DOI: 10.5846/stxb201603120438
李宁,陈阿兰,杨春江,孙瑜旸,马国良,马琪.城镇化对湟水河上游水质和底栖动物群落结构的影响.生态学报,2017,37(10): - .
Li N, Chen A L, Yang C J, Sun Y Y, Ma G L, Ma Q.Impacts of urbanization on water quality and macrobenthos community structure upstream in the Huangshui River.Acta Ecologica Sinica,2017,37(10): - .

城镇化对湟水河上游水质和底栖动物群落结构的影响

李　宁*,陈阿兰,杨春江,孙瑜旸,马国良,马　琪
青海大学,西宁　810016

摘要:2015 年 4 月(枯水季)和 8 月(丰水季),调查了受不同城镇化强度影响的青海省湟水河上游流域的土地利用、水体的理化性质及底栖动物群落。并以城镇化强度指标的不透水地表面积比(PIA)与溪流水质和生物群落进行 Spearman 秩相关分析。结果表明:水温、TN、TP、NH_4^+-N、PO_4^3-P、电导率、水深、水面宽、细砂淤泥比(%)与 PIA 呈显著正相关,与草地(%)、林地(%)呈显著负相关。底栖动物指标与 PIA 的拟合曲线表明,Shannon 多样性指数、丰富度指数、集食者(%)、耐污类群(%)及 BI 指数存在显著的线性关系,其余各项指标则存在显著的非线性关系。其中总分类单元数、丰富度指数、EPT(%)及捕食者(%)、撕食者(%)、滤食者(%)、刮食者(%)与 PIA 呈显著负相关,与林地(%)、草地(%)呈显著正相关。但 BI 指数、集食者(%)、耐污类群(%)、寡毛纲(%)、与 PIA 呈显著正相关。随着城镇化强度的提高,湟水河上游物理生境退化、水体氮、磷营养水平逐步提高、敏感底栖动物消失、耐污物种个体数量急剧上升。

关键词:湟水河;城镇化;大型底栖无脊椎动物;不透水地表面积比(PIA)

Impacts of urbanization on water quality and macrobenthos community structure upstream in the Huangshui River

LI Ning*, CHEN Alan, YANG Chunjiang, SUN Yuyang, MA Guoliang, MA Qi
Qinghai University, Xining 810016, *China*

Abstract: In April (dry season) and August (rainy season) of 2015, land utilization, the physical and chemical properties of water, and the macrobenthos affected by the different intensities of urbanization in the upstream area of the Huangshui River were assessed. The indexes of the percentage of ground surface impervious area (PIA), water quality, and biological communities under varying intensity of urbanization were studied using the Spearman rank correlation analysis. The results indicated that water temperature, TN, TP, NH_4^+-N, PO_4^3-P, conductivity, depth, width, and the fine sand/silt ratio were positively correlated with PIA and negatively correlated with grassland and forest land area. The fitted curve between the macrobenthos index and PIA indicated that there were significant linear relationships among the Shannon diversity index, richness index, collector (%), stain resistance groups (%), and BI index. Remaining indicators had significant nonlinear relationships. Total number of taxa, richness index, EPT (%), predators (%), shredders (%), filterers (%), and scrapers (%) were negatively correlated with PIA, grassland and forest land were positively correlated with PIA, as were the BI index, collector (%), stain resistance groups (%), and oligochaeta (%). As physical habitat degraded, high concentrations of nitrogen and phosphorus lead to the disappearance of pollution-sensitive benthic invertebrates and a dramatic increase in pollution-tolerant individuals, which increased with the intensity of urbanization in the upstream areas of the Huangshui River.

基金项目:国家自然科学地方基金资助项目(31560601);青海省自然基金资助项目(2014-ZJ-905)
收稿日期:2016-03-12;　　**网络出版日期**:2016-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: newlining@ sina.com

Key Words: Huangshui River; urbanization; macro-benthic invertebrate; percentage of impervious area (PIA)

青藏高原是亚洲多条大江大河的发源地,境内河流纵横,湖泊星罗棋布,被称为“中华水塔”。同时青藏高原植被覆盖度低,土层薄,水土流失严重,生态环境脆弱、敏感,在城镇化的过程中尤其要关注对于高原水生态环境的监测和保护。

青藏高原城镇化自 20 世纪 90 年代开始发展迅速,牧区兴建居民点,农区撤村并乡、撤乡并镇,城市规模不断扩大[1-2]。然而城市化作为衡量一个国家发展水平的重要标志,在一定程度上增大了人类社会与生态环境之间的相互作用,从而引发了一系列的社会-环境-生态问题。城镇化过程中造成包括建筑物、道路、广场、居民区等不透水地表面积比(percentage of impervious area, PIA)迅速增加,农田、林地和草地面积迅速下降,自然河道的渠道化改造。土壤接纳降水量急剧下降,地表径流系数和径流量增加,极端降水时间增多。平时基流量大幅减少,暴雨后河水暴涨,冲刷堤岸,城市段河流淤积物增加[3]。降雨后富含氮磷等成分的雨水和城市生活污水通过地表径流和城市管网排入溪流。加之城市附近的工矿企业排放的工业污水,造成河流氮磷等营养盐及有毒化学品进入河流。随着城市溪流水文变化的加剧以及溪流生境和水质的退化,溪流水生生物丰富度急剧下降,敏感物种大量消失,耐污种类密度急剧增加[4]。

衡量流域内城镇化强度大小的指标可用流域内不透水地表面积比例(PIA)表示,即流域内城市住宅、工业、商业、道路等占用土地面积占流域总面积的比例,用以研究城镇化对溪流水生生物的影响。研究表明,PIA 与底栖动物群落之间存在着线性或非线性的关系,随着 PIA 值的升高,底栖动物多样性开始持续下降,当 PIA 增大到一定阈值后,底栖动物多样性会保持基本不变或持续下降[5-8]。

本文以青藏高原黄河重要支流湟水河为例,探讨高原地区城镇化对溪流水质和生物的影响,并以 PIA 作为城镇化强度的量化指标,分析其与底栖动物群落间的关系,为我国西北高原地区城镇化建设过程中的规划管理、溪流生态保护与修复提供科学数据。

1 研究地区、内容与方法

1.1 研究地区概况

湟水河为黄河上游最大的支流,源头为青藏高原祁连山脉的包呼图山,海拔 4400 m,于甘肃永靖县汇入黄河,全长 349 km。其上游为源头至西宁市小峡口段,河流长 184km,小峡口海拔 2178 m,湟水河上游跨越青藏高原和黄土高原(36.55°—37.29°N,100.80°—101.92°E),流域总面积 16100 km^2,流域内地势西北高、东南低,高山深谷。气候属于典型大陆性气候,垂直变化明显,且地域差异大。愈向上游气温愈低,降水量增大,蒸发量减小,多潮湿沼泽地。流域年平均气温 0.6℃—7.9℃,年均降水量 500 mm,局部地区可达 600 mm。湟水干流谷地 6—9 月降水占全年降水量的 70%左右,且多暴雨。无霜期西北部山区为 31 d,东南部丘陵区为 130—180 d。

湟水河为羽状水系,发源于祁连山脉及其支脉,高山大川,源头人迹罕至,地理隔绝明显。为保证多样性数据采样的完整性,设湟水河流域源头参照样点 7 个,其中干流样点 1 个,一级支流 6 个。湟水河源头至西宁市段城镇化程度逐渐增强,从牧区村镇、牧业区县城、农区村镇、农区县城、西宁市郊至城镇化程度最高的西宁市,干扰样点设置原则为:在每一城镇及其上游 3—5 km 和下游 1 km 各设一个采样点,各支流汇入点设一个采样点,共 20 个干扰样点(图 1)。

1.2 流域内土地利用类型计算

从青海省国土资源厅获得研究区域 2010 年第二次土地利用状况调查土地利用类型数据,结合 30 m 分辨率的 TM 影像监督分类结果,获得研究区域内不同的土地利用类型。然后将研究区域 DEM 格式转换为 SWAT 格式,提取河网与不同低级流域的界限,再将河网、流域及不同土地利用类型的图层进行叠加,利用 ArcGIS 10.2 划分每个采样点上游流域的边界,并利用 1:50000 的电子地图对这些边界进行校正。将流域内土地利用

类型按照草地、林地、耕地和城市用地 4 个类群进行分类汇总,并进行量化,最后计算出草地、林地、耕地和城市用地面积。

1.3　样品采集与测定

1.3.1　水体理化指标测定

水体溶解氧(D0)、电导率、pH、和水温等使用 U-50 多参数水质检测仪现场测定(HORIBA);总氮和总磷采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定;NH_4^+-N 含量采用纳氏试剂光度法测定;PO_4^3-P 含量采用钼锑抗分光光度法测定[9-10];溪流底质测定参考 Barbour[11] 等的方法(细沙淤泥<2 mm、砾石 2—64 mm、鹅卵石 64—256 mm、大石>256 mm)。溪流平均宽度和平均深度参照 Hauer 和 Lamberti[12] 的方法用 FP111 直读式流速仪(Global Water)测量。

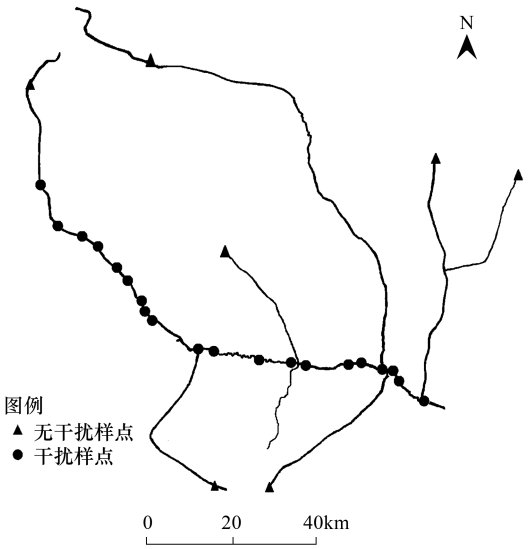

图 1　湟水河上游 27 个采样点分布

Fig.1　locations of 27 sampling sites in the upstream of Huangshui River

1.3.2　大型底栖无脊椎动物

在 100 m 长的采集区域内,用索伯网(0.09 m^2,250 μm 网孔的尼龙网)采 5 个样,包括 3 个急流样和 2 个缓流样,采样过程中将索伯网网口逆着水流方向放置,用力搅动网前定量框内 5 cm 左右深度的底质,随着水流将底栖动物冲入网内,并将粘附在石块上的底栖动物洗刷入网。在野外直接用 40 目钢筛筛选标本,5 个样混合后用 8%的福尔马林溶液固定,带回实验室鉴定。标本一般鉴定至属或种。底栖动物的功能类群划分参考 Merritt[13] 等的方法,BI 指数的计算采用王备新[14-15] 等的方法, $BI = \sum_{i=1}^{n} n_i\ t_i/N$,n_i为第 i 个分类单元(通常为属级或种级)的个体数,N 为样本总个体数,t_i为第 i 个分类单元的耐污值。

1.4　数据处理

多样性指数和丰富度指数计算参照 Shannon[16] 及 Ganfin[17] 的方法,用 Duncan 检验对数据进行参照和干扰样点间环境和生物参数的方差分析和差异显著性检验($\alpha=0.05$)。环境变量和生物指标与土地利用类型间的 Spearman 秩相关分析在 SPSS 22.0 软件中进行。不透水地表面积比(PIA)与生物指标进行曲线拟合在 Origin 8.0 软件中完成。

2　结果分析

2.1　理化指标与土地利用的关系

水温、电导率、TN、TP、NH_4^+-N、PO_4^3-P、水深、水面宽、细砂淤泥比(%)与 PIA 呈显著正相关,与草地(%)、林地(%)呈显著负相关。溶解氧、pH、砾石(%)、鹅卵石(%)与 PIA 呈显著负相关,与草地(%)和林地(%)成显著正相关(表 1)。

2.2　底栖动物群落与土地利用的关系

2.2.1　底栖动物群落组成及数量

调查共采集到大型底栖动物 31 科 58 属 60 个分类单元,共 5738 头。其中昆虫纲 7 目 46 个分类单元,占所有底栖动物种类的 76.67%,昆虫个体数共 4301 头,占所有底栖动物数量的 74.96%。软体动物门 2 个分类单元(3.3%);环节动物门、甲壳纲各 1 个分类单元(1.67%)。

2.2.2　生物指标与土地利用关系

总分类单元数、Shannon 多样性指数、丰富度指数、EPT(%)及捕食者(%)、撕食者(%)、滤食者(%)、刮

食者(%)、敏感类群(%)与 PIA 呈显著负相关,与林地(%)和草地(%)呈显著正相关。但 BI 指数、集食者(%)、耐污类群(%)、寡毛纲(%)与 PIA 呈显著正相关,与草地(%)和林地(%)呈显著负相关(表 2)。

表 1 采样点环境变量值及其与土地利用的关系

Table 1 Environmental variable of the sampling sites and their relationships with land use

变量 Variable	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	标准差 SD	r			
					草地 Grassland/%	林地 Forest/%	农田 Cropland/%	不透水地表面积比 Percentage of impervious area PIA
水温 Temperature/℃	1.63	10.94	16.750	3.67	−0.491**	−0.178	0.141	0.513**
pH	7.23	8.52	9.90	0.49	0.438**	−0.185	−0.075	−0.283*
溶解氧 DO/(mg/L)	8.60	12.98	17.08	4.45	0.384**	0.409**	−0.335**	−0.378**
电导率 Conductivity/(μS/cm)	195.00	517.00	887.00	0.18	−0.794**	0.220	0.493**	0.826**
总氮 TN /(mg/L)	0.90	2.97	6.32	1.56	−0.565**	−0.247*	0.410**	0.730**
NH_4^+-N/(mg/L)	0.33	0.75	3.43	0.76	−0.545**	0.252*	0.490**	0.662**
PO_4^3-P/(mg/L)	0.01	0.02	0.15	0.04	−0.380**	−0.279*	−0.292*	0.338**
总磷 TP/(mg/L)	0.02	0.09	0.35	0.08	−0.389**	−0.289*	0.276*	0.329**
平均水深 Mean water depth/cm	10.00	30.31	80.00	17.11	−0.461**	0.344	0.226	0.555**
平均水宽 Mean water width/m	1.10	21.68	102.00	21.87	−0.927**	0.309	0.461*	0.917**
细沙淤泥 Sands/%	5.00	18.52	60.00	15.74	−0.262*	−0.268	0.251	0.505**
砾石 Gravel/%	10.00	23.70	50.00	12.14	0.362**	0.309**	−0.026	−0.329**
鹅卵石 Cobble/%	8.00	33.26	60.00	14.01	0.306**	0.323**	−0.242*	−0359**
大石 Boulder/%	2.00	24.89	65.00	16.31	0.197	0.363**	−0.451**	−0.516**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

表 2 采样点底栖动物群落参数与土地利用的关系

Table 2 Parameters of macrobenthos communities in the sampling sites and their relationships with land use

变量 Variable	最小值 Min	平均值 Mean	最大值 Max	标准差 SD	r			
					草地 Grassland/%	林地 Forest/%	农田 Cropland/%	不透水地表面积比 Percentage of impervious area PIA
总分类单元数 Total number of taxa	1.00	7.33	17.00	4.18	0.260*	0.228*	−0.044	−0.417**
BI index	1.37	5.04	9.26	2.32	−0.519**	−0.373**	0.491**	0.697**
Shannon 多样性指数 Shannon diversity index	0.09	1.28	2.07	0.52	0.251*	0.251*	0.205*	−0.271*
丰富度指数 Richness index	0.00	1.49	2.84	0.73	0.299*	0.205*	−0.268*	−0.420**
EPT/%	0.00	30.29	100	0.32	0.449**	0.161	−0.237*	−0.671**
捕食者 Predator/%	0.00	19.62	71.43	19.33	0.234*	0.120	0.266*	−0.134
撕食者 Shredder/%	0.00	9.41	46.02	14.07	0.002	0.107	−0.185	−0.205*
集食者 Collector/%	0.00	49.42	98.57	30.05	−0.234*	−0.023*	0.066	0.416**
滤食者 Filterer/%	0.00	7.47	100.00	19.08	0.013	0.059	−0.264*	−0.208*
刮食者 Seraper/%	0.00	14.09	67.11	20.16	0.413**	0.205*	−0.262*	−0.619**
敏感类群 Sensitive taxa/%	0.00	30.14	100.00	32.37	0.515**	0.291*	−0.119	−0.695**
耐污类群 Tolerant taxa/%	0.00	22.25	98.57	27.42	−0.711**	−0.309**	0.312**	0.767**
寡毛纲 Oligochaeta/%	0.00	12.68	90.77	24.56	−0.676**	0.284*	0.247*	0.681**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

总分类单元数、丰富度指数、Shannon 多样性指数和 EPT(%)与 PIA 进行线性或指数拟合结果见图 2。随着 PIA 值的升高,4 项指标呈现明显的下降趋势,Shannon 多样性指数、丰富度指数与 PIA 呈显著的线性关系,两项值持续下降并趋于零;总分类单元数、EPT(%)则呈非线性关系。前者下降后稳定在一定范围内,而 EPT

(%)在 PIA 达到约 40%是则完全消失。

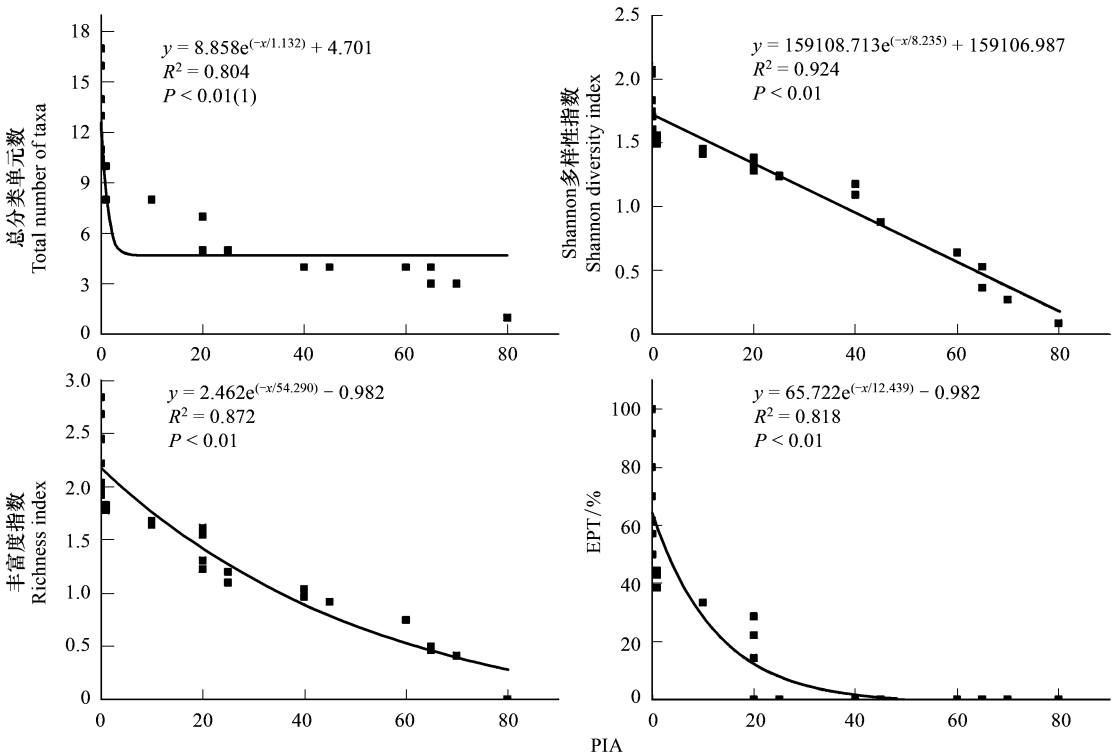

图 2　总分类单元数、Shannon 多样性指数、丰富度及 EPT(%)与 PIA 的关系

Fig.2　Relationships between total number of taxa, Shannon diversity index, richness index, EPT individuals (%) and PIA

除集食者外,底栖动物取食功能类群与 PIA 呈现显著的非线性关系,随着 PIA 值升高,集食者数量持续增加,捕食者、撕食者、刮食者和滤食者的数量却随 PIA 值升高快速下降直至全部消失(图 3)。

敏感类群(%)、寡毛纲(%)与 PIA 同样呈现显著的非线性关系,而 BI 指数和耐污类群(%)与 PIA 呈现显著的线性关系。随着 PIA 值的升高,BI 指数、寡毛纲(%)和耐污类群(%)持续升高。敏感类群(%)在 PIA 值升至 6%时即降低到最低水平并保持稳定(图 4)。

3　讨论

3.1　理化指标与 PIA 的关系

研究表明,水温、电导率、TN、TP、NH_4^+-N、PO_4^3-P、水深、水面宽、细砂淤泥比(%)与 PIA 呈显著正相关,与草地(%)、林地(%)呈显著负相关。溶解氧、pH、砾石(%)、鹅卵石(%)与 PIA 呈显著负相关,与草地(%)、林地(%)成显著正相关,这与国际国内研究结果一致[8,18]。原因可概括为以下几个方面:1)城镇化过程中形成的热岛效应提高了水温;进入水体的各种有机质的增加导致电导率及氮磷水平提高;自然河道的渠道化改造降低了河道的复杂度,使得细沙淤泥比例上升[3]。2)青藏高原土壤多呈碱性,城镇化使得大量有机物排入河流,导致水体酸化,表现出 PIA 值升高而 pH 下降。3)湟水河上游位于青藏高原和黄土高原的交错地带,其干流及主要支流源头多位于青藏高原的高寒草甸,溪流的流量和流速较低,表现为涓涓细流,因此砾石和鹅卵石比例较大,大石的分布较少。而农田和城镇多分布于黄土高原,土层厚,植被覆盖度低,水土流失严重,海拔落差大并呈现阶梯式分布,淤泥比例显著提高,砾石、鹅卵石和大石明显减少[19]。4)湟水河水系源头主要以草地为主,间杂有少量林地,且多为矮灌木,乔木多分布于黄土高原的农业区,多为人工沿河道种植,比例较低,对流域内水环境影响较小,这与我国南方、东北和中原地区有很大的不同。

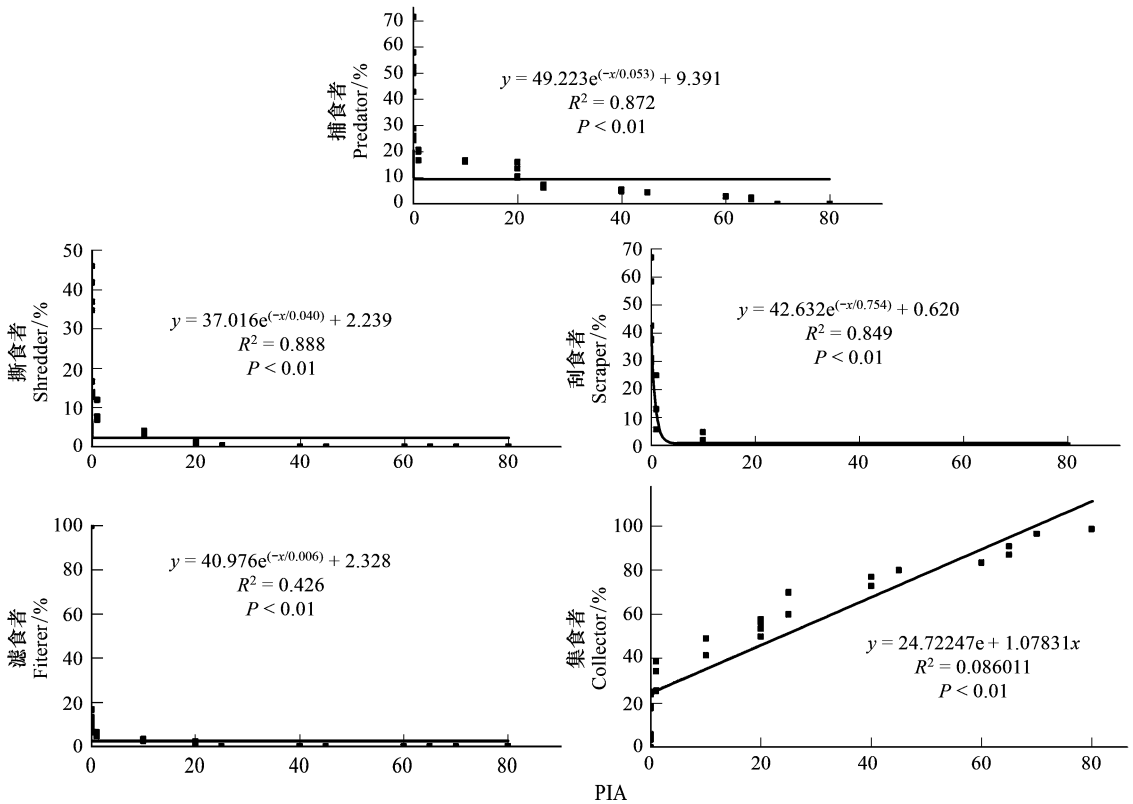

图 3 底栖动物取食功能团与 PIA 的关系

Fig.3 Relationships between functional groups of macrobenthos and PIA

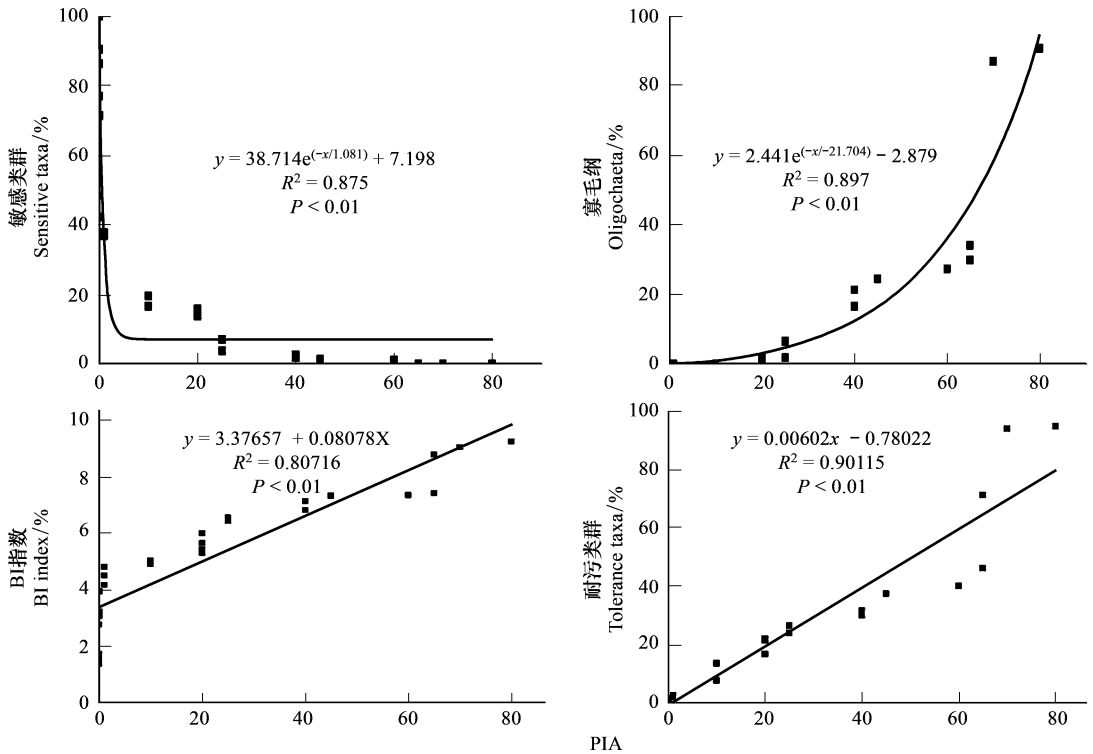

图 4 敏感类群(%)、BI 指数、寡毛纲(%)和耐污类群(%)与 PIA 关系

Fig.4 Relationships between sensitive taxa(%), BI index, oligochaeta (%), tolerance taxa(%) and PIA

3.2　生物指标与 PIA 的关系

本研究表明,首先,总分类单元数、EPT(%)和捕食者(%)、撕食者(%)、滤食者(%)、刮食者(%)及敏感类群(%)与 PIA 呈显著负相关,与林地(%)、草地(%)呈显著正相关。而 BI 指数、集食者(%)、耐污类群(%)和寡毛纲(%)与 PIA 呈显著正相关,与草地(%)、林地(%)呈显著负相关。这与 Walsh 等[3]提出的观点一致。即随着城镇化强度的增加,水体中的底栖动物敏感类群减少,耐污类群增加,寡毛纲逐渐成为优势类群。其次,从取食功能类群方面来看,随着 PIA 值的升高,溪流中的藻类等周丛生物数量减少,食物缺乏导致刮食者数量减少;由于流速降低及水文条件的改变,撕食者、滤食者和捕食者的数量也不断减少,但水中有机碎屑沉积和增加导致了集食者增多[20-21]。第三,从生物指标与 PIA 之间曲线拟合来看,刘东晓[18]的研究显示均为非线性关系,而本研究显示底栖动物生物指标中 Shannon 多样性指数、丰富度指数、集食者(%)、耐污类群(%)和 BI 指数与 PIA 呈现线性相关,与 King[7]等和 Walsh[3]等的结论基本一致。分析原因,青藏高原溪流的特点是海拔高、水温低、污染少,水体中营养物质少,地理隔绝现象明显,底栖生物种类较少,但数量相对较高,对于干扰反应表现出线性的关系。而对于非线性的关系而言,表明 PIA 对生物指标的影响存在着一个阈值。当 PIA 值升高到 6%时,底栖生物中的敏感类群(%)迅速降低到很低的水平直至消失(图 4)。这与 Beach[22]和 Stepenuck[23]等提出的 PIA 大于 10%或在 8%—12%时,底栖动物群落就有可能发生突变的结论基本一致,但本研究显示其阈值更低,上述结论都还有待于今后更多的数据予以验证。

4　结论

由于海拔高、温度低、昼夜温差大、高山大川形成地理隔绝、人为干扰程度相对较低等原因,青藏高原溪流理化指标和生物指标明显不同于平原地区。水温、TN、TP、NH_4^+-N、PO_4^3-P、大气含氧量等理化指标低于平原地区,而水中溶氧量较高。底栖动物的种类和数量在不同溪流和同一溪流不同溪流段也表现出明显的地域差异,即种类数较少,但数量相对较多。随着城镇化强度的迅速提高,湟水河物理生境退化、水体中各种有机质含量也快速升高、导致敏感底栖动物消失、耐污物种个体数量急剧上升,成为优势种,势必对湟水河中下游及黄河水质和底栖生物造成很大的影响。

参考文献(References):

[1] 章辉. 青藏高原牧区城镇化实证研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2006.

[2] 马维胜. 青藏高原生态城市化模式研究. 青海民族研究: 社会科学版, 2002, 13(4): 6-10.

[3] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 贺瑞敏, 王小军. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——Ⅰ.城市水文效应. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605.

[4] Neal C, Robson A J. A summary of river water quality data collected within the land-ocean interaction study: core data for eastern UK rivers draining to the North Sea. Science of the Total Environment, 2000, 251-252: 585-665.

[5] Thomson J D, Weiblen G, Thomson B A, Alfaro S, Legendre P. Untangling multiple factors in spatial distributions: lilies, gophers, and rocks. Ecology, 1996, 77(6): 1698-1715.

[6] Booth D B, Karr J R, Schauman S, Konrad C P, Morley S A, Larson M G, Burges S J. Reviving urban streams: land use, hydrology, biology, and human behavior. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(5): 1351-1364.

[7] King R S, Baker M E, Whigham D F, Weller D E, Jordan T E, Kazyak P F, Hurd M K. Spatial considerations for linking watershed land cover to ecological indicators in streams. Ecological Applications, 2005, 15(1): 137-153

[8] Walsh C J, Fletcher T D, Ladson A R. Stream restoration in urban catchments through redesigning stormwater systems: looking to the catchment to save the stream. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(3): 690-705

[9] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 159-188.

[10] 国家环保局. 水和废水监测分析方法(第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 252-286.

[11] Barbour M T, Gerritsen J, Griffith G E, Frydenborg R, McCarron E, White J S, Bastian M L. A framework for biological criteria for Florida streams using benthic macroinvertebrates. Journal of the North American Benthological Society, 1996, 15(2): 185-211.

[12] Hauer F R, Lamberti G A. Methods in Stream Ecology. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2007: 51-78.

[13] Merritt R W, Cummins K W, Berg M B. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. Dubuque: Kendall/Hunt Publishing Company, 1996.

[14] 王备新. 大型底栖无脊椎动物水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003: 63-72.

[15] Qin C Y, Zhou J, Cao Y, Zhang Y, Hughes R M, Wang B X. Quantitative tolerance values for common stream benthic macroinvertebrates in the Yangtze River Delta, Eastern China. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(9): 5883-5895.

[16] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: The University of Illinois Press, 1949.

[17] Gaufin A R. The use and value of aquatic insects as indicators of organic enrichment // Tarzwell C M, ed. Biological Problems in Water Pollution. Cincinnati: US Public Health Service, 1957: 136-143.

[18] 刘东晓, 于海燕, 刘朔孺, 胡尊英, 俞健, 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.

[19] 谢有仁. 湟水流域水系组成及分布特征. 水利科技与经济, 2011, 17(1): 72-73.

[20] Miller W, Boulton A J. Managing and rehabilitating ecosystem processes in regional urban streams in Australia. Hydrobiologia, 2005, 552(1): 121-133.

[21] Paul MJ. Stream ecosystem function along a land-use gradient[D]. Georgia: University of Georgia, 1999.

[22] Beach D. Coastal Sprawl: The Effects of Urban Design on Aquatic Ecosystems in the United States. Arlington VA: Pew Oceans Commission, 2002.

[23] Stepenuck K F, Crunkilton R L, Wang L Z. Impacts of urban landuse on macroinvertebrate communities in southeastern wisconsin streams. Journal of the American Water Resources Association, 2002, 38(4): 1041-1051.