯度变化，鱼类群落结构会随之表现出明显的变化（Aumen et al，1990；Li et al，2012；储玲等，2015；Roberts et al，2010），且多样性在中间级别河流达到峰值（Sun et al，2012）。本研究也发现太子河三级河流的物种丰富度和鱼类多样性指数高于其他各级河流，这与前人的研究结果一致，可能是因为河流生态系统中最大环境异质性往往发生于中间级别的河流（Minshall et al，1985；钱红等，2016）。太子河流域各级河流之间鱼类群落结构有极显著差异，但四级河流与各级之间差异并不显著，经综合分析原因是四级点位设置较少且集中，影响分析结果。Yan等（2011）研究指出鱼类群落结构与当地栖息地的综合环境条件(即海拔、底质及水深等)和鱼类物种分布、生境偏好、食物需要等生态需求相关，故各等级河流环境因子的差异会造成鱼类群落结构的空间格局。本文中鱼类摄食功能群及指示种亦有明显的沿河流等级的分布特征，以昆虫幼虫为食的洛氏鱥是亲流性鱼类常栖于位于河流上游的山涧溪流。北方条鳅是植食性鱼类，喜清冷水体，也常出现于河流上游，故这2种鱼类为上游河流的指示种；短须颌须鮈与东北雅罗鱼为杂食性鱼类，喜缓流，且东北雅罗鱼有洄游习性，为中游及中下游河段的指示种；下游河段则是以喜静水的餐和大鳞副泥鳅以及有洄游习性的鰕虎鱼为指示种。

Beecher等（1988）在华盛顿州某河流进行调查，发现鱼类丰富度在相同等级河流之间差异较大，而在海拔较高的河流中差异并不明显。本文将太子河流域各支流作为一个子流域单元，对同级河流的鱼类群落结构进行MRPP分析，总体来看同等级河流之间鱼类群落结构存在极显著的差异，将各支流同等级河流的环境因子进行单因素方差分析后发现各级的理化环境因子并无显著差异，因此本研究中相同等级河流中鱼类群落结构与理化因子没有明显的协同效应。李丽娟等（2017）研究指出，太子河流域有4

种土地利用类型，即森林用地、森林耕作用地、耕地和城镇建设用地，不同土地利用类型之间的鱼类群落结构具有明显的空间异质性，这可能导致了同等级河流鱼类群落结构以及环境因子的差异，由于各支流的地理环境以及人为干扰因素等的不同，各支流相同等级河流之间理化因子以及鱼类群落结有显著差异。

3.2 鱼类群落与环境因子的关系

河流连续体概念将沿河流等级梯度发生的各种环境因素的变化与生物群落结构和功能的变化联系起来（Gorman & Karr，1978），河流的环境因子会随着河流等级梯度发生变化（Vannote et al，1980）。本研究也发现总氮和氨氮在各级河流中有显著差异，其他环境因子虽在各级河流之间不存在显著差异，但电导率、总磷以及水温等环境因子的平均值在三级河流达到最高，这种情况与三级河流有更高的多样性与物种丰富度有密切的联系，说明三级河流具有较大的环境异质性。典范对应分析表明只有二级河流和四级河流有显著影响鱼类群落的环境因子，均为高锰酸盐指数，其余各级河流并无显著影响鱼类群落的环境驱动因子。解释这一现象可能的原因是：鱼类群落是由局域因素如河岸植被、深度、宽度、水温、流速和底质（Sun et al，2014；Papastergiadou et al，2015），以及河流等级梯度、年降雨量和流域分水岭等区域因素影响形成（Papastergiadou et al，2015；Pinto et al，2009），河流中的鱼类群落结构通常是所有这些因素组合共同影响的结果（Yan et al，2011）。本文所选用的环境因子为物理及化学因子，受人为干扰（如水坝、河岸带土地利用类型等）较为严重（彭俊等，2017；李丽娟等，2015），从而造成各级河流未检测出影响鱼类群落的环境驱动因子。

参考文献

储玲，王文剑，闫莉莉，等，2015. 黄山陈村水库上游河源溪流的鱼类群落及其纵向梯度格局[J]. 生态学报，35(3): 900−910.

韩洁，张杰，宋蒙蒙，等，2018. 济南市水域鱼类功能群结构及其季节性变化[J]. 环境科学研究，31: 1537−1544.

刘禅馨，秦克静，1987. 辽宁动物志·鱼类[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社.

李思忠，张春光，2011. 中国动物志·硬骨鱼纲[M]. 北京：科学出版社.

李丽娟，张吉，吴丹，等，2017. 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[J]. 生态学报，37: 6863−6874.

李丽娟，金文，王博涵，等，2015. 太子河河岸带土地利用类型与硅藻群落结构的关系[J]. 环境科学研究，28(11): 1662−1669.

闵文武，韩洁，王培培，等，2016. 太子河流域硅藻群落与驱动因子的定量关系[J]. 环境科学研究，29: 672−679.

彭俊，崔超，王秀颖，2017. 太子河水质演变原因定量分析[J]. 东北水利水电，35(7): 38−40.

钱红，严云志，储玲，等，2016. 巢湖流域河流鱼类群落的时空分布[J]. 长江流域资源与环境，25(2): 257−264.

吴丹，卢奥然，田爽，等，2019. 浑太河鱼类群落多样性及生境适宜性量化分析[J]. 中国环境科学，39(11): 4875−4885.

王文剑，储玲，司春，等，2013. 秋浦河源国家湿地公园溪流鱼类群落的时空格局[J]. 动物学研究，34(4): 417−428.

殷旭旺，渠晓东，李庆南，等，2012. 基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价[J]. 生态学报，32(6) : 1677−1691.

Aumen，N G，Hawkins C P，Gregory S V，1990. Influence of woody debris on nutrient retention in catastrophically disturbed streams[J].Hydrobiologia 190:183−192.

Araújo F G，Pinto B C T，Teixeira T P，2009. Longitudinal patterns of fish assemblages in a large tropical river in southeastern Brazil: evaluating environmental influences and some concepts in river ecology[J]. Hydrobiologia，618(1): 89−107.

Beecher H A，Dott E R，Fernau R F，1988. Fish species richness and stream order in Washington State streams[J].Environmental Biology of Fishes，22(3):193−209.

Gorman O T，Karr J R，1978. Habitat structure and stream fish communities[J]. Ecology，59:507−515.

Horton，R E，1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology[J].Bull. Geol. Sot. Amer，56(3): 275−370.

Humphries P，Keckeis H，Finlayson B，2014. The river wave concept: integrating river ecosystem models[J]. BioScience，64: 870−882.

Kuehne R A，1962. A classification of streams illustrated by fish distribution in an eastern Kentucky creek[J].Ecology，43: 608−614.

Li J，Huang L，Zou L，et al，2012. Spatial and temporal variation of fish assemblages and their associations to habitat variables in a mountain stream of north Tiaoxi River，China[J].Environmental Biology of Fishes，93(3):403−417.

Minshall G W，Cummins K W，Petersen R C，et al，1985. Developments in stream ecosystem theory[J].Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences，42(5): 1045−1055.

Pinto B C T，Araujo F G，Rodrigues V D，et al，2009. Local and ecoregion effects on fish assemblage structure in tributaries of the Rio Paraíba do Sul，Brazil[J].Freshw Biol，54:2600−2615.

Papastergiadou E,Manolaki P,Dorflinger G,et al,2015. Inventory of aquatic and riparian flora in fluvial corridors of a mediterranend island[J]. Fresenius Environmental Bulletin,24(6A):2179−2192.

Roberts J H,Hitt N P,2010. Longitudinal structure in temperate stream fish communities: evaluating conceptual models with temporal data[J].American Fisheries Society Symposium,73: 281−302.

Strahler A N,1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union,38(6): 913−920.

Sui X Y,Lu Z,Yan Y Z,et al,2014. Influence of a large dam on the longitudinal patterns of fish assemblages in Qingyi Stream[J].Zoological Research,35(5): 362 372.

Sun R,Deng W Q,Yuan X Z,et al,2014. Riparian vegetation after dam construction on mountain rivers in China[J].Ecohydrology,7(4):1187−1195.

Sun R,Luo X,Meng X,et al,2018. Spatial pattern of riparian plants along stream order among mountain rivers in China[J]. Journal of water and climate change,9(2):322−330.

Sun R,Yuan X,Chen Z,et al,2012. Effect of three georges reservoir (Yangzi River) on the plant species richness in drawdown zone downstream the tributary river (Pengxihe River)[J].Russian Journal of Ecology,43(4):307−314.

Torgersen C E,Baxter C V,Li H W,et al,2006. Landscape influences on longitudinal patterns of river fishes: Spatially continuous analysis of fish−habitat relationships[J].American Fisheries Society Symposium,48: 473−492.

Vannote R L,Minshall G W,Cummins K W,et al,1980. The river continuum concept[J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci,37(1): 130−137.

Yan Y Z,Xiang X Y,Chu L,Zhan YJ,et al,2011. Influences of local habitat and stream spatial position on fish assemblages in a dammed watershed, the Qingyi Stream, China[J]. Ecology of Freshwater Fish,20(2): 199−208.

（责任编辑　郑金秀）

Effects of Stream Order and Environmental Factors on Fish Community Structure in the Taizi River Basin

CHONG Xiang-yu[1], SONG Bi-zeng[1], LIANG Shan[1], WANG Bin[1], YIN Xu-wang[1], KONG Wei-jing[2]

(1. Liaoning Provincial Key Laboratory for Hydrobiology, College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, P.R. China;
2. Laboratory of Riverine Ecological Conservation and Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, P.R. China)

Abstract: In river ecology research, stream order is an important classification standard for evaluating biodiversity and the environmental characteristics of a river. In this study, the Taizi River basin was selected for research, and we investigated the relationship of stream order to the fish community structure and the response of the fish community to environmental factors. The primary tributaries of Taizi River were treated as independent watershed units for comparing fish community structure in streams of the same order. The Taizi River basin was divided into five levels of stream order, and a total of 125 sampling sites were set for surveying the fish communities and measuring water environment factors. A total of 18 883 individuals from 60 species of 30 families were collected during three fish surveys, with dominance by *Phoxinus lagowskii*, *Zacco platypus*, *Nemachilus nudus* and *Abbottina rivularius*, accounting for 35.52%, 8.58%, 6.63% and 5.53% of the total species, respectively. There were significant differences in fish community structure between rivers of different stream order in the Taizi River basin. Indicator species were *Phoxinus lagowskii* and *Nemachilus nudus* in upstream segments, *Gnathopogon imberbis* and *Leuciscus waleckii* in midstream segments; and *Hemiculter leucisculus*, *Paramisgurnus dabryyanus*, and *Gobiidae* sp. in downstream segments. There were also significant differences in feeding functional groups in rivers of different stream order. The species number and proportion of omnivorous fishes were higher in third-and fifth-order rivers; insectivorous fishes made up a higher proportion in first-and second-order rivers, and the number of fish species was higher in fifth-order rivers. Stream order also significantly affected fish community species richness and diversity, with the highest diversity and richness in third-order streams (F=3.644, P=0.008; F=2.543, P=0.043). There were significant differences in total nitrogen and ammonia nitrogen in streams of different order. However, conductivity, water temperature, ammonia nitrogen and other environmental factors varied significantly among streams of the same order. To summarize, there were significant differences in the structure of the fish community in streams of different order in the Taizi River basin and significant differences in the fish community were also observed in streams of the same order. However, spatial differences in fish community structure were not significantly affected by the physical and chemical factors of the aquatic environment.

Key words: stream order; environmental factors; species diversity; fish community structure