

网络出版时间:2016-11-24 13:52

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.01.019

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20161124.1352.038.html>

汉江上游纤毛虫群落结构及与环境理化因子的关系

刘智峰^{1,2}, 葛红光^{1,2}, 赵佐平^{1,2}, 李琛^{1,2}, 宋凤敏^{1,2}, 王彦民^{1,2}

(1 陕西理工大学 化学与环境科学学院, 陕西 汉中 723001; 2 陕南秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心, 陕西 汉中 723001)

[摘要] 【目的】研究汉江上游纤毛虫群落结构, 为汉江上游水环境保护和水产养殖提供基础资料。【方法】在汉江上游汉中市境内的烈金坝、梁西渡、南柳渡、蒙家渡和黄金峡 5 个采样点, 于 2013 年 1, 3, 5, 7, 9, 11 月份分别采集 10~20 cm 水样, 统计各样点水体中的纤毛虫种类数、丰度、多样性指数 (I_d) 和 Pantle-Buck 污生指数 (I_s), 分析环境理化因子与纤毛虫群落参数之间的相关性。【结果】从 5 个采样点共鉴定到纤毛虫 98 种(包括 6 个未定名种), 隶属于 3 纲 12 目 39 科 45 属。其中前口目、下毛目均为优势类群, 膜口目、盾纤目为次优势类群, 其余目为常见类群。从物种分布来看, 黄金峡纤毛虫物种数最为丰富, 为 47 种; 其次为南柳渡, 有 45 种, 蒙家渡、梁西渡、烈金坝的物种数分别为 43, 41 和 35 种; 从各物种的相对丰度来看, 汉江上游水体纤毛虫的优势种为毛板壳虫、钝漫游虫、钩刺斜管虫、食藻斜管虫、珍珠映毛虫、长圆膜袋虫、天蓝喇叭虫、叶绿尖毛虫和有肋楯纤虫, 纤毛虫丰度为 20 493~85 872 个/L, 多样性指数和 Pantle-Buck 污生指数分别为 3.73~4.66 和 1.38~1.73。相关性分析表明, 汉江上游水体纤毛虫的物种数与 NH_3^+-N 质量浓度呈显著正相关 ($P<0.05$); 丰度与 NH_3^+-N 质量浓度、 NO_3^--N 质量浓度呈显著正相关 ($P<0.05$), 且与 BOD_5 呈极显著正相关 ($P<0.01$); 污生指数与 NH_3^+-N 质量浓度、 NO_3^--N 质量浓度、 COD_{Cr} 及 BOD_5 呈显著正相关 ($P<0.05$), 但与 DO 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。【结论】汉江上游水质自源头向下游呈现出“清洁—轻度污染—中等污染—轻度污染”的变化趋势, 对汉江上游水体纤毛虫群落影响最大的环境理化因子是 NH_3^+-N , 其次是 NO_3^--N 和 BOD_5 , COD_{Cr} 和 DO 的影响相对较小。

[关键词] 汉江上游; 纤毛虫; 群落结构; 环境理化因子

[中图分类号] X826

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2017)01-0131-09

Community structure of ciliates and its relationship to environmental physicochemical variables in upstream of Hanjiang River

LIU Zhifeng^{1,2}, GE Hongguang^{1,2}, ZHAO Zuoping^{1,2}, LI Chen^{1,2},

SONG Fengmin^{1,2}, WANG Yanmin^{1,2}

(1 College of Chemical and Environment Science, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;

2 Biological Resources Comprehensive Development Collaborative Innovation Center in Qin-Ba

Mountain Area, Hanzhong, Shaanxi 723001, China)

Abstract: 【Objective】Ciliates community structure was investigated at the upstream of Hanjiang River to provide basic data for environmental protection and aquaculture. 【Method】In 2013, water samples were collected every two months from five different stations in Hanzhong including Liejinba, Liangxidu, Nanliudu, Mengjiadu and Huangjinxia. Community structure of ciliates and its relationship to environmental variables were analyzed using number of species, abundance, Margalef index and Saprobic index. 【Result】A total of 98 ciliates species (including six unnamed species) were identified, belonging to three clas-

[收稿日期] 2015-07-10

[基金项目] 秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心自然科学项目(QBXT-Z-(P)-15-8); 汉中市汉台区社会发展攻关项目(2015-K22)

[作者简介] 刘智峰(1979—), 男, 甘肃天水人, 硕士, 主要从事环境生物学研究。E-mail: lzhiheng2005@163.com

ses, twelve orders, thirty-nine families and forty-five genera. Among the species identified, Hypotrichida and Prostomatida were the dominant groups, followed by Hymenostomatida and Scuticociliatida. The numbers of species in Nanliudu, Mengjiadu, Huangjinxia, Liangxidu and Liejinba sampling sites were 45, 43, 47, 41, and 35, respectively. Huangjinxia had the most abundant species. Dominant species were *Coleps hirtus*, *Litonotus obtusus*, *Chilodonella uncinata*, *Chilodonella algivora*, *Cinetochilum margaritaceum*, *Cyclidium oblongum*, *Stentor coeruleus*, *Oxyticha chlorelligera* and *Aspidisca costata*. Annual changes of ciliate abundance ranged from 20 493 to 85 872 L⁻¹, Margalef index ranged from 3. 73 to 4. 66, and Saprobic index ranged from 1. 38 to 1. 73. Correlation analysis revealed that species number was significantly positive correlated with ammonia concentration, and abundance was significantly positive correlated with ammonia concentration, nitrate concentration, and biochemical oxygen demand. Saprobic index was significantly positive correlated with ammonia concentration, nitrate concentration, chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand, while significantly negative correlated with dissolved oxygen. 【Conclusion】 The water quality changed as “clean—slight pollution—moderate pollution—slight pollution” from the source to downstream of Hanjiang River. Ammonium nitrogen had the most important influence on ciliate community, followed by nitrate nitrogen, biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, and dissolved oxygen.

Key words: the upstream of Hanjiang River; ciliates; community structure; environmental physicochemical variables

纤毛虫是动物界最原始、最低等、最简单的单细胞动物,广泛分布在淡水环境中。由于纤毛虫个体微小、比表面积大且对环境敏感,故常常作为水环境的指示生物,研究纤毛虫群落特征的动态变化可以直接或间接地反映水环境质量的状况和发展趋势^[1-3]。汉江是南水北调中线工程最大的水源地,由汉江流入丹江口水库的水量占年入库总水量的 80%^[4]。汉江上游是汉江重要的水源涵养地,其水质优劣不仅关系到汉中地区的生态环境质量,也关系到京、津等地的饮水安全。目前,运用纤毛虫作为指示生物对湖泊、海湾水环境状况的研究较多^[5-9],而对河流的相关研究相对较少,仅见大夏河、水阳江、京杭大运河^[10-12]等的相关研究报道,关于汉江上游水体的研究仅见于汉江汉中段和兴元湖^[13-14]。本研究对汉江上游水域的纤毛虫群落结构进行调查,旨在通过纤毛虫群落参数和环境理化因子之间的关系,评价汉江上游的水质状况,并为该水域水产养殖和水资源的可持续开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

汉江流经汉中市境内的宁强、勉县、南郑、汉台区、城固、洋县、西乡等 7 个县区,干流长 270 km,在汉中地区境内分 3 段,其中勉县武侯镇以上为河源段,长约 101 km;平原段为汉中盆地,长约 116 km;峡谷段为小峡和黄金峡,长约 53 km。汉江上游流

域属亚热带气候,年均气温 12~16 ℃,年均降雨量 700~1 800 mm,其中 5—10 月降雨量占全年降雨量的 80%。土质为红色亚黏土和黄土,植被覆盖率为 56%,森林覆盖率为 50. 12%。

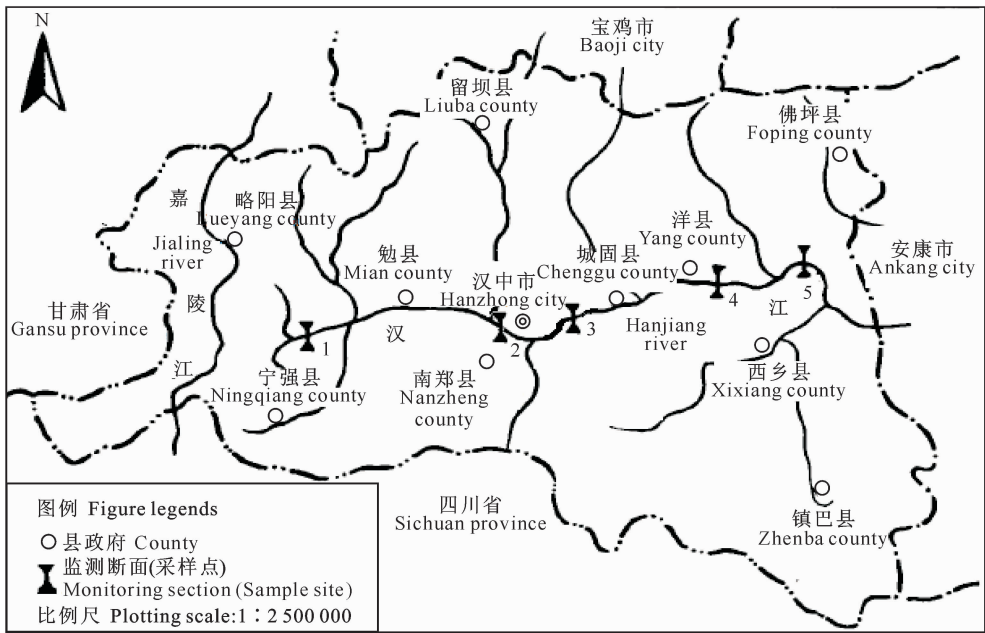
1.2 采样点布设

依据汉中市环境监测站在汉江上游干流的 5 个国家控断面位置,设置 5 个采样点(图 1)。如图 1 所示,1 号采样点为烈金坝(E 106°17′57″,N 33°03′01″),在汉江发源地宁强县烈金坝乡境内;2 号采样点为梁西渡(E 106°54′11″,N 33°02′15″),在南郑县梁山镇;3 号采样点为南柳渡(E 107°12′57″,N 33°06′18″),在城固县柳林镇南侧 2 km 处;4 号采样点为蒙家渡(E 107°32′33″,N 33°11′30″),在洋县黄安镇临江公路北侧;5 号采样点为黄金峡(E 107°48′43″,N 33°11′44″),在洋县黄金峡镇环珠庙村临江公路北侧渡口处。分别于 2013 年 1,3,5,7,9,11 月的 3 日进行采样,全年共采样 6 次。

1.3 样品的采集与处理

在每个采样点取表层(10~20 cm)水样,用自制的 500 mL 采水器随机采样 2 L^[15-16],其中 1 L 水样用于定量分析,依据饶钦止^[17]提出的直接计数法对纤毛虫进行计数,每个水样重复计数 3~5 次,对个体较小的纤毛虫在高倍显微镜下计数,结果取平均值;另 1 L 水样用于定性分析,同时在现场取絮状的漂浮物带回实验室,在显微镜(Olympus CX41-32RFL,日本)下参考文献^[18-21]鉴定纤毛虫物种。

依据 Levine 等^[22] 提出的分类系统进行分类。



1. 烈金坝 Liejinba; 2. 梁西渡 Liangxidu; 3. 南柳渡 Nanliudu; 4. 蒙家渡 Mengjiadu; 5. 黄金峡 Huangjinxia

图 1 汉江上游水体采样点的布置

Fig. 1 Sampling sites at the upstream of Hanjiang River

水质理化性质分析参照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》(2002)进行^[23], 主要指标有水温(温度计测定)、pH 值(PHS-3C 型 pH 计测定)、CODcr (重铬酸钾法测定)、DO (碘量法测定)、BOD₅ (5 d 培养法测定)、NH₃⁺-N (纳氏试剂比色法测定)、NO₃⁻-N (酚二磺酸分光光度法测定)。

1. 4 数据处理与分析

(1)优势类群划分。将物种数最多和次多的目(Order) 定义为优势类群和次优势类群, 将单种的目定义为偶见类群, 出现频次最高的物种定义为优势种。优势度为不同类群物种数占群落总物种数的比例。

(2)多样性指数。根据 Margalef^[24] 的物种多样性指数公式计算:

$$I_d = \frac{S-1}{\ln N_t} \tag{1}$$

式中: I_d 为多样性指数值, S 为种类数, N_t 为水样中纤毛虫的总丰度。 I_d 值的高低表明种类多样性的丰富与贫乏, 可以反映水质的优劣程度: $I_d = 0 \sim 1.0$, 为多污型, $I_d = 1.0 \sim 2.0$, 为 α 中污型, $I_d = 2.0 \sim 3.0$, 为 β 中污型, $I_d = 3.0 \sim 4.0$, 为寡污型, $I_d \geq 4.0$, 为清洁水体。

(3)Pantle-Buck 污生指数(I_s , 以下简称污生指数)。 I_s 的计算公式为:

$$I_s = \sum S_h / \sum h \tag{2}$$

式中: I_s 为水样的污生指数; S_h 为不同种类水样的污生指数分值, 从寡污型到多污型其分值为 1~4; h 为出现频率, 其值为 1~4。污生指数的分级标准为: $I_s = 1.0 \sim 1.5$, 属轻度污染; $I_s = 1.5 \sim 2.5$, 为中度污染; $I_s = 2.5 \sim 3.5$, 为重度污染; $I_s = 3.5 \sim 4.0$, 为严重污染^[13]。

(4)营养功能类群划分。根据 Pratt 等^[25] 的方法将淡水原生动物按食性分成 6 个营养类群, 即光合作用者(P 群)、食藻者(A 群)、食细菌-碎屑者(B 群)、腐生者(S 群)、食肉者(R 群)和无选择性的杂食者(N 群)。通常清洁水体的自养程度高, 纤毛虫群落中 P、A 类群占较大比例, 随着水体有机污染程度的加重, 异养程度提高, P、A 类群比例下降, B、S 类群比例上升。

2 结果与分析

2. 1 汉江上游水体环境的理化性质

《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 规定, II 类水质的判定标准为: pH=6~9, NH₃⁺-N $\leq$ 0.5 mg/L, CODcr $\leq$ 15 mg/L, DO $\geq$ 6 mg/L, BOD₅ $\leq$ 3 mg/L; III 类水质的判定标准为: pH=6~9, NH₃⁺-N $>$ 0.5 $\sim$ $\leq$ 1.0 mg/L, CODcr $>$ 15 $\sim$ $\leq$ 20 mg/L, DO $\geq$ 5 $\sim$ $<$ 6 mg/L, BOD₅ $>$ 3 $\sim$ $\leq$ 4 mg/L; IV 类水质的判定标准为: pH=6~9, NH₃⁺-N $>$

1.0~≤1.5 mg/L,COD_{Cr}>20~≤30 mg/L,DO≥3~<5 mg/L,BOD₅>4~≤6 mg/L。从表 1 可以看出,研究区 NH₃⁺-N 质量浓度均超出Ⅱ类水质标准,烈金坝、梁西渡属于Ⅲ类水质,南柳渡、蒙家渡、黄金峡属于Ⅳ类水质;各采样点 COD_{Cr} 均达Ⅱ类以上水质;烈金坝、梁西渡 BOD₅ 达到Ⅱ类水质标准,南柳渡、蒙家渡、黄金峡 BOD₅ 均超出Ⅱ类水质标准。总体而言,南柳渡、蒙家渡水质劣于其他采样点。

表 1 汉江上游水体环境的理化性质分析

Table 1 Physicochemical factors at the upstream of Hanjiang River

采样点 Sampling site	水温/℃ Water temperature	pH	NH ₃ ⁺ -N/ (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	DO/ (mg·L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg·L ⁻¹)
烈金坝 Liejinba	19.0	6.0	0.566	1.422	4.20	8.51	1.47
梁西渡 Liangxidu	22.0	6.5	0.941	1.691	9.04	6.07	2.36
南柳渡 Nanliudu	17.5	6.5	1.289	1.961	13.14	5.71	3.87
蒙家渡 Mengjiadu	17.0	6.5	1.269	2.098	10.71	5.63	5.49
黄金峡 Huangjinxia	19.0	6.0	1.120	1.581	8.03	6.89	4.16

2.2 汉江上游纤毛虫的群落结构

通过对 5 个采样点为期 1 年的调查,共鉴定到 98 种纤毛虫(表 2),隶属于 3 纲 12 目 39 科 45 属(包括 6 个未定名种),其中动基片纲(Kinetofragminophorea)46 种,占总物种数的 46.9%;寡膜纲(Oligohymenophorea)24 种,占总物种数的 24.5%;多膜纲(Polyhymenophorea)28 种,占总物种数的 28.6%。从各物种的相对丰度来看,汉江上游水体

纤毛虫的优势种主要有:毛板壳虫(*Coleps hirtus*)、钝漫游虫(*Litonotus obtusus*)、钩刺斜管虫(*Chilodonella uncinata*)、食藻斜管虫(*Chilodonella algivora*)、珍珠映毛虫(*Cinetochilum margaritaceum*)、长圆膜袋虫(*Cyclidium oblongum*)、天蓝喇叭虫(*Stentor coeruleus*)、叶绿尖毛虫(*Oxyticha chlorelligera*)、有肋楯纤虫(*Aspidisca costata*)等。

表 2 汉江上游水体纤毛虫的物种组成及分布

Table 2 Species distribution of ciliates at the upstream of Hanjiang River

物种 Species	相对丰度 Relative abundance					污生指数 Saprobic index	功能类群 Functional groups
	烈金坝 Liejinba	梁西渡 Liangxidu	南柳渡 Nanliudu	蒙家渡 Mengjiadu	黄金峡 Huangjinxia		
腔裸口虫 <i>Holophrya atra</i>	+		+			2.0*	B
筒裸口虫 <i>Holophrya simplex</i>				+		2.0*	B
长斜板虫 <i>Plagiocampa longis</i>		+	+			2.0~3.0*	B*
多变斜板虫 <i>Plagiocampa matabilis</i>	+		+		++	1.0~2.0	A,R
武装尾毛虫 <i>Urotricha armatus</i>			+	+	+	2.0~3.0	A
绿色前管虫 <i>Prorodon virides</i>		+	+			3.0	A,B
卵形前管虫 <i>Prorodon ovum</i>	+	+				1.0*	B*
毛板壳虫 <i>Coleps hirtus</i>	+	+++	+++	++	++	1.0~2.0	A,R
双刺板壳虫 <i>Coleps bicuspis</i>	+	+	+	+	+	1.0~2.0	A,R
天鹅长吻虫 <i>Lacrymaria olor</i>			+	+		4.0	R
多变斜口虫 <i>Enchelys variabilis</i>			+	+		4.0	B
简单斜口虫 <i>Enchelys simplex</i>		+		+		3.0~4.0	B
浮雕刀口虫 <i>Spathidium scalpri forme</i>	+				+	1.0~2.0	R*
刀口虫属一种 <i>Spathidium</i> sp.		+			+	1.0~2.0	R*
扭曲管叶虫 <i>Trachelophyllum sigmoides</i>			++		+	2.0~3.0*	B
卑怯管叶虫 <i>Trachelophyllum pusillum</i>		+				2.0~3.0*	B
智利管叶虫 <i>Trachelophyllum chilense</i>				+		2.0~3.0*	B
卵圆口虫 <i>Trachelius ovum</i>			+		+	2.0~3.0*	R
裂口长颈虫 <i>Dileptus amphileptoides</i>		+			+	1.0*	A,R
美洲长颈虫 <i>Dileptus americanus</i>	+					1.0*	A,R
小单环栉毛虫 <i>Didinium balbianii nanum</i>			+			2.0~3.0	R
纺锤裂口虫 <i>Amphileptus fusidens</i>			+			2.0	B*
猎裂口虫 <i>Amphileptus meleagris</i>				++		3.0	R
栉状裂口虫 <i>Amphileptus pectinata</i>			++			2.0~3.0	R
龙骨漫游虫 <i>Litonotus carinatus</i>		+		++	+	3.0	R
钝漫游虫 <i>Litonotus obtusus</i>	++	+++	+++	++	++	3.0	R
天鹅漫游虫 <i>Litonotus cygnus</i>		+	+	+		3.0	R

表 2(续) Continued table 2

物种 Species	相对丰度 Relative abundance					污生指数 Saprobic index	功能类群 Functional groups
	烈金坝 Liejinba	梁西渡 Liangxidu	南柳渡 Nanliudu	蒙家渡 Mengjiadu	黄金峡 Huangjinxia		
片状漫游虫 <i>Litonotus fasciola</i>				+	++	3.0	R
膨胀肾形虫 <i>Colpoda inflata</i>			+			2.0*	A,B
齿脊肾形虫 <i>Colopda steini</i>		+				2.0*	A,B
肾形虫属一种 <i>Colopda</i> sp.			+		+	2.0*	A,B
长篮环虫 <i>Cyrtolophosis elongata</i>				+		3.0	B*
金色篮口虫 <i>Nassula aurea</i>			+	+		3.0*	A
大口薄咽虫 <i>Leptopharynx eurystoma</i>	+	+			+	2.0~3.0	B
水藓薄咽虫 <i>Leptopharynx sphagni</i>		+				2.0~3.0	B
活泼拟小胸虫 <i>Microthorax simulans</i>	+				+	2.0~3.0*	A
绿色小胸虫 <i>Microthorax viridis</i>	+	+				2.0~3.0*	A
尾斜管虫 <i>Chilodonella caudata</i>				+		2.0~3.0	A
巴维利亚斜管虫 <i>Chilodonella bavariensis</i>			+	+		2.0~3.0	A
僧帽斜管虫 <i>Chilodonella cucullus</i>		++			++	2.0~3.0	A
钩刺斜管虫 <i>Chilodonella uncinata</i>	++	+	++	+++	+	2.0~3.0	A
食藻斜管虫 <i>Chilodonella algivora</i>	+++	+++	+++	+++	++	2.0~3.0	A
帽斜管虫 <i>Chilodonella capucina</i>			+		++	2.0~3.0	A,B
非游斜管虫 <i>Chilodonella aplanata</i>					+	2.0~3.0	A
固着足吸管虫 <i>Podophrya fixa</i>		+				1.0~2.0	A
太阳球吸管虫 <i>Sphaerophrya soliiformis</i>				+	+	1.0~2.0	A
大口瞬目虫 <i>Glaucoma macrostoma</i>	+		+			2.0*	A,B
闪烁目虫 <i>Glaucoma scintillans</i>		++			++	2.0*	B*
弯豆形虫 <i>Colpidium campylum</i>				+		3.0~4.0	B
黑睫杵虫 <i>Ophryoglena atra</i>	+				++	2.0	R*
尾草履虫 <i>Paramecium caudatum</i>			+			2.0~4.0	B
绿草履虫 <i>Paramecium bursaria</i>		+			+	2.0	B,P
双小核草履虫 <i>Paramecium Aurelia</i>			+	+	+	2.0~3.0	B
凹扁前口虫 <i>Frontonia depressa</i>		+		+		1.0~2.0	A,R
前口虫属一种 <i>Frontonia</i> sp.	+					1.0~2.0	A,R
钝舟形虫 <i>Lembadion bullinum</i>	+		+			3.0*	B*
纺锤康纤虫 <i>Cohnilembus fusiformis</i>				+++		3.0*	B
珍珠映毛虫 <i>Cinetochilum margaritaceum</i>	++	++	+++	+++	++	3.0	B
冠帆口虫 <i>Pleuronema cornatum</i>	++	+	++	+		2.0~3.0*	B
善变膜袋虫 <i>Cyclidium versatile</i>	+	+		+	+	3.0	B
苔藓膜袋虫 <i>Cyclidium muscicola</i>				+		3.0	B
长圆膜袋虫 <i>Cyclidium oblongum</i>	++	++	+++	++	++	3.0*	B
颗粒膜袋虫 <i>Cyclidium granulosum</i>	++					3.0*	B
膜袋虫属一种 <i>Cyclidium</i> sp.					+	3.0*	B
银灰膜袋虫 <i>Cyclidium glaucoma</i>				++	+++	3.0*	B
点钟虫 <i>Vorticella picta</i>	++		+			2.0~3.0*	B
沟钟虫 <i>Vorticella convallaria</i>					+	2.0~3.0	A,B
小口钟虫 <i>Vorticella microstoma</i>		++		++		3.0~4.0	A,B
游泳钟虫 <i>Vorticella mayeri</i>		+		++	+	2.0	B
树状聚缩虫 <i>Zoothamnium arbuscula</i>				+		3.0	B
天蓝喇叭虫 <i>Sientor coeruleus</i>	++	++	++	++	+++	3.0	A,R
多态喇叭虫 <i>Sientor polymorphrus</i>					+	3.0	A,R
小旋口虫 <i>Spirostomum minus</i>	++		+			2.0~3.0	B
大弹跳虫 <i>Halteria grandinella</i>	++	+++				2.0	B*
弹跳虫属一种 <i>Halteria</i> sp.		+			+	2.0	B*
旋回侠盗虫 <i>Strobilidium gyrans</i>	+					1.0	B
陀螺侠盗虫 <i>Strobilidium velox</i>	+		+			1.0	B*
矛形圆纤虫 <i>Strongylidium lanceolatum</i>	++				+	2.0~3.0	A,B
圆纤虫属一种 <i>Strongylidium</i> sp.				+	+	2.0~3.0	A,B
绿尾枝虫 <i>Urostyla viridis</i>		+		++		2.0	A,B
尾瘦尾虫 <i>Uroleptus candatus</i>			++		++	2.0~3.0	B

表 2(续) Continued table 2

物种 Species	相对丰度 Relative abundance					污生指数 Saprobic index	功能类群 Functional groups
	烈金坝 Liejinba	梁西渡 Liangxidu	南柳渡 Nanliudu	蒙家渡 Mengjiadu	黄金峡 Huangjinxia		
纺锤全列虫 <i>Holosticha kessleri</i>	++	++			++	2.0	A,B
绿全列虫 <i>Holosticha viridis</i>	++		+			2.0	A
念珠角毛虫 <i>Keronopsis monilata</i>			+			2.0~3.0	A,B
殖口虫属一种 <i>Gonostomum</i> sp.		+	+	+		3.0	B
叶绿尖毛虫 <i>Oxyticha chlorelligera</i>	++	++	+++	+++	++	2.0~3.0*	A,B
腐生尖毛虫 <i>Oxyticha saprobia</i>			+	+	+	2.0~3.0*	A,B
伪尖毛虫 <i>Oxyticha fallax</i>	+	+				2.0~3.0*	A,B
贪食后毛虫 <i>Opisthotricha euglenivora</i>				+	+	3.0	B
后毛虫属一种 <i>Opisthotricha</i> sp.			++			3.0	B*
膜状急纤虫 <i>Tachysoma pellionella</i>		+				2.0~3.0	A,B
似织毛虫 <i>Histriculus similis</i>			+			3.0~4.0*	B
贻贝棘尾虫 <i>Stylonychia mytilus</i>					+	3.0*	A,B,R
背状棘尾虫 <i>Stylonychia notophora</i>					++	3.0	A,B
有肋楯纤虫 <i>Aspidisca costata</i>	++	+++	+++	+++	+++	2.0	B
齿楯纤虫 <i>Aspidisca dentata</i>		+		++	++	2.0	B*
阔口游仆虫 <i>Euplotes eury stomus</i>	++	+	+++			2.0	R
近亲游仆虫 <i>Euplotes affinis</i>			++	+	+	2.0	B
合计 Total	35	41	45	43	47		

注:“+、++、+++”表示相对丰度,根据显微镜下观察时各物种的出现频率划分:“+++”为 100~999 个/L,“++”为 10~99 个/L,“+”为 1~9 个/L。* 为类推值。

Note: +, ++, and +++ denote relative abundance according to the occurrence frequency of each species in optical microscope: “+++” means 100—999 /L, “++” means 10—99 /L, and “+” means 1—9 /L. * means approximate value.

从汉江上游水体纤毛虫各类群的优势度(表 3)来看,前口目、下毛目种类最多,均为优势类群,优势度均为 21.43%;膜口目、盾纤目为次优势类群,优势度分别为 10.20%和 9.18%,其余目为常见类群。

从物种分布来看,黄金峡纤毛虫物种数最丰富,为 47 种;南柳渡有 45 种,位居其次;蒙家渡为 43 种,梁西渡为 41 种,烈金坝最少,仅有 35 种。

表 3 汉江上游水体纤毛虫的群落结构

Table 3 Community structure of ciliates at the upstream of Hanjiang River

门 Phylum	纲 Class	目 Order	科数 Family	属数 Genera	种数 Species	优势度/% Dominance
纤毛门 Ciliophora	动基片纲 Kinetofragminophorea	前口目 Prostomatida	7	10	21	21.43
		侧口目 Pleurostomatida	2	2	7	7.14
		肾形目 Colpodida	2	2	4	4.08
		篮口目 Nassulida	3	3	5	5.10
		管口目 Cyrtophorida	1	1	7	7.14
		吸管虫目 Suctorida	2	2	2	2.04
	寡膜纲 Oligohymenophorea	膜口目 Hymenostomatida	6	6	10	10.20
		盾纤目 Scuticociliatida	4	4	9	9.18
		缘毛目 Peritrichida	2	2	5	5.10
	多膜纲 Polyhymenophorea	异毛目 Heterotrichida	1	2	3	3.08
		寡毛目 Oligotrichida	2	2	4	4.08
		下毛目 Hypotrichida	7	9	21	21.43
合计 Total	3	12	39	45	98	100.00

2.3 汉江上游纤毛虫丰度和多样性指数

汉江上游纤毛虫丰度变化趋势如图 2 所示。图 2 表明,一年之内汉江上游纤毛虫丰度为 20 493~85 872 个/L,平均丰度为 53 561 个/L。其中 1 月份丰度最小(20 493 个/L),然后逐渐增大,7 月份丰度达到最大(85 872 个/L),之后又逐渐下降。年内纤毛虫的多样性指数为 3.73~4.66,其中 1 月份最

小,5 月份最大,与丰度的变化趋势基本一致。

2.4 汉江上游纤毛虫污生指数和营养功能类群

经计算,汉江上游水体各采样点纤毛虫的污生指数为 1.38~1.73,其大小表现为烈金坝(1.38)<黄金峡(1.57)<梁西渡(1.59)<南柳渡(1.64)<蒙家渡(1.73)。根据 Pratt 等^[25]的方法对汉江上游 5 个采样点的纤毛虫营养功能类群进行分析,结果表

明,P 和 A 类群在各采样点的比例以烈金坝最高, 占比比例分别 51.07%,48.78%和 37.78%;最小为蒙家渡,为 27.91%。黄金峡、梁西渡、南柳渡 P 和 A 类群所

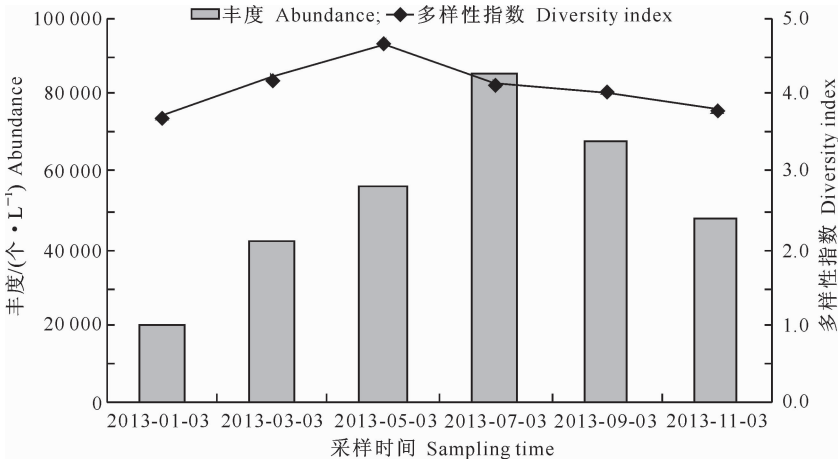


图 2 汉江上游纤毛虫丰度、多样性指数的变化

Fig. 2 Annual variation of ciliates abundance and diversity at the upstream of Hanjiang River

2.5 汉江上游水体环境理化因子与纤毛虫群落特征参数的相关性

对汉江上游水体环境理化因子与纤毛虫群落特征参数进行 Pearson 二元相关性分析,结果如表 4 所示。由表 4 可知,汉江上游水体纤毛虫物种数与 NH₃⁺-N 质量浓度呈显著正相关($P<0.05$);丰度和 NH₃⁺-N、NO₃⁻-N 质量浓度呈显著正相关($P<$

0.05),且与 BOD₅ 呈极显著正相关($P<0.01$);污生指数与 NH₃⁺-N、NO₃⁻-N、COD_{Cr} 及 BOD₅ 质量浓度呈显著正相关($P<0.05$),但与 DO 质量浓度呈极显著负相关($P<0.01$)。由此可见,在汉江上游水体环境理化因子中,对纤毛虫群落结构影响最大的是 NH₃⁺-N,其次是 NO₃⁻-N 和 BOD₅,COD_{Cr} 和 DO 的影响相对较小。

表 4 汉江上游水体环境理化因子与纤毛虫群落特征参数的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between physicochemical factors and structural parameters of ciliate community at the upstream of Hanjiang River

群落参数 Structural paramete	水温 Water temperature	pH	NH ₃ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	COD _{Cr}	DO	BOD ₅
物种数 Species number	-0.262	0.238	0.874 *	0.489	0.701	-0.680	0.750
丰度 Abundance	-0.750	0.536	0.901 *	0.917 *	0.781	-0.756	0.952 * *
多样性指数 Diversity index	0.456	-0.426	0.026	-0.485	-0.090	0.103	-0.140
污生指数 Saprobic index	-0.349	0.763	0.923 *	0.924 *	0.860 *	-0.955 * *	0.869 *

注: * 表示在 $P=0.05$ 水平上的相关性(单侧); * * 表示在 $P=0.01$ 水平上的相关性(单侧)。
Note: * Correlation is significant at the $P=0.05$ level (1-tailed); * * Correlation is significant at the $P=0.01$ level (1-tailed).

2.6 汉江上游水体环境质量综合评价

纤毛虫是单细胞动物,对环境变化反应灵敏,是比较适合的环境监测生物^[26]。但用生物特征指标监测环境质量只是一种定性描述,只有将生物监测与理化监测方法相结合,才有可能提高监测结果的准确性和可靠性^[20]。根据汉江上游水体环境理化因子和纤毛虫群落特征参数,对该区域水体环境质量进行综合评价,结果见表 5。从表 5 可以看出,汉江上游 5 个采样点的水质存在较明显的空间差异,其中烈金坝水质最好,属于寡污型(Os)水质,梁西渡、南柳渡、黄金峡水质属于轻度污染(β -ms),蒙家渡水质最差,属于中度污染(α -ms)。推测原因可能

是由于烈金坝处于汉江源头,水量较小,流经两岸多是山丘,植被良好,随着水流向下,依次流经梁西渡、南柳渡、蒙家渡,河段两侧分布着勉县、汉中市區、城固、洋县 4 个城市,人口密集,企业众多,生活污水及工业废水排放量大大增加,使得水质逐渐变差,尤其在蒙家渡采样点,水体 NO₃⁻-N、BOD₅ 质量浓度均达到了最大值,NH₃⁺-N 质量浓度仅次于南柳渡,位居第二,相应的纤毛虫群落参数中,污生指数、多样性指数、P 和 A 类群比例都降到了最小值。在蒙家渡到黄金峡河段内,两岸再无县城分布,外源污染流入较少,水体得到自净,水质回升。总之,汉江上游 5 个采样点水质自源头向下游呈现出“清洁—轻度

污染—中等污染—轻度污染”的变化趋势。

表 5 汉江上游水体环境质量的综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of water quality at the upstream of Hanjiang River

评价指标 Evaluation index	烈金坝 Liejinba	梁西渡 Liangxidu	南柳渡 Nanliudu	蒙家渡 Mengjiadu	黄金峡 Huangjinxia
多样性指数 Margalef diversity	β-ms	Os	β-ms	α-ms	Os
污生指数 Saprobic index	Os	β-ms	β-ms	α-ms	β-ms
P、A 类群比例 PA groups percentage	Os	β-ms	β-ms	α-ms	Os
NH ₃ ⁺ -N 质量浓度 Ammonia nitrogen content	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
BOD ₅ Biochemical oxygen demand	优Ⅱ Better thanⅡ-class	优Ⅱ Better thanⅡ-class	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
综合评价 Comprehensive evaluation	Os	β-ms	β-ms	α-ms	β-ms

3 讨 论

依据纤毛虫对微环境变化十分敏感的特点,纤毛虫物种数、丰度和多样性指数等结构参数均能客观反映水体状况及变化趋势^[27]。汉江上游水体纤毛虫的群落特征参数与环境理化因子的相关性分析表明,对纤毛虫群落影响最大的是 NH₃⁺-N 质量浓度,其次是 NO₃⁻-N 和 BOD₅ 质量浓度,CODcr 和 DO 的影响相对较小。相对湖泊、水库而言,汉江水体营养物质比较贫乏,纤毛虫群落中,光合作用者(P 群)、食藻者(A 群)营养类型,即 P 和 A 类群纤毛虫占到 50% 以上,这类纤毛虫以浮游植物为食,而浮游植物数量主要取决于水体中的无机态 N、P 含量,表现在环境理化因子参数上就是 NH₃⁺-N 和 NO₃⁻-N 质量浓度。CODcr、BOD₅ 都是反映水体有机物含量的指标,但是 BOD₅ 能够更加准确地反映被微生物所降解的有机物的量,因此其与纤毛虫群落参数的相关性更大,特别是与丰度呈极显著正相关。李静等^[5]对太湖、巴桑等^[16]对拉鲁湿地,Shi 等^[12]对京杭大运河水体纤毛虫群落与环境理化因子的相关性研究均表明,水温是影响纤毛虫群落结构的主要环境理化因子之一。而本研究表明,影响汉江上游纤毛虫群落结构的环境理化因子中,水温的相关性很低,原因可能是汉江上游流域位于秦巴山区之间的汉中盆地,属于亚热带气候,全年水温最大值和最小值仅有 5℃ 之差,因而其对纤毛虫生长影响不大。

4 结 论

1) 汉江上游共鉴定到纤毛虫 98 种,隶属于 3 纲 12 目 39 科 45 属(包括 6 个未定名种),其中动基片纲(Kinetofragminophorea)最多,寡膜纲(Oligohymenophorea)次之,多膜纲最少。

2) 汉江上游水体中纤毛虫的丰度为 20 493~85 872 个/L,变化趋势呈单峰型,1 月份最小,7 月

份最大;优势种为毛板壳虫(*Coleps hirtus*)、钝漫游虫(*Litonotus obtusus*)、钩刺斜管虫(*Chilodonella uncinata*)、食藻斜管虫(*Chilodonella algivora*)、珍珠映毛虫(*Cinetochilum margaritaceum*)、长圆膜袋虫(*Cyclidium oblongum*)、天蓝喇叭虫(*Stentor coeruleus*)、叶绿尖毛虫(*Oxyticha chlorelligera*)、有肋楯纤虫(*Aspidisca costata*)。

3) 汉江上游水体环境质量自源头向下游呈现出“清洁—轻度污染—中等污染—轻度污染”的变化趋势,环境理化因子与纤毛虫群落参数的相关性分析表明,对纤毛虫群落影响最大的环境理化因子是 NH₃⁺-N 质量浓度,其次为 NO₃⁻-N 和 BOD₅ 质量浓度,CODcr 和 DO 的影响相对较小。

[参考文献]

[1] Xu H, Min G S, Choi J K, et al. An approach to analyses of periphytic ciliate colonization for monitoring water quality using a modified artificial substrate in Korean coastal waters [J]. Mar Pollut Bull, 2009, 58: 1278-1285.

[2] Kiss Á K, Ács É, Kiss K T, et al. Structure and seasonal dynamics of the protozoan community (heterotrophic flagellates, ciliates, amoeboid protozoa) in the plankton of a large river (River Danube, Hungary) [J]. Eur J Protistol, 2009, 45: 121-138.

[3] Jiang Y, Xu H, Hu X, et al. An approach to analyzing spatial patterns of planktonic ciliate communities for monitoring water quality in Jiaozhou Bay, northern China [J]. Mar Pollut Bull, 2011, 62: 227-235.

[4] 张中旺, 李新民. 南水北调中线工程水源地的主要问题与对策 [J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2004, 38(4): 510-514. Zhang Z W, Li X M. The main problems and corresponding measures to water resource area of the middle route of Chinese south to north water transfer project [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition), 2004, 38(4): 510-514.

[5] 李 静, 戴 曦, 孙 颖, 等. 太湖浮游纤毛虫群落结构及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4672-4681. Li J, Dai X, Sun Y, et al. Community structure of planktonic

- ciliates and its relationship to environmental variables in lake Taihu [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4672-4681.
- [6] 姜建国, 张颖, 吴生桂. 东湖原生动物群落结构变化与水质差异的相关研究 [J]. *生态学杂志*, 2000, 19(5): 40-44.
- Jiang J G, Zhang Y, Wu S G. Studies on the relationship between the protozoan community structures with the water qualities in lake Donghu [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(5): 40-44.
- [7] 王善, 沈卓, 王庆, 等. 汕头南澳海域不同养殖区浮游纤毛虫群落结构的比较 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2215-2221.
- Wang S, Shen Z, Wang Q, et al. A comparative study on community structure of planktonic ciliates in different mariculture areas of Nan'ao Island in Shantou City [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2215-2221.
- [8] 杨金鹏, 姜勇, 胡晓钟. 青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系 [J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1703-1712.
- Yang J P, Jiang Y, Hu X Z. The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6): 1703-1712.
- [9] 姜勇, 许恒龙, 朱明壮, 等. 胶州湾浮游原生生物时空分布特征: 丰度周年变化及与环境因子间的关系 [J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(3): 17-23.
- Jiang Y, Xu H L, Zhu M Z, et al. Planktonic protists in Jiaozhou bay, China: annual variation abundance and correlation with environmental conditions [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(3): 17-23.
- [10] 陈凌云, 康瑞琴, 马正学, 等. 大夏河临夏段枯水期纤毛虫群落特征与水质相互关系研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(6): 550-557.
- Chen L Y, Kang R Q, Ma Z X, et al. Characteristics of ciliate community in Linxia section of the Daxiahe river in low water seasons and its relationship with water quality [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(6): 550-557.
- [11] 马正学, 贺鹏辉, 杨镇, 等. 甘肃徽县水阳江铅锌污染段纤毛虫群落特征及对水质的评价 [J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(3): 83-89.
- Ma Z X, He P H, Yang Z, et al. Community characteristics of ciliates and water quality assessment in the Pb-Zn-contaminated section of the Shuiyangjiang river in Huixian county, Gansu province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(3): 83-89.
- [12] Shi X L, Liu X J, Liu G J, et al. An approach to analyzing spatial patterns of protozoan communities for assessing water quality in the Hangzhou section of Jinghang Grant Canal in China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2012, 19: 739-747.
- [13] 刘智峰, 郑立柱, 李鹏, 等. 汉江汉中段春季纤毛虫群落结构与水质评价 [J]. *广东农业科学*, 2011, 38(10): 121-123.
- Liu Z F, Zheng L Z, Li P, et al. Community structure of ciliates and water evaluation in Hanzhong section of Hanjiang river in spring [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(10): 121-123.
- [14] 刘智峰. 汉中市兴元湖纤毛虫群落结构与水质评价 [J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(17): 4159-4163.
- Liu Z F. Study on community structure of ciliates and water evaluation in Xingyuan lake of Hanzhong [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(17): 4159-4163.
- [15] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- Zhang Z S, Huang X F. *Freshwater plankton research method* [M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [16] 巴桑, 黄香, 普布, 等. 拉鲁湿地夏秋季纤毛虫群落特征及其与水环境的关系 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2740-2748.
- Ba S, Huang X, Pu B, et al. Community characteristics of ciliates and water environment evaluation in Lulu wetland during summer and autumn [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10): 2740-2748.
- [17] 饶钦止. 湖泊调查基本知识 [M]. 北京: 科学出版社, 1956.
- Rao Q Z. *An introduction to limnological survey* [M]. Beijing: Science Press, 1956.
- [18] Patterson D J, Hedley S. Free-living freshwater protozoa: a color guide [M]. London: Wolfe Publishing, 1992.
- [19] Foissner W, Berger H, Schaumberg J. Identification and ecology of limnetic plankton ciliates [M]. Munich: Bavarian State Office for Water Management, 1990.
- [20] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- Shen Y F, Zhang Z S, Gong X J, et al. Modern biomonitoring techniques using freshwater microbiota [M]. Beijing: China Architecture Building Press, 1990.
- [21] 沈韞芬. 原生动物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 139-223.
- Shen Y F. *Protozoology* [M]. Beijing: Science Press, 1999: 139-223.
- [22] Levine N D, Corliss J O, Cox F E G, et al. A newly revised classification of the protozoa [J]. *J Protozool*, 1980, 27: 37-58.
- [23] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 258-281.
- State Environmental Protection Administration. *Water and wastewater monitoring analysis method* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 258-281.
- [24] Margalef R. Diversity and stability in ecological systems [M]. Upton: Brookhaven National Laboratory, 1969: 13-26.
- [25] Pratt J R, Cairns J R J. Functional groups in the Protozoa: roles in differing ecosystems [J]. *Journal of Protozoology*, 1985, 32: 415-423.
- [26] 孔繁翔. 环境生物学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Kong F X. *Environmental biology* [M]. Beijing: High Education Press, 2000.
- [27] Tan X, Shi X, Liu G, et al. An approach to analyzing taxonomic patterns of protozoan communities for monitoring water quality in Songhua River northeast China [J]. *Hydrobiologia*, 2010, 638: 193-201.