

DOI: 10.5846/stxb201806141328

杨欣兰, 巴桑, 黄香. 拉萨河中上游夏秋季纤毛虫群落时空变动及其与环境的关系. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Yang X L, Ba S, Huang X. Spatial and temporal variation in ciliate communities and relationships with environmental conditions in the middle and upper reaches of the Lhasa River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

拉萨河中上游夏秋季纤毛虫群落时空变动及其与环境的关系

杨欣兰¹, 巴桑^{1,*}, 黄香²

1 西藏大学理学院青藏高原湿地与流域生态实验室, 拉萨 850000

2 西藏大学理学院化学与环境科学系, 拉萨 850000

摘要:为揭示中国西藏高原河流浮游纤毛虫群落结构特征及与水环境的关系,于2015—2016年的8月和11月,利用25号浮游生物网,分别在拉萨河中上游共8个代表性采样点,共采集64个水样。物种鉴定采用活体观察和固定染色相结合的方法。共鉴定出纤毛虫91种,夏季49种,各样点物种数由小到大依次为:S2<S4<S8<S5<S1<S3=S7<S6。秋季64种,各样点物种数由小到大依次为:S4<S3=S1=S2=S5<S8<S6=S7。夏季各样点丰度为 1.2×10^4 — 5.6×10^5 个/L,秋季各样点丰度在 1.2×10^4 — 2.6×10^5 个/L之间。夏、秋季的优势种均为12种且优势种组成与分布不同,表现该流域纤毛虫存在明显的时空差异;群落结构分析显示:纤毛虫群落结构简单,物种组成多样性低而分布均匀;纤毛虫营养功能结构分析表明,夏季B、S类群的物种丰富度低于秋季;相关分析表明,总磷和总氮是影响夏季纤毛虫物种多样性的主要环境因子,并且浊度、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是影响秋季纤毛虫的主要环境因子。

关键词:纤毛虫;群落结构;时空变化;拉萨河;西藏

Spatial and temporal variation in ciliate communities and relationships with environmental conditions in the middle and upper reaches of the Lhasa River

YANG Xinlan¹, BA Sang^{1,*}, HUANG Xiang²

1 Laboratory of Wetland and Catchments Ecology in Tibetan Plateau, Faculty of Natural Sciences, Tibet University, Lhasa 850000, China

2 Department of Chemistry and Environmental Sciences, Faculty of Natural Sciences, Tibet University, Lhasa 850000, China

Abstract: In order to explore the community structure of planktonic ciliates in the Tibetan plateau river of China and their relationship with the environmental factors, investigation was carried out from August 2015 to November 2016 in the upper and middle reaches of the Lhasa River. A total of 64 samples were collected from eight representative areas using 25# standard plankton net. Species identification using live observation and fixed-staining method. As a result, 91 species of ciliates were identified in this study: 49 species in summer, the order of species number in eight areas is as follows: S2<S4<S8<S5<S1<S3=S7<S6; 64 species in autumn, the order is: S4<S3=S1=S2=S5<S8<S6=S7. The abundance of ciliates of each area was ranged from 1.2×10^4 ind/L to 5.6×10^5 ind/L in summer, and from 1.2×10^4 ind/L to 2.6×10^5 ind/L in autumn. There were 12 dominant species in summer and autumn, respectively, but the composition and distribution were different, which revealed the spatial and temporal variation in ciliates in this basin. The community structure analysis indicated that the ciliate community has a simple structure, low diversity, and uniform distribution. The structural analysis of the nutritional function of ciliates showed that the abundance of B and S groups in summer was lower than that in autumn. Correlation analysis suggested that total phosphorus and total nitrogen were main environmental factors which influenced the diversity of summer ciliates; additionally, turbidity, $\text{NH}_4\text{-N}$, and $\text{NO}_3\text{-N}$ were the main environmental factors influencing autumn ciliates.

基金项目:国家自然科学基金项目(31360509, 21667027);国家重点研发计划项目(2016YFC0502004-5)

收稿日期:2018-06-14; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbasang2003@aliyun.com

Key Words: Ciliated protozoa; community structure; spatio-temporal variation; Lhasa River; Tibet

纤毛虫广泛分布于淡水、海水及潮湿的土壤中,在微生物食物网中物质循环与能量流动传递中起着重要的枢纽作用^[1-2]。该类生物的物种组成及功能结构的变动直接影响到水生生态系统中食物网的组成及其他水生生物的分布和丰度^[3-4]。因其繁殖周期简单而短暂,加之对水环境的变化敏感,许多种类已广泛用作水环境污染的指示者^[5-6]。因此,揭示纤毛虫的群落变化规律对研究各类河流等水域的自净效能及污染评价均具有重要的意义^[7]。

尽管国内外有关种类水体原生动动物群落结构的研究已有大量的报道^[8-9],但是关于青藏高原纤毛虫分类学组成及群落结构变动及与环境间的关系的报道甚少,尤其有关拉萨河中上游纤毛虫的研究尚处完全不详之中^[10-12]。本工作于 2015—2016 年 8 月、11 月分别对拉萨河中上游纤毛虫群落结构的时空变化特征与水环境之间的关系进行了研究(2016 年的纤毛虫数据为 2015 年纤毛虫的补充数据),旨在揭示高原河流有关纤毛虫群落结构时空变化及与环境间的耦合关系,为了我国青藏高原水域环境监测与保护提供基础数据和科学依据。

1 材料和方法

1.1 样区概况

拉萨河是雅鲁藏布江五大一级支流之一,发源于念青唐古拉山的南麓、澎错东南约 15 km 的澎错扎玛朵山峰下。拉萨河干流全长约 550 km,流域面积 32896 km²,平均海拔在 4 km 以上。径流丰富,整个水系呈现羽毛状。主要支流有:桑曲、拉曲、雪绒藏布、墨竹玛曲和堆龙曲等。根据河谷形态和地质情况,拉萨河大致分为上、中、下游三段,从源头到桑曲汇入口为上游段。受地势的影响,气候寒冷,为高原大陆型气候。流域内人类活动相对稀少,河流环境基本保持原生态。从桑曲汇入口到旁多拉曲汇入口为中游段,称为热振藏布,地处高原温带半干旱季风气候区^[13]。该流域的主要补给水源为冰川融雪水和天然降水。

1.2 样点设置

根据拉萨河中上游的自然环境特征及水体功能的特殊性,共设置 8 个样点,其中 S1、S2、S5 和 S8 为拉萨河主干流,地处高山草甸、灌木和农田生态系统,S3 和 S4 为拉萨河一级支流-拉曲,地处高山草甸和高寒草甸生态系统;S6 和 S7 为拉萨河一级支流-雪绒藏布,地处灌木和农田生态系统。流域内水体除 S2(水库静水)河床为草甸外,其余都是砾石和砂石组成的山区稳定性河流,坡度较大,水流速度快(图 1)。

1.3 样品的采集与处理

本次研究分别于 2015 年 8 月 1 日和 10 月 30 日与 2016 年 8 月 3 日和 11 月 1 日进行样品采集,每次采集时间为一周。样品采集及室内处理方法均参照《淡水浮游生物研究方法》进行^[14]。定性样品用 25 号浮游生物网(孔径 64 μm),在水面下 0.8—1.2 m 作 ∞ 字型拖网 8—10 min;定量样品在上述深度采集 1 L,随后用 10% 鲁哥氏液固定,静置 24 h 后沉淀浓缩至 50 mL。移取 0.1 mL 浓缩液至 0.1 mL 计数框,在 10×40 倍显微镜下全片计数纤毛虫数量(平行 3 次)^[15]。

水体 pH 值、水温、电导率、总溶解盐、盐度现场利用 PCSTestr-35 型仪器(新加坡产)测定;溶解氧采用 HI-9146 便携式溶解氧测定仪(德国产)测得;浊度用 HI-98703 高精度数据型浊度测定仪(德国产)测得;水流速度采用 FP-111 直读式流速仪(美国产)测得;总氮、总磷、氨氮和化学需氧量测定参照水和废水监测分析方法(第四版)和地表水环境质量标准(GB 3838—2002)于室内完成。

1.4 分类与鉴定

用活体观察、鲁哥氏液染色固定相结合的方法鉴定物种^[2];鉴定依据下列文献:《原生动物学》^[2],《淡水微型生物与底栖动物图谱》^[16],《中国黄渤海的自由生纤毛虫》^[17],《西藏水生无脊椎动物》^[18]。采用 Levine 分类系统进行分类地位的划分^[19]。

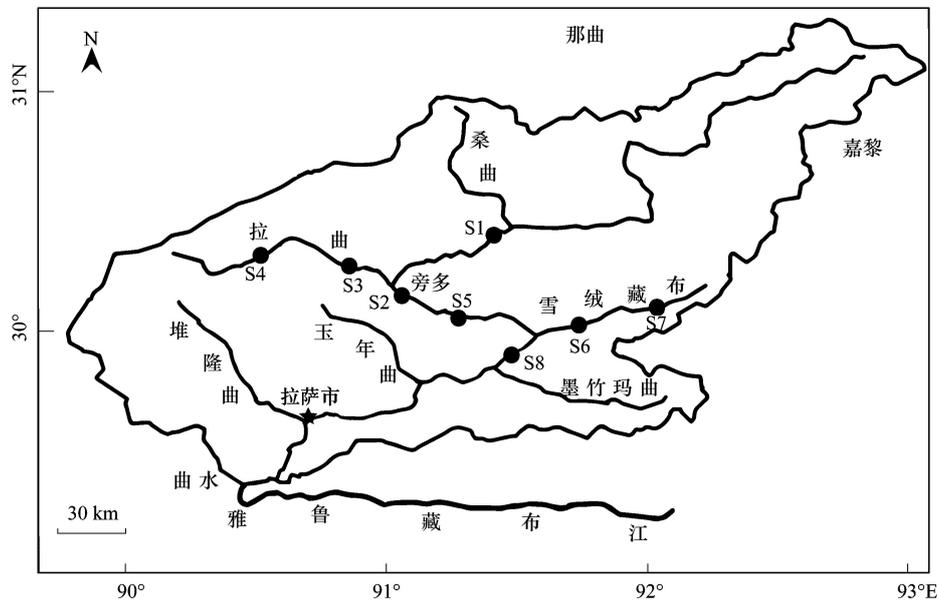


图 1 拉萨河中上游样点分布图

Fig.1 Sampling sites in middle and upper reaches of the Lhasa River

S: 样点, Site

1.5 数据统计与分析

1.5.1 类群划分

对已鉴定到的各级分类单元及物种进行统计,按目级水平将物种最多的分类单元定义为优势类群,将物种次多的分类单元定义为次优势类群,将单物种或含最少种类的分类单元定义为偶见类群,其余的为常见类群^[20]。

1.5.2 群落参数

用 Excel 计算了 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数;用 SPSS 23.0 对纤毛虫群落特征参数与水体理化因子进行了 Pearson 相关性分析;用 R 软件对纤毛虫优势物种与环境因子进行了 CCA 典范对应分析。根据各样点纤毛虫出现的频率和相对丰度,依据 McNaughton 优势度系数 $Y \geq 0.02$ 时定为优势种。上述群落参数公式如下:

$$(1) \text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H = - \sum P_i \times \ln P_i (P_i = N_i/N)$$

$$(2) \text{Simpson 优势度指数: } S = \sum N_i(N_i - 1)/(N(N - 1))$$

$$(3) \text{Pielou 均匀度指数: } E = H/\ln N_s$$

$$(4) \text{McNaughton 优势度系数: } Y = f_i \times N_i/N$$

式中, N 为同一样点中个体总数; N_i 为第 i 种的个体数; N_s 为物种数; 其中 f_i 为第 i 种出现的频率^[21-25]。

1.5.3 营养功能类群划分

按照 Pratt 和 Cairns 的方法,将纤毛虫按食性分成 6 个营养功能类群^[26],即光合自养者(P 群)、食藻者(A 群)、食菌—碎屑者(B 群)、腐养性(S 群)和食肉者(R 群)。若群落中 B 群和 S 群占的比例较大,则反映水质较差^[3]。

2 结果

2.1 水体理化因子

通过数据分析得出:水流速度、COD、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在两个季节不存在显著性差异,其余理化因子在两个季节均存在显著性差异,详见表 1。

表 1 拉萨河中游夏、秋季水环境理化因子
Table 1 Environmental factors in middle and upper reaches of the Lhasa River

季节 Seasons	样点 Sites	酸碱度 pH	水温 WT/°C	浊度 TUR(NTU)	电导率 EC/ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	总溶解盐 TDS/ (mg/L)	盐度 Sal/ (mg/L)	溶解氧 DO/ (mg/L)	化学需氧量 COD/ (mg/L)	总磷 TP/ (mg/L)	总氮 TN/ (mg/L)	硝酸盐氮 NO ₃ -N/ (mg/L)	氨氮 NH ₄ -N/ (mg/L)	水流速度 WS/ (m/s)
夏季 Summer	S1	8.58	11.1	95.3	229	163	107	9.34	8.92	0.45	0.45	0.35	0.049	1.3
	S2	8.4	13.5	36.7	174.6	124	82.6	7.76	8.56	0.58	0.58	0.39	0.056	库区静水
	S3	8.21	9.9	73.6	149.6	106	68.9	9.2	8.12	0.43	0.43	0.33	0.063	1.6
	S4	8.14	9.2	71.2	149.1	106	68.4	9.33	5	0.44	0.44	0.29	0.088	1.3
	S5	8.51	11.6	30.2	185	131	86.5	9.14	5	0.54	0.54	0.44	0.032	0.83
	S6	8.62	11.5	3.23	167.1	119	77.9	9.85	7.88	0.4	0.4	0.35	0.035	1.25
	S7	8.58	11.6	2.69	159.1	119	78	9.76	8.36	0.34	0.34	0.24	0.069	0.93
	S8	8.38	12.5	17	178.3	127	83.9	13.16	8.12	0.52	0.52	0.33	0.025	1.03
秋季 Autumn	S1	8.83	2	2.28	325	230	140	7.01	8.84	0.02	0.85	0.39	0.061	0.8
	S2	8.82	9.5	3.07	211	210	149	4.85	8.04	0.03	0.7	0.26	0.354	库区静水
	S3	8.55	1.7	28.5	270	192	115	7.92	8.76	0.05	0.68	0.46	0.314	0.2
	S4	8.37	1.7	24	274	195	117	6.68	8.04	0.02	0.68	0.47	0.341	0.5
	S5	8.52	9.2	1	217	154	99.4	4.9	6.84	0.03	0.64	0.37	0.025	0.4
	S6	8.81	4.5	1.55	216	154	95.6	5.5	6.68	0.02	0.59	0.26	0.028	1.2
	S7	8.74	4.7	1.55	218	157	96.9	5.44	7.88	0.03	0.59	0.28	0.025	1.1
	S8	8.68	4.7	2.39	210	149	95	4.88	6.92	0.03	0.64	0.27	0.025	1.5
检验结果 Inspection result		$t = -2.73$ $df = 14$ $P = 0.02$	$t = 4.9463$ $df = 14$ $P = 0.0007$	$U = 57$ $P = 0.01$	$U = 5$ $P = 0.0034$	$t = -4.4256$ $df = 14$ $P < 0.01$	$t = -3.6976$ $df = 14$ $P = 0.0034$	$U = 63$ $P = 0.003$	$U = 35.5$ $P = 0.75$	$U = 64$ $P = 0.00082$	$t = -5.15948$ $df = 14$ $P = 0.00014$	$t = -0.13$ $df = 14$ $P = 0.89$	$U = 32.5$ $P = 1$	$t = 1.26$ $df = 14$ $P = 0.23$

WT: 水温, Water Temperature; TUR: 浊度, Turbidity; EC: 电导率, Electrical Conductivity; TDS: 总溶解盐, Total Dissolved Salts; Sal: 盐度, Salinity; DO: 溶解氧, Dissolved Oxygen; COD: 化学需氧量, Chemical Oxygen Demand; TP: 总磷, Total Phosphorus; TN: 总氮, Total Nitrogen; NO₃-N: 硝酸盐氮, Nitrate nitrogen; NH₄-N: 氨氮, Ammonia Nitrogen; WS: 水流速度, Water Speed

2.2 群落结构及优势物种

2.2.1 群落结构

拉萨河中上游夏、秋季共鉴定出纤毛虫 91 种。夏季 49 种,隶属于 3 纲 11 目 19 科 26 属,其中,前口目为优势类群(22.45%);侧口目(14.29%)、膜口目(14.29%)和盾纤目(14.28%)为次优势类群;寡毛目(2.04%)为罕见类群,其余为常见类群。各样点纤毛虫物种数由小到大依次为:S2<S4<S8<S5<S1<S3=S7<S6。各样点丰度在 1.2×10^4 — 5.6×10^5 个/L 之间,最高为 S8 样点,最低为 S4 样点。秋季 64 种,隶属于 3 纲 14 目 24 科 31 属,其中,前口目(15.63%)和膜口目(15.63%)为优势类群;缘毛目(10.94%)为次优势类群;异毛目(1.56%)为罕见类群;其余为常见类群。各样点纤毛虫物种数由小到大依次为:S4<S3=S1=S2=S5<S8<S6=S7。各样点丰度在 1.2×10^4 — 2.6×10^5 个/L 之间,丰度最高的样点是 S8,最低的是 S2 与 S4。夏季各个样点的纤毛虫物种数与丰度整体比秋季的高且不尽相同,表现出明显的时空差异(表 2)。

表 2 拉萨河中上游纤毛虫分类学组成

Table 2 Taxonomic composition of ciliates in middle and upper reaches of the Lhasa River

	纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	种比例/% Ratio of species		
夏季 Summer	寡膜纲 Oligohymenophorea	盾纤目	映毛科	1	2	4.09		
			膜袋科	1	5	10.20		
			膜口目	四膜科	2	2	4.09	
				瞬目科	2	2	4.09	
				前口科	1	1	2.04	
		草履科		1	2	4.08		
		缘毛目	钟形科	1	2	4.08		
			下毛目	游仆科	1	3	6.12	
		多膜纲 Polyhymenophora		寡毛目	全列科	1	1	2.04
			弹跳科		1	1	2.04	
		动基片纲 Kinetofragminophora	管口目	斜管科	1	2	4.08	
				吸管目	足吸管科	2	2	4.08
			刺钩目	斜口科	2	3	6.12	
				前口目	前管科	3	7	14.29
					板壳科	1	2	4.08
			侧口目	裸口科	1	2	4.08	
				裂口科	2	5	10.20	
圆纹科	1			2	4.08			
肾形目	肾形科	1	3	6.12				
	共计	3	11	19	26	49	100.00	
秋季 Autumn	寡膜纲 Oligohymenophorea	盾纤目	膜袋科	1	1	1.56		
			盘变形科	盘变形科	1	1	1.56	
				康纤科	1	1	1.56	
				膜口目	四膜科	2	3	4.69
			瞬目科	瞬目科	2	2	3.13	
		前口科		1	3	4.69		
		草履科		1	2	3.13		
		缘毛目		钟形科	1	7	10.93	
		下毛目	游仆科	1	1	1.56		
			多膜纲 Polyhymenophora	全列科	2	3	4.69	
		寡毛目		侠盗科	1	1	1.56	
			弹跳科	1	1	1.56		
			异毛目	突口科	1	1	1.56	
		动基片纲 Kinetofragminophora	核残迹目	喙纤科	1	1	1.56	
			管口目	斜管科	1	4	6.25	
				合膜目	掘齿科	1	2	3.13
			刺钩目	斜口科	2	5	7.81	
前口目	前管科		3	6	9.38			

续表

纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	种比例/% Ratio of species	
		板壳科	1	4	6.25	
	侧口目	裂口科	2	6	9.38	
	篮口目	小胸科	1	1	1.56	
		薄咽科	1	1	1.56	
		圆纹科	1	2	3.13	
	肾形目	肾形科	1	5	7.81	
共计	3	14	24	31	64	100.00

2.2.2 优势种

夏、秋季的优势种数均为 12 种,但是优势种的组成及分布不同。其中,大弹跳虫、多变斜口虫和前突肾形虫是两个季节共有的种;两个季节中 S4 样点的优势度均值最高(0.745),S5 样点的优势度均值最低(0.302);夏季的优势度均值(0.34)略高于秋季(0.18)(表 3)。

表 3 拉萨河中上游纤毛虫优势种

Table 3 Dominant species of ciliates in middle and upper reaches of the Lhasa River

序号 Serial number	物种 Species	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
夏季 Summer									
X1	肋状半眉虫 <i>Hemiophrys pleurosigma</i>		0.06					0.02	
X2	梨形四膜虫 <i>Tetrahymena pyriformis</i>								0.09
X3	卵形嗜腐虫 <i>Sathrophilus oviformis</i>								0.09
X4	武装尾毛虫 <i>Urotricha armata Kahl</i>	0.04	0.11	0.27	0.05	0.04	0.03	0.04	
X5	美丽圆纹虫 <i>Furgasonia protectissima</i>	0.28	0.08		0.04			0.27	
X6	大弹跳虫 <i>Halteria grandinella</i>				0.14				
X7	太阳球吸管虫 <i>Sphaerophrya soliformis</i>	0.04		0.03	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03
X8	多变斜板虫 <i>Plagiocampa mutabilis</i>		0.03						
X9	多变斜口虫 <i>Enchelys variabilis Svec</i>				0.03	0.03	0.19		
X10	前突肾形虫 <i>Colpoda penardi</i>	0.03	0.08	0.2				0.03	0.02
X11	腔裸口虫 <i>Holophrya atra Svec</i>					0.06			
X12	固着足吸管虫 <i>Podophrya fixa</i>		0.06		0.03				
秋季 Autumn									
Q1	龙骨漫游虫 <i>Litonotus carinatus Stokes</i>				0.13				
Q2	肾形豆形虫 <i>Colpidium colpoda</i>			0.03		0.03			0.02
Q3	纵长板壳虫 <i>Coleps elongatus</i>							0.07	
Q4	有肋小胸虫 <i>Microthorax pusillus Engelmann</i>								0.17
Q5	天鹅漫游虫 <i>Litonotus cygnus</i>						0.04		
Q6	大弹跳虫 <i>Halteria grandinella</i>				0.04				
Q7	多变斜口虫 <i>Enchelys variabilis Svec</i>					0.06			
Q8	多小核草履虫 <i>Paramecium multimicronucleatum</i>		0.06						
Q9	多核斜口虫 <i>Enchelys mutans</i>						0.04		
Q10	前突肾形虫 <i>Colpoda penardi</i>	0.04		0.04	0.25	0.04	0.02		0.03
Q11	食藻斜管虫 <i>Chilodonella algivora Kahl</i>			0.14					
Q12	似肾形虫 <i>Colpoda similans</i>	0.13						0.07	

物种序列用季节的拼音首字母加数字依次排序

2.3 群落特征参数

拉萨河中上游夏季 Shannon 多样性指数 S6 样点最高,S4 最低;秋季的 Shannon 多样性指数 S7 样点最高,S4 最低;总体夏季 Shannon 多样性指数(1.97)略高于秋季(1.86),但无显著性差异($t=0.6632$, $df=14$, $P=0.52$)。夏季 Pielou 均匀度指数 S2 样点最高,S8 最低;秋季 Pielou 均匀度指数 S4 最高,S3 最低,总体两个季

节的均值相同(0.81),无显著差异($U=32.5, P=1$);夏季 Simpson 优势度指数 S4 样点最高, S2 最低;秋季 Simpson 优势度指数 S3 最高, S4 最低,总体两个季节的均值相同(0.22),无显著性差异($t=0.12329, df=14, P=0.9038$)(表 4)。

表 4 拉萨河中上游纤毛虫群落特征参数

Table 4 Structural parameters of ciliate communities in middle and upper reaches of the Lhasa River

样点 Sites	物种数 Species	丰度 Abundance	多样性指数(H) Shannon-Wiener diversity index	均匀度指数(E) Pielou evenness index	优势度指数(S) Simpson dominance index
夏季 Summer					
S1	13	48000	2.04	0.8	0.23
S2	8	24000	2.08	1	0.11
S3	14	108000	2.03	0.77	0.2
S4	9	12000	1.61	0.73	0.33
S5	11	144000	1.84	0.77	0.27
S6	17	120000	2.37	0.84	0.17
S7	14	288000	2.13	0.81	0.21
S8	10	564000	1.69	0.73	0.26
秋季 Autumn					
S1	11	24000	1.84	0.77	0.27
S2	11	12000	1.84	0.77	0.27
S3	9	84000	1.61	0.73	0.33
S4	3	12000	1.1	1	0.03
S5	11	60000	1.84	0.77	0.27
S6	17	36000	2.24	0.79	0.17
S7	17	192000	2.4	0.85	0.17
S8	13	264000	2.04	0.8	0.23

2.4 营养功能类群

营养功能结构分析显示: B、S 类群和 P、A 类群在两个季节的各样点中存在一定的差异。夏季 B、S 类群种类数(22)所占总体物种数比例(44.90%)明显高于 P、A 类群(20.41%);秋季 B、S 类群种类数(26)占的物种数比例(40.63%)明显高于 P、A 类群(18.75%)(图 2、3)。

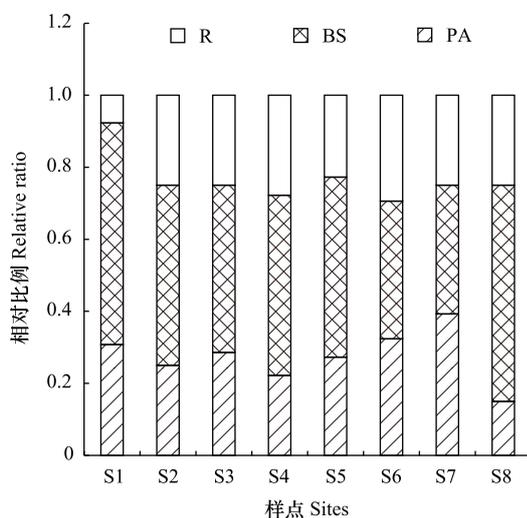


图 2 拉萨河中上游夏季纤毛虫营养功能结构变动

Fig. 2 Variation in functional-trophic structure of ciliate communities in middle and upper reaches of the Lhasa River in summer

P: 光合作者, Photosynthetic autotrophs; A: 食藻者, Algivores; B: 食菌-碎屑者, Bactivores-detritivores; S: 腐养性, Saprotrophs; R: 食肉者, Predalors

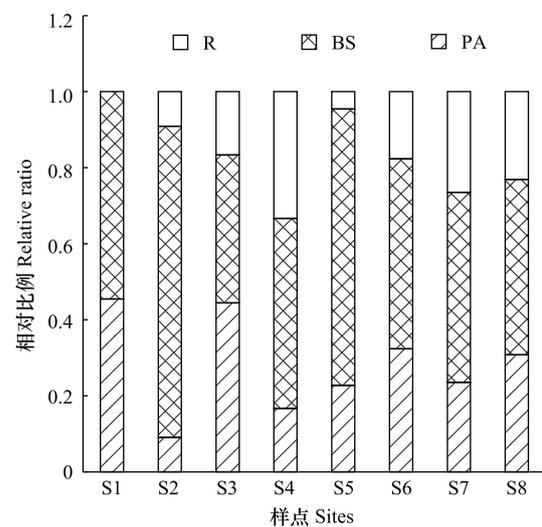


图 3 拉萨河中上游秋季纤毛虫营养功能结构变动

Fig. 3 Variation in functional-trophic structure of ciliate communities in middle and upper reaches of the Lhasa River in autumn

2.5 Pearson 双尾相关性

通过纤毛虫群落参数与水体理化因子作 Pearson 双尾相关性分析可知:夏季,纤毛虫群落 Pielou 均匀度指数与水流速度呈显著负相关($P < 0.05$),纤毛虫物种数与总磷和总氮均呈显著负相关($P < 0.05$);秋季,纤毛虫物种数和群落 Shannon 多样性指数与浊度、氨氮和硝酸盐氮呈显著负相关($P < 0.05$),与 pH 呈显著正相关($P < 0.05$)(表 5)。

2.6 CCA 结果分析

为了进一步阐释和验证拉萨河中上游纤毛虫群落参数与环境因子之间的关系,本文筛选出 5 项主要水体理化指标,分别对两个季节的优势种与环境因子进行了 CCA 分析。结果显示:总磷和浊度是影响夏季纤毛虫优势种的关键因子;水流速度、浊度和总氮是影响秋季纤毛虫优势种的关键因子(图 4、5)。

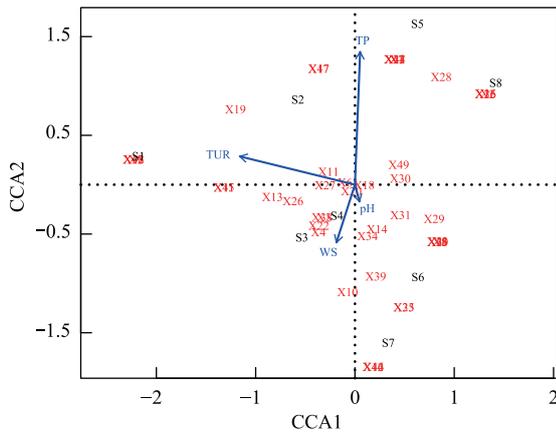


图 4 基于 CCA 方法分析拉萨河中上游夏季纤毛虫群落与环境因子之间的关系

Fig. 4 CCA analysis: showing relationships between ciliate community structure and environment factors in middle and upper reaches of the Lhasa River in summer

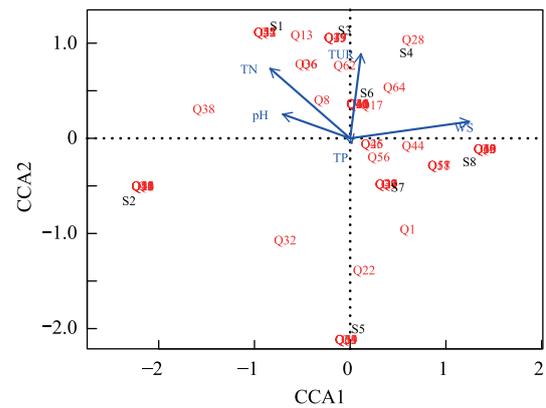


图 5 基于 CCA 方法分析拉萨河中上游秋季纤毛虫群落与环境因子之间的关系

Fig. 5 CCA analysis: showing relationships between ciliate community structure and environment factors in middle and upper reaches of the Lhasa River in autumn

3 讨论

3.1 水体理化因子

本文对拉萨河中上游两个季节的主要水体理化因子进行分析,并参照地表水环境质量标准《GB 3838—2002》分析得出,总磷和总氮的浓度能达到地表水环境质量标准,并且该河段水体水质良好,属于 I—III 类水。其原因是拉萨河中上游地处青藏高原,人口稀薄,且中上游无大中型重工业,对水环境的人为干扰很少^[27]。这也是环境监管与环境卫生有关部门的协调合作,政府有关环境保护政策的计划与实施,使拉萨河独特的高原生态环境得到更为有效的保护和可持续性发展的结果。

3.2 纤毛虫物种组成与丰度

本研究中根据地理条件的特征设置了 8 个样点,能够充分的监测出拉萨河中上游夏秋季的纤毛虫物种组成与丰度,进一步反应水体的状况。共鉴定出的 91 种纤毛虫,其中 49 种见于夏季,64 种见于秋季。夏季各样点丰度为 1.2×10^4 — 5.6×10^5 个/L,秋季各样点丰度在 1.2×10^4 — 2.6×10^5 个/L 之间,并且各样点的物种数与丰度不尽相同。可见,拉萨河中上游夏、秋季各样点的物种组成与丰度存在一定的差异。这可能与青藏高原的极端地理环境有关,即拉萨河属于冷水性河流,长期的自然进化使水生纤毛虫适应了较低温度环境下的生存,随着季节的更替,水温降低导致纤毛虫的种类增多。这与西藏及内陆其他地区冷水型河流纤毛虫的研究结果相一致^[28-31],但与其他非冷水型河流的研究结果相背^[32]。另外,拉萨河中上游的物种数整体较国内

表 5 拉萨河中上游纤毛虫群落参数与水体理化因子间的相关性
Table 5 Relationships between ciliate community parameters and environmental variables in the middle and upper reaches of the Lhasa River

	物种数 Species	多样性 指数(H) Shannon- Wiener diversity index	均匀度 指数(E) Pielou evenness index	优势度 指数(S) Simpson dominance index	水流速度 WS/ (m/s)	浊度 TUR/ (NTU)	溶解氧 DO/ (mg/L)	pH	电导率 EC/ (μ S/cm)	盐度 Sal/ (mg/L)	总溶解盐 TDS/ (mg/L)	水温 WT/ $^{\circ}$ C	化学需氧量 COD/ (mg/L)	总磷 TP/ (mg/L)	总氮 TN/ (mg/L)	氨氮 NH ₄ -N/ (mg/L)	硝酸盐氮 NO ₃ -N/ (mg/L)
夏季 Summer	1																
物种数 Species																	
多样性指数(H) Shannon-Wiener diversity index	0.731 *	1															
均匀度指数(E) Pielou evenness index	-0.166	0.549	1														
优势度指数(S) Simpson dominance index	-0.226	-0.788 *	-0.869 **	1													
水流速度 WS/(m/s)	0.57	-0.071	-0.787 *	0.506	1												
浊度 TUR(NTU)	-0.217	-0.309	-0.184	0.272	0.369	1											
溶解氧 DO/(mg/L)	0.062	-0.36	-0.592	0.39	0.318	-0.329	1										
酸碱度 pH	0.521	0.651	0.263	-0.378	-0.201	-0.464	0.021	1									
电导率 EC/(μ S/cm)	-0.01	0.081	0.083	-0.046	-0.099	0.325	0.026	0.557	1								
盐度 Sal/(mg/L)	0.002	0.12	0.12	-0.087	-0.156	0.246	0.035	0.62	0.992 **	1							
总溶解盐 TDS/(mg/L)	0.024	0.114	0.085	-0.055	-0.108	0.277	0.036	0.61	0.993 **	0.998 **	1						
水温 WT/($^{\circ}$ C)	-0.23	0.276	0.663	-0.627	-0.814 *	-0.545	0.09	0.513	0.324	0.389	0.34	1					
化学需氧量 COD/(mg/L)	0.325	0.584	0.438	-0.703	-0.1	-0.047	0.1	0.376	0.302	0.35	0.34	0.453	1				
总磷 TP/(mg/L)	-0.735 *	-0.383	0.348	-0.117	-0.622	0.099	-0.07	-0.189	0.287	0.251	0.215	0.529	-0.166	1			
总氮 TN/(mg/L)	-0.735 *	-0.383	0.348	-0.117	-0.622	0.099	-0.07	-0.189	0.287	0.251	0.215	0.529	-0.166	10.000 **	1		
氨氮 NH ₄ -N/(mg/L)	-0.183	-0.163	-0.001	0.188	0.134	0.409	-0.478	-0.541	-0.47	-0.468	-0.442	-0.588	-0.179	-0.407	-0.407	1	
硝酸盐氮 NO ₃ -N/(mg/L)	-0.227	0.013	0.294	-0.198	-0.373	0.075	-0.265	0.161	0.418	0.366	0.341	0.379	-0.23	0.780 *	0.780 *	-0.597	1
秋季 Autumn																	
物种数 Species	1																
多样性指数(H) Shannon-Wiener diversity index	0.991 **	1															
均匀度指数(E) Pielou evenness index	-0.485	-0.482	1														

相关河流偏低,说明水中营养物质相对较少,外源营养来源较单一,这也进一步说明青藏高原河流贫营养型的水环境特征。

3.3 纤毛虫群落特征参数

纤毛虫能够适应的种类水环境,并形成相对稳定的群落结构。一旦环境发生变化,该群落结构的稳定性就会受到直接或间接的影响^[5]。通过两季节结构参数的对比分析得出:夏季的 Shannon 多样性指数值与 Simpson 优势度指数值均比秋季的高, Pielou 均匀度指数比秋季的低。秋季纤毛虫群落较夏季的结构简单,优势种明显,物种分布较夏季不均匀。其主要原因为秋季随着雨季过去水温下降,流域内水流量减少、流速缓慢,残留的有机物在河水中降解并富集,河岸植物腐败沉降并富集,增加了水中的外来营养源,导致个别耐低温与耐高盐的纤毛虫物种数增加^[33-34],从而影响水中纤毛虫的群落多样性;另一方面来说,夏季水流速度较大、水温较高,流水卷起河床的氮磷等营养物质,有利于纤毛虫的生存和繁衍,从而增加了纤毛虫的数量^[35-36],形成秋季纤毛虫较夏季纤毛虫优势种明显,群落结构简单,物种分布不均匀的现象。

3.4 营养功能类群

拉萨河中上游纤毛虫营养功能结构分析显示,夏、秋两季 B、S 类群和 P、A 类群及 R 类群的结构模式没有明显的变化,但是夏季 B、S 类群的相对种类数低于秋季。这表明,拉萨河中上游水质并未受到明显的外源干扰,整体水质状况良好,符合理化指标显示的结果,并且夏季水质优于秋季^[37]。这与该地区的气候环境和农业生产方式有密切关系。长期的高寒缺氧气候使西藏的植被在 10 月初就开始枯萎,河流内的植物也比其他地区更早的失去其自养净化功能,使得大量的有机物在流域内残存^[38],致使河流水质有所下降。另外,该地区为纯牧区,大量的牛、羊等牲畜长期在河岸周围放牧,饮取河流中水源的同时也把相应的污染物带入了该流域内^[39],这也是导致拉萨河中上游秋季水质较夏季下降的原因之一。

3.5 纤毛虫群落结构与环境间的关系

通过 Pearson 双尾相关性分析可知:夏季,纤毛虫群落 Pielou 均匀度指数与水流速度呈显著负相关,纤毛虫物种数与总磷和总氮均呈显著负相关;秋季,纤毛虫物种数和群落 Shannon 多样性指数与浊度、氨氮和硝酸盐氮呈显著负相关,与 pH 呈显著正相关。为了查证群落结构与环境之间的复杂关系,运用 CCA 典范对应分析来进一步解释两者之间的关系。其结果显示:影响夏季纤毛虫物种分布的关键因子是总磷和浊度;影响秋季纤毛虫物种分布的关键因子是水流速度和浊度。夏季由于雨季的到来水流量增大,流速增快,常见种数量下降,雨水将农田地表径流水带入河中,导致河水中营养物质增多,耐营养物质的种类增多;秋季,浊度、pH、总磷和总氮皆与物种数和多样性指数呈显著负相关。前人研究表明,浊度能够促进细菌的生长繁殖,从而对水中原生动物指标有明显的影[40];细菌与原生动物繁殖率的增加引起微生物的代谢率的增高,从而影响水环境内的氮磷浓度。这是导致一些纤毛虫增多的重要原因。括而言之,影响纤毛虫群落结构是多个环境因子共同作用的结果,而不是某个单方面的因子单独作用的结果。

4 结论

1) 根据地表水环境质量标准《GB 3838—2002》分析拉萨河中上游水体理化因子,该流域春、夏季水体显示为 I—III 类水质。

2) 拉萨河中上游夏、秋季纤毛虫群落结构较稳定,物种分布均匀,生物多样性指数较低。

3) 拉萨河中上游纤毛虫 B、S 类群、P、A 类群、R 类群的结构组成没有明显的季节变化趋势,但是夏季 B、S 类群物种丰富度低于秋季。

4) 纤毛虫群落特征及结构参数可以作为水环境评价的重要指标。

5) 水流速度、总磷和总氮是影响拉萨河中上游夏季纤毛虫群落结构的主要因素, pH、浊度、总磷和总氮是影响该流域秋季纤毛虫群落结构的主要因素,浊度是影响纤毛虫物种分布的主要因素。

参考文献 (References):

- [1] 中国大百科全书总编辑委员会《环境科学》编辑委员会. 中国大百科全书-环境科学. 北京: 中国大百科全书出版社, 1983.
- [2] 沈韞芬. 原生动物学. 北京: 科学出版社. 1999.
- [3] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 顾曼如, 施之新, 魏印心. 微生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [4] 李可群. 原生生物物种分歧时间和主要演化关系的定量计算. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2016, 44(3): 115-124.
- [5] 谭晓丽, 施心路, 刘桂杰, 白昕. 哈尔滨人工湖泊中原生动物群落变化规律. 生态学报, 2005, 25(10): 2650-2657.
- [6] 许木启, 翟家骥, 邵永怡. 利用 PFU 原生动物群落多样性快速监测北京通惠河水质. 动物学杂志, 1998, 33(4): 1-7.
- [7] 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. 生态学报, 2012, 32(6): 1703-1712.
- [8] Meng Z C, Xu K D, Dai R H, Warren A. Benthic ciliate diversity and community composition along water depth gradients: a comparison between the intertidal and offshore areas. *European Journal of Protistology*, 2018, 65: 31-41.
- [9] Bayat A R, Tapio I, Vilkki J, Shingfield K J, Leskinen H. Plant oil supplements reduce methane emissions and improve milk fatty acid composition in dairy cows fed grass silage-based diets without affecting milk yield. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(2): 1136-1151.
- [10] 沈韞芬. 西藏原生动物肉足虫一新种和两新亚种的描述. 海洋与湖沼, 1981, 12(4): 358-361.
- [11] 巴桑, 普布. 拉鲁湿地自然保护区有壳肉足虫物种多样性与空间分布特征. 西藏大学学报: 自然科学版, 2014, 29(1): 1-7.
- [12] 王芸, 巴桑, 袁齐涛. 西藏地区原生动物研究现状及发展前景. 西藏科技, 2016, (1): 62-66.
- [13] 关志华, 陈传友, 区裕雄, 范云崎, 张有实, 陈志明, 鲍世恒, 俎玉婷, 何希吾, 章铭陶. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984.
- [14] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991: 358-388.
- [15] 熊昫青. 水质评价和监测的生物学方法进展. 上海环境科学, 2000, 19(2): 79-81.
- [16] 周凤霞, 陈剑虹. 淡水微型生物与底栖动物图谱. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [17] 宋微波, 沃伦 A, 胡晓钟. 中国黄渤海自由生纤毛虫. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏水生无脊椎动物. 北京: 科学出版社, 1983.
- [19] Levine N D, Corliss J O, Cox F E G, Deroux G, Grain J, Honigberg B M, Leedale G F, Loeblich A R, Lom I J, Lynn D, Merinfeld E G, Page F C, Poljansky G, Sprague V, Vavra J, Wallace F G. A newly revised classification of the protozoa. *The Journal of Protozoology*, 1980, 27(1): 37-58.
- [20] 王智慧, 张朝晖. 岩溶溪流原生动物群落生态初步研究. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2009, 32(1): 98-102.
- [21] Margalef R. Diversity and Stability in Ecological Systems[M]. Upton: Brookhaven National Laboratory, 1969: 13-26.
- [22] Shannon E C, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, Illinois: University of Illinois Press, 1949.
- [23] Simpson E H. Measurement of diversity. *Nature*, 1949, 163(4148): 688.
- [24] Pielou E C. Ecological Diversity. New York: Wiley, 1975.
- [25] Broady P A. Diversity, distribution and dispersal of Antarctic terrestrial algae. *Biodiversity & Conservation*, 1996, 5(11): 1307-1335.
- [26] Pratt J R, Cairns J Jr. Functional groups in the protozoa: roles in differing ecosystems. *Journal of Protozoology*, 1985, 32(3): 415-423.
- [27] 丁海容. 拉萨市城区段水环境污染总量控制研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [28] 张建禄, 边坤, 许涛清, 王启军. 西藏帕隆藏布秋季浮游生物群落结构特征. 基因组学与应用生物学, 2016, 35(3): 647-655.
- [29] 普布, 向丹丹, 司廉邦, 李兰兰, 王净. 西藏甘曲湿地秋季土壤肉鞭虫多样性研究. 西藏大学学报: 自然科学版, 2015, 30(2): 9-15.
- [30] 郝媛媛, 孙国钧, 张立勋, 龚雪平, 许莎莎, 刘慧明, 张芬. 黑河流域浮游植物群落特征与环境因子的关系. 湖泊科学, 2014, 26(1): 121-130.
- [31] 陈凌云, 康瑞琴, 马正学, 马维斌, 陈德来. 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. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 550-557.
- [32] 马正学, 贺鹏辉, 杨镇, 宁应之. 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. 生态与农村环境学报, 2009, 25(3): 83-89.
- [33] 韩蕾, 施心路, 刘桂杰, 谭晓丽, 韩宏蕾. 哈尔滨太阳岛水域原生动物群落变化的初步研究. 水生生物学报, 2007, 31(2): 272-277.
- [34] 孙志强, 施心路, 徐琳琳, 孟祥玮, 刘桂杰. 景观湿地夏季原生动物群落结构与水质关系. 水生生物学报, 2013, 37(2): 290-299.
- [35] 杨亮杰, 吕光汉, 竺俊全, 徐镇, 金春华. 横山水库浮游动物群落结构特征及水质评价. 水生生物学报, 2014, 38(4): 720-728.
- [36] 张淑红, 侯书贵, 秦大河. 青藏高原冰川雪冰微生物研究进展. 应用与环境生物学报, 2007, 13(4): 592-596.
- [37] 陈彬, 马超, 周世宁, 卜海涛, 蒋思萍, 李晖, 尼珍. 西藏羊八井废弃地地热井的细菌多样性. 微生物学报, 2009, 49(2): 217-226.
- [38] 刘汉成, 马琳, 敏学梅, 安丽丽, 桑杰草, 马秀蓉, 罗纯芳, 闵秀兰, 金鹏. 洱海湖冬季原生动物群落结构及营养功能类群分析. 生态科学, 2012, 31(6): 631-635.
- [39] 张均龙. 黄海大型底栖生物多样性与群落结构的研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012.
- [40] 邱彦涛. 对虾养殖水体中浮游纤毛虫原生动物的生态学及三种药物对纤毛虫的毒杀作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.