

DOI: 10.5846/stxb202203290781

朱时应,王壮壮,黄倩,贺凯,李天顺,普布.西藏年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落特征.生态学报,2022,42(22):9005-9016.

Zhu S Y, Wang Z Z, Huang Q, He K, Li T S, Pu B. Characteristics of soil ciliate community in wetland of the Nianchu River Basin, Tibet, China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9005-9016.

西藏年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落特征

朱时应,王壮壮,黄倩,贺凯,李天顺,普布*

西藏大学理学院生命科学系高原动物学实验室,拉萨 850000

摘要:为了研究西藏年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落特征及其影响因素,于 2020 年 5 月、8 月和 10 月春夏秋三个季节,根据年楚河流域湿地分布特征选取了 5 个湿地样地共计 75 个土壤样品,采用“非淹没培养皿法”和“活体观察法”对土壤纤毛虫进行了培养和鉴定,共鉴定出土壤纤毛虫 154 种,隶属于 9 纲、19 目、43 科、70 属。结果表明土壤纤毛虫优势类群为前管目(Prorodontida),占 11.69%;刺钩目(Haptorida)为次优势类群,占 11.04%;罕见类群为游仆虫目(Euplotidae)、瓶纤目(Armophorida)、肾形目(Colpodida)、嗜污目(Philastasterida)、齿管目(Chlamydodontida)和吸管目(Succorida),共占 16.23%。湿地土壤纤毛虫多样性指数在三个季节间均无显著性差异($P>0.05$),SD4 样地的多样性指数在 5 个样地中最高;湿地土壤纤毛虫 $C/P(0.35) < 1$,表明其土壤环境未污染;土壤纤毛虫群落相似性位于极不相似到中等不相似之间,说明不同样地的物种组成差异性较大;土壤含水量(SWC)、土壤温度(ST)和速效钾(RAK)是影响土壤纤毛虫群落分布的因素。

关键词:年楚河流域;湿地;土壤纤毛虫;多样性;理化因子

Characteristics of soil ciliate community in wetland of the Nianchu River Basin, Tibet, China

ZHU Shiying, WANG Zhuangzhuang, HUANG Qian, HE Kai, LI Tian Shun, PU Bu*

Plateau Zoology Laboratory, Department of Life Sciences, Tibet University, Lasa 850000, China

Abstract: In order to study the characteristics of soil ciliate community and influencing factors in wetland of the Nianchu River Basin, Tibet, China. In May, August and October of 2020, i.e. spring summer and autumn three seasons, 75 soil samples from five plots were selected based on the distribution of wetland in the Nianchu River Basin. A total of 154 species of soil ciliates, belonging to 70 genera, 43 families, 19 orders and 9 classes, were identified by “non-flooded petri dish method” and “in vivo observation method”. The results showed that Prorodontida (11.69%) was the dominant group, Haptorida (11.04%) was the subdominant group, and rare taxa were Euplotidae, Armophorida, Colpodida, Philastasterida, Chlamydodontida and Succorida, accounting for 16.23% of the total. There was no significant difference in soil ciliate diversity index between the three seasons ($P>0.05$) in wetland, and the diversity index of the SD4 was the highest among the five plots. The soil ciliates ($C/P(0.35) < 1$), indicating that the soil environment in wetland was not polluted. The similarity of soil ciliate communities ranged from extremely dissimilar to moderately dissimilar, showed that species had great differences in different sites. Soil water content (SWC), soil temperature (ST) and available potassium (RAK) were the main factors affecting soil ciliate community distribution.

Key Words: the Nianchu River Basin; wetland; soil ciliate; diversity; the physical and chemical factors

基金项目:“一江四河”流域生物多样性调研与维持机制评价综合科学考察项目(藏财科教指[2021]1 号和藏财科教指[2019]01 号);西藏大学研究生“高水平人才培养计划”项目资助(2020-GSP-S042)

收稿日期:2022-03-29; 采用日期:2022-08-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: purbuzd@163.com

土壤是陆地生态系统中最为复杂成分之一,为土壤动物提供了生存条件^[1]。湿地生态系统是由陆地生态系统和水生生态系统形成的综合生态系统,有着“生物超市”和“地球之肾”的美称^[2]。原生动物是自然界最原始、最简单的个体。土壤原生动物指的是生活在土壤中或者是土壤表面凋落物中的原生动物^[3]。土壤纤毛虫一般泛指生活在土壤颗粒、土壤孔隙水中和覆盖在土壤表面凋落物水膜中的土壤原生动物,土壤纤毛虫具有种类繁多,体积微小,形态多样,纤薄细胞膜等特点,并且能够对外界环境微小变化作出快速响应,因此对土壤生态系统有着非常重要的指示作用^[4]。国内目前对于土壤纤毛虫的研究集中于土壤纤毛虫群落特征和形态学描述,如宁应之等对退牧还草、退耕还林生态恢复下土壤纤毛虫群落响应的研究,结果显示已经退牧还草、退耕还林样地与尚未退牧还草、退耕还林的样地之间土壤纤毛虫物种分布存在差异^[5-9];刘旻霞等对不同林地的土壤纤毛虫群落进行了研究,表明不同林地中人工林土壤纤毛虫多样性指数最高^[10-15];万玛央措等就甘肃农田四种土壤腹毛类纤毛虫进行了形态学描述,发现在中国首次记录到柠檬管膜虫(*Cytohymena citrina*)、沙栖蠕形尖毛虫(*Vermioxytericha arenicola*)和背触毛拟腹柱虫(*Gastrostylides dorsiciratus*)^[16]。

西藏地处青藏高原西南部,因其独特的地理位置,孕育了特殊的高原湿地生态系统,蕴含着极为丰富的湿地生物多样性资源。对于土壤纤毛虫的研究在西藏地区就仅见普布、巴桑等人对双湖地区和拉鲁湿地的报道^[17-18],对于年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落特征研究尚未见报道。年楚河流域湿地生态系统在保护生物多样性、调节小气候、改善水质、防止土壤沙化、减少温室效应等方面具有重要的作用,但是该流域湿地生态系统十分脆弱,一旦遭到外界不利因素的干扰,很难恢复到原有状态,研究年楚河流域湿地对于维持和保护青藏高原生态环境具有不可忽视的作用。土壤纤毛虫因其能够对于环境的微小变化做出积极的响应,常被用作土壤变化的指示生物,因此本文根据年楚河流域湿地分布特征,选取了5个典型的湿地样地,对不同季节土壤纤毛虫群落特征开展调查,旨在深入研究年楚河流域湿地土壤纤毛虫物种组成及群落结构,为该流域生物多样性提供基础研究资料,从而为保护年楚河流域湿地生态系统,促进流域湿地生态系统健康可持续发展提供科学依据。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域概况

年楚河是雅鲁藏布江右岸支流之首,东起卡惹拉雪山,西接夏布曲流域,面积约为111 30km²,整个流域位置在北纬28°10′—29°20′和东经88°35′—90°15′之间,河流全长217km,以河流湿地和沼泽湿地为主^[19]。高原温带半干旱区覆盖整个流域,形成了温度低,太阳光辐射大等典型的高原气候特征,该地区年平均降水量为365mm,受地形和水汽的影响降水分布十分不均^[20-22]。常见的植物有西藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、长华筒马先蒿(*Pedicularis longiflora*)、青藏薹草(*Carex moorcroftii*)、蕨麻委陵菜(*Potentilla anserina*)等。湿地常见动物有赤麻鸭(*Tadorna ferruginea*)、斑头雁(*Anser indicus*)、普通秋沙鸭(*Mergus merganser*)等。

1.2 研究方法

根据年楚河流域湿地分布特点,以样地间距离为参考,选取了五个典型未退化的高寒湿地作为样地^[22],即SD1、SD2、SD3、SD4和SD5(图1)。分别在2020年5月(春)、8月(夏)和10月(秋)三个季节进行了三次采样,在每个样地(20m×20m),用GPS(型号:MAP 63lcsx 厂家:上海佳明航电企业管理有限公司)记录海拔及经纬度,采用梅花五点采样法选取五个样方(20cm×20cm),每个样方中用土壤温枪(型号:XTY0087)测定土壤表层温度(ST),拣去土壤表面的凋落物后用土壤采集器采集0—10cm土壤土样(约4000g),共获得75(5×5×3)个样品。将采集好的样品密封后带回实验室,在牛皮纸上平整的铺开,用草纸覆盖(防止空气中漂浮的原生动物影响后续实验结果),在干燥阴凉处自然风干(30 d左右)。

1.3 样品处理及方法

1.3.1 土壤理化因子的测定

用干湿比重法测定土壤湿度(SWC),其它土壤理化因子委托西藏博源环境检测有限公司进行检测,用



图1 年楚河流域湿地采样地示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling area in wetland of the Nianchu River Basin
SD1—SD5 为样地

pHS-3C pH 计测定土壤 pH,用酸式滴定管测定土壤全氮(TN)和土壤有机质(SOM),火焰光度计测定速效钾(RAK),有效磷(AP)用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定。

1.3.2 土壤纤毛虫培养与鉴定

取已风干土壤 50g(约 50/4000=1/80 样品)于直径 15cm 的培养皿中,恒温培养箱 25℃ 下采用“非淹没培养皿法”培养土壤纤毛虫^[23],即在含有土壤样品的培养皿中加入土壤浸出液,使土壤充分润湿而不被淹没。培养 24 h 后开始镜检(Leica DM500 显微镜,放大 40—1000 倍),用“活体观察法”和“蛋白银染色法”^[24],根据形态特征和相应的参考资料^[25—29]鉴定物种(Lynn(2008)分类系统^[30]),并记录所鉴定物种的个体数,直至没有新的物种被发现为止。

1.4 数据处理和分析

1.4.1 多样性指数计算

(1)多样性指数(Shannon-Wiener)公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \frac{n_i}{N} \ln \left(\frac{n_i}{N} \right)$$

(2)均匀度指数(Pieluo)公式:

$$E = \frac{H'}{\ln S}$$

(3)优势度指数(Simpson)公式:

$$C = \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$$

(4)丰富度指数(Margalef)公式:

$$D = \frac{(S - 1)}{\ln N}$$

式中, H' 表示物种多样性指数, n_i 为第 i 类群的个体数, N 为总个体数, S 为所有类群数。

1.4.2 C/P 系数

土壤纤毛虫 r 对策者(肾形纲)物种数和土壤纤毛虫 k 对策者(异毛纲、旋毛纲和瓶纤纲)物种数总和的比值。肾形纲的土壤纤毛虫一般生活较为恶劣的环境中,因此 C/P 值的大小能够在一定程度上反映出该生境环境的优劣,当 $C/P < 1$ 时,表征该土壤生境中的环境相对较好;当 $C/P > 1$ 时,表征该土壤生境中的环境较为恶劣^[31]。

1.4.3 相似性指数计算

用 Jaccard 相似性指数计算每个样地土壤纤毛虫群落特征的相似性。

$$J = c / (a + b - c)$$

式中, c 表示两个生境中共有的物种数, a 和 b 表示两个不同样地中各自物种数。相似性指数在 0—0.25 之间表示极不相似;在 0.25—0.5 之间时表示中等不相似;在 0.5—0.75 之间时表示中等相似;在 0.75—1 之间时表示极相似。

1.4.4 数据统计与分析

在 Excel 2019 中进行数据整理计算,用 SPSS 21.0 对土壤纤毛虫与环境因子之间进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并进行 Duncan 多重比较,运用 R 4.0.5 计算多样性指数和相似性系数^[32—33],用 Origin 2019b 作图;用 Canoco 4.5 for Windows 对物种和环境因子进行 DCA 和 CCA 分析。

2 结果与分析

2.1 年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落结构

年楚河流域 5 个湿地生境中共鉴定出土壤纤毛虫 154 种,隶属于 9 纲、19 目、43 科、70 属(表 1)。其中优势类群为前管目(Prorodontida),共计 18 种,占总物种数的 11.69%;刺钩目(Haptorida)为次优势类群,共计 17 种,占总物种数的 11.04%;罕见类群为游仆虫目(Euplotidae)、瓶纤目(Armophorida)、肾形目(Colpodida)、嗜污目(Philaslasterida)、齿管目(Chlamydodontida)和吸管目(Philaslasterida),共计 25 种,占总物种数的 16.23%。SD1、SD2、SD3 和 SD4 样地中旋毛纲(Spirotrichea)纤毛虫丰度最高,其次为寡膜纲(Oligohymenophorea);SD5 样地中肾形纲(Colpodea)纤毛虫丰度最高,其次为旋毛纲(Spirotrichea),图 2。

表 1 年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落结构

Table 1 Community structure of soil ciliates in wetland of the Nianchu River Basin

纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	比例 Percentage/%
核残基纲 Karyorelictea	原口目 Protostomzida	颈毛虫科 Trachelocercea	1	1	0.65%
		喙纤科 Loxodidae	1	2	1.30%
异毛纲 Heterotrichea	异毛目 Hererotrichida	喇叭科 Stentoridae	1	1	0.65%
		赭虫科 Blepharismidae	1	2	1.30%
		突口科 Condyllostomidae	1	1	0.65%
		旋毛虫科 Spirostomidae	1	2	1.30%
		尖毛科 Oxytrichidae	6	13	8.44%
旋毛纲 Spirotrichea	散毛目 Sporadotrichia	急游科 Strombidiidae	1	1	0.65%
		弹跳科 Halteriidae	1	1	0.65%
		管柱科 Trachelophyllidae	1	1	0.65%
		尾柱虫目 Urostylida	4	9	5.84%
		侠盗科 Strobilidiidae	1	2	1.30%
	排毛目 Sporadotrichida	角毛科 Keronidae	1	1	0.65%
		旋毛虫科 Spirofilidae	2	3	1.95%
	游仆虫目 Euplotidae	游仆虫科 Euplotidae	1	4	2.60%
	盾纤目 Scuticociliatidae	楯纤科 Aspidiscidae	1	1	0.65%
	瓶纤目 Armophorida	扭头科 Metopidake	1	2	1.30%

续表

纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	种 Species	比例 Percentage/%
裂口纲 Litostomatea	侧口目 Pleurostomatida	裂口科 Amphileptidae	4	9	5.84%
		漫游虫科 Litonotidae	1	3	1.95%
	刺钩目 Haptorida	刀口虫科 Spathidiidae	1	6	3.90%
		圆口虫科 Bilamellophrya	1	5	3.25%
		管叶科 Trachelophyllidae	3	5	3.25%
		长吻虫科 Lacrymariidae	1	1	0.65%
肾形纲 Colpodea	肾形目 Colpodida	肾形科 Colpodidae	1	7	4.55%
	篮环目 Cyrtolophosidida	篮环科 Cyrtolophosidae	1	4	2.60%
		匙口科 Platyophryidae	1	1	0.65%
前管纲 Prostomatea	前管目 Prorodontida	前管虫科 Prorodontidae	3	8	5.19%
		斜板科 Plagiocampidae	2	3	1.95%
		射纤科 Actinoobolinidae	1	1	0.65%
		裸口虫科 Holophryidae	1	3	1.95%
		前口科 Frontoniidae	1	1	0.65%
		栉毛科 Didiniidae	2	2	1.30%
		四膜科 Tetrahymenidae	4	5	3.25%
寡膜纲 Oligohymenophorea	膜口目 Hymenostomatida	瞬目科 Glaucoidae	2	6	3.90%
		钟虫科 Vorticellidae	1	12	7.79%
	固着目 Sessilida	盖虫科 Opercularia	1	3	1.95%
		杯形科 Scyphidiidae	1	1	0.65%
		帆口科 Cyclidiidae	3	8	5.19%
		康纤科 Cohnilemebidae	1	1	0.65%
	帆口目 Pleuronematida	斜头科 Loxocephalidae	1	1	0.65%
		映毛虫科 Cinetochilidae	1	2	1.30%
	嗜污目 Philastasterida	斜管科 Chilodonellidae	2	5	3.25%
		足吸管科 Podophryidae	3	4	2.60%
叶咽纲 Phyllopharyngea	齿管目 Chlamydodontida				
	吸管目 Succorida				

优势类群是物种数最多的目,次优势类群是物种数次多的目,罕见类群是只有单一种的目

2.2 年 f 楚河流域湿地土壤纤毛虫多样性

对年楚河流域湿地土壤纤毛虫的多样性指数和物种数进行单因素方差分析,结果表明多样性指数(H) ($df=2, F=0.653, P=0.538$),均匀度指数(E) ($df=2, F=1.878, P=0.195$),优势度指数(C) ($df=2, F=1.263, P=0.318$),三个季节间均无显著性差异,物种数(n) ($df=2, F=4.264, P=0.023$)在季节间具有显著性差异。SD4 样地的多样性指数在 5 个样地中最高,SD1、SD4 样地的各多样性指数(H 、 E 、 C)均是夏季>秋季>春季;而 SD2、SD5 样地的多样性指数(E 、 C)均为夏季>春季>秋季;SD3 样地春季多样性指数最高;Margalef 丰富度指数显示 SD2、SD3、SD5 样地均为秋季最高;优势度指数显示 SD2 和 SD4 样地间有差异性,多样性指数显示 SD4 与 SD2、SD3 样地间有差异性,均匀度指数和丰富度指数各样地间均没有差异。年楚河流域湿地土壤纤毛虫 $C/P(0.35)<1$,说明年楚河流域湿地土壤环境未受污染。见图 3—6。

2.3 年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落 Jaccard 相似性

春季不同湿地土壤纤毛虫群落相似性系数在 0.13—0.21 之间,属于极不相似到中等不相似之间;夏

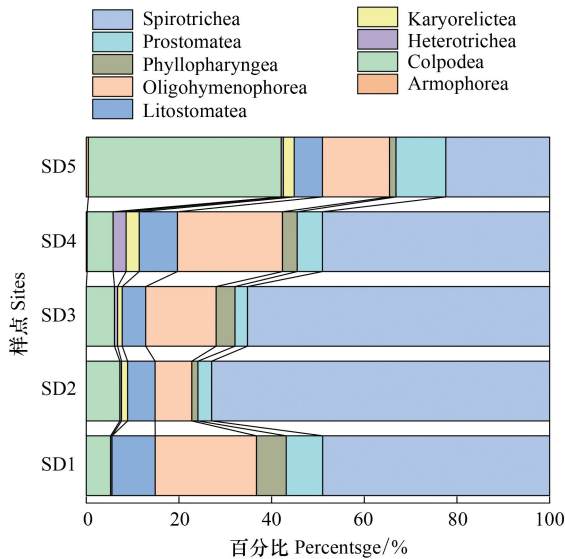


图 2 年楚河流域湿地各样地土壤纤毛虫丰度

Fig.2 Soil ciliate abundance of various wetland sites in NianChu River Basin, China

季相似性系数范围为 0.16—0.37,属于极不相似到中等不相似之间;秋季相似性系数为 0.13—0.26,属于极不相似到中等不相似。

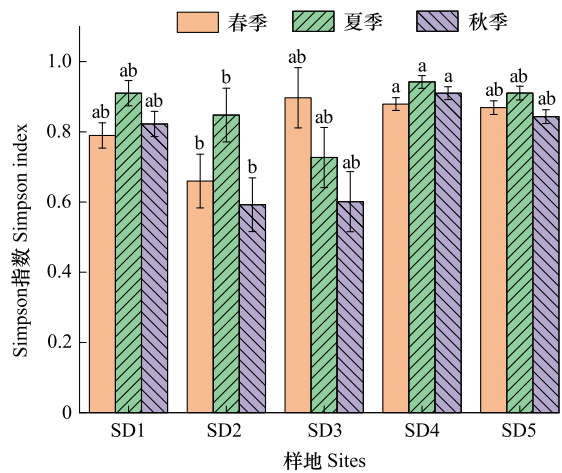


图 3 年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落优势度指数
Fig.3 Community dominance index of ciliates in wetland of the Nianchu River Basin

ab:不同的小写字母代表不同的显著水平

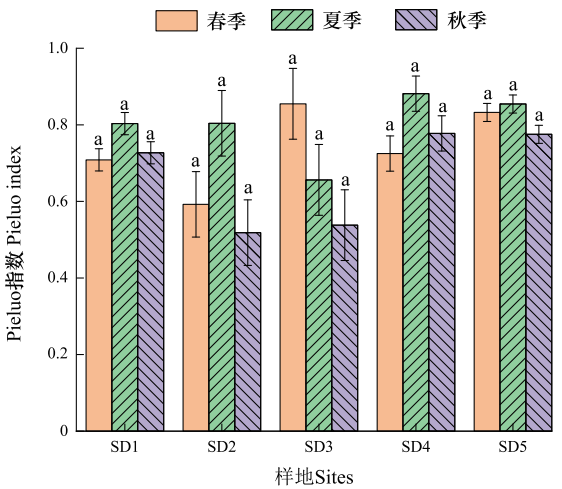


图 4 年楚河流域湿地土壤纤毛虫均匀度指数
Fig.4 Evenness index of ciliates in wetland of the Nianchu River Basin

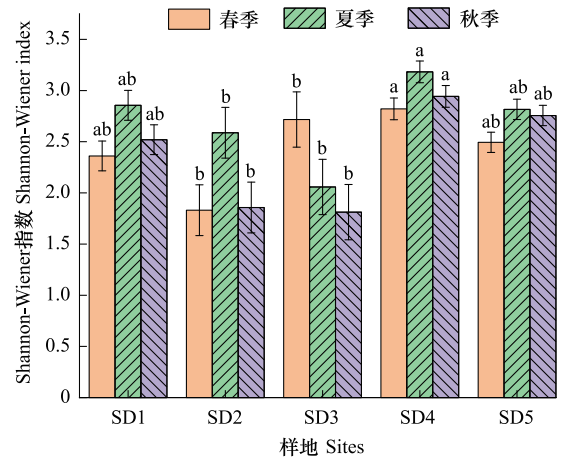


图 5 年楚河流域湿地土壤纤毛虫多样性指数
Fig.5 Diversity index of ciliates in wetland of the Nianchu River Basin

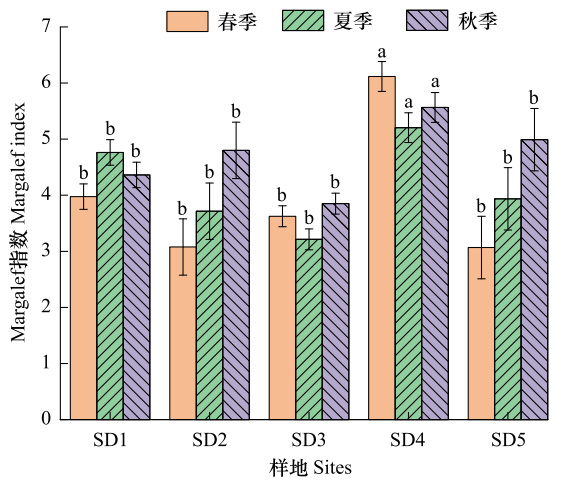


图 6 年楚河流域湿地土壤纤毛虫多样性丰富度指数
Fig.6 Margalef index of soil ciliates in wetland of the Nianchu River Basin

表 2 年楚河流域湿地土壤纤毛虫相似性

Table 2 Similarity of soil ciliate community in wetland of the Nianchu River Basin

样地 Site	春季 Spring				夏季 Summer				秋季 Autumn			
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD1	SD2	SD3	SD4	SD1	SD2	SD3	SD4
SD2	0.19				0.2				0.2			
SD3	0.21	0.2			0.3	0.37			0.2	0.2		
SD4	0.17	0.1	0.16		0.3	0.29	0.28		0.2	0.3	0.26	
SD5	0.17	0.2	0.16	0.17	0.2	0.16	0.22	0.2	0.2	0.1	0.23	0.25

对年楚河流域五个湿地样地进行聚类分析发现,SD2 和 SD3 首先聚为一类,然后和 SD1 聚为一类,接着和 SD4 聚为一类,最后和 SD5 聚为一类。说明 SD5 样地的纤毛虫群落组成空间异质性较大,其次是 SD4 样地,其中 SD2 和 SD3 两个样地的纤毛虫群落组成相似性程度最高。

2.4 年楚河流域湿地土壤理化性质

湿地土壤理化性质变化会影响土壤纤毛虫的分布变化,二者关系密切。单因素方差分析显示三个季节间,土壤湿度(SWC)($df=2, F=0.150, P=0.863$)、有效磷(AP)($df=2, F=2.768, P=0.103$)、全氮(TN)($df=2, F=0, P=1$)、土壤温度(ST)($df=2, F=0.647, P=0.541$)、pH($df=2, F=0.438, P=0.656$)和土壤有机质(SOM)($df=2, F=0.137, P=0.873$)均没有显著性差异,而速效钾(RAK)($df=2, F=4.916, P=0.028$)具有显著性差异。多重比较(Duncan)结果显示,五个样地间的土壤湿度(SWC)、有效磷(AP)和速效钾(RAK)没有显著差异($P>0.05$),其他理化因子均具有不同程度的差异。其中 SD1 的全氮(TN)、有效磷(AP)、速效钾(RAK)及有机质(SOM)含量明显高于其他样地;SD5 样地全氮(TN)和有机质(SOM)含量最低;SD3 有效磷(AP)、速效钾(RAK)含量最低。

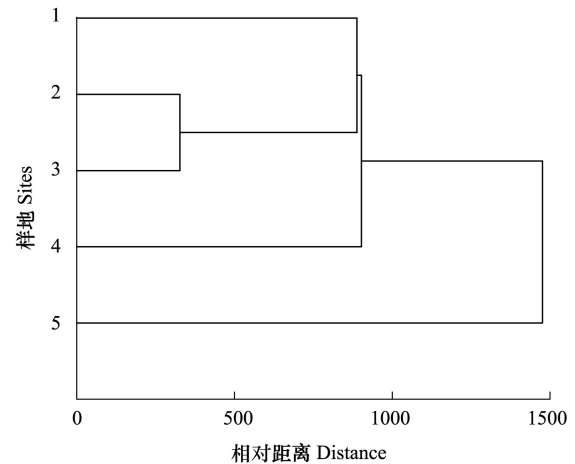


图7 年楚河流域湿地土壤纤毛虫聚类分析

Fig.7 Cluster analysis of soil ciliates in wetland of the Nianchu River Basin

表3 年楚河流域湿地土壤理化性质

Table 3 Soil physical and chemical properties in wetland of The Nianchu River basin

样地 Site	温度 ST/℃	土壤湿度 SWC/%	pH	全氮 TN (mg/kg)	有效磷 AP (mg/kg)	速效钾 RAK (mg/kg)	有机质 SOM (g/kg)
SD1	8.48±2.52b	46.18±1.68a	6.97±0.061c	8260.00±453.69a	4.73±3.09a	141.33±28.87a	174.00±19.5a
SD2	14.1±1.90ab	40.83±1.93a	7.41±0.083b	2460.00±106.93b	1.4±0.41a	76.67±5.67a	35.13±9.11b
SD3	17.24±1.90ab	38.8±0.66a	7.41±0.079b	1205.67±288.96c	1.1±0.23a	75.43±9.60a	28.63±2.64b
SD4	11.65±2.80b	37.45±0.53a	7.36±0.017b	1333.33±147.46c	1.83±1.09a	92.00±29.40a	29.57±3.98b
SD5	21.99±3.61a	25.22±7.17a	7.67±0.053a	546.67±101.94b	1.17±0.20a	110.67±44.02a	11.29±4.10b

ST:土壤温度 soil temperature; SWC:湿度 soil water content; TN:全氮 total nitrogen; AP:有效磷 available phosphorus; RAK:速效钾 rapidly available potassium; SOM:有机质 soil organic matter; ab:不同的小写字母代表不同的显著水平

2.5 年楚河流域湿地土壤纤毛虫与环境因子关系

2.5.1 春季年楚河流域湿地土壤纤毛虫与环境因子关系

春季年楚河流域土壤纤毛虫进行 DCA 前项选择,发现排序轴轴长大于 3,可以使用单峰模型,共筛选出三个环境因子土壤温度(ST),湿度(SWC),速效钾(RAK)进行 CCA 分析,应用蒙特卡拟合方法对解释变量进行显著性检验。结果显示(图 8),轴 1 和轴 2 共同解释了物种变异的 60.15%,说明轴 1 和轴 2 能够在较大程度上反映出年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落与环境因子之间的关系。代表 SWC 的箭头长度最长,表明 SWC 对于群落变化的影响最大,样地 SD1、SD2 投影点与代表 SWC 的箭头距离最近,说明 SWC 对该样地的影响最大;样地 SD5 投影点与代表 ST 的箭头距离最近,说明 ST 对该样地的影响最强;样地 SD3、SD4 投影点与代表 RAK 的箭头距离最近,说明 RAK 对该样地的影响最大。SWC 与 Cop、Kem、Coi 等呈负相关关系,ST、RAK 与 Cop、Kem、Coi 等呈正相关关系,说明 SWC、ST、RAK 是影响春季年楚河流域湿地土壤原生动物群落分布的因素。

2.5.2 夏季年楚河流域湿地土壤纤毛虫与理化因子关系

首先对夏季年楚河流域湿地土壤纤毛虫进行 DCA 前项选择,发现排序轴轴长大于 3,可以使用单峰模

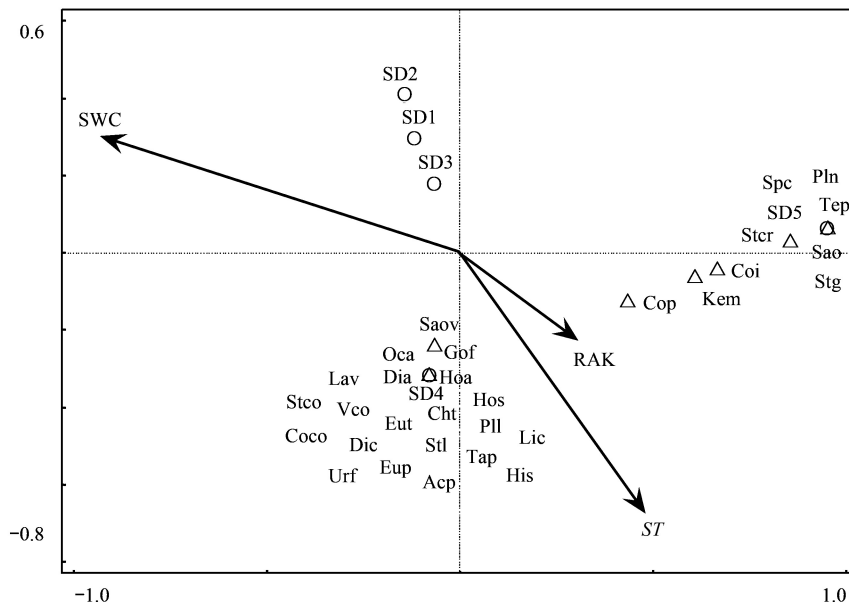


图8 春季湿地土壤纤毛虫与环境因子的典范对应分析

Fig.8 Canonical correspondence analysis between soil ciliates and environmental factors in spring wetland of the Nianchu River Basin

Pln:小匙口虫 *Platyophrya nana*; Tep:梨形四膜虫 *Tetrahymena pyriformis*; Stcr:粗圆纤虫 *Strongylidium crassum*; Sao:椭圆嗜腐虫 *Sathrophilus ovatus*; Coi:膨胀肾形虫 *Colpoda inflata*; Kem:念珠角毛虫 *Keronopsis monilata*; Saov:卵形嗜腐虫 *Sathrophilus oviformis*; Acr:辐射射纤虫 *Actinobolina radians*; Oca:赫奕尖毛虫 *Oxytricha caudens*; Cha:非游斜管虫 *Chilodonella aplanata*; Gof:近亲殖口虫 *Gonostomum affina*; Eup:盘状游仆虫 *Euplotes patella*; Coca:弯豆形虫 *Colpidium campylum*; Dic:巨长颈虫 *Dileptus cygnus*; Vco:沟钟虫 *Vorticella convallaria*; Lav:蠕形长吻虫 *Lacrymaria vermicularis*; Pll:亮板纤虫 *Placus luciae*; Stl:矛形圆纤虫 *Strongylidium lanceolatum*; Urf:双叉尾毛虫 *Urotricha furcata*; Lic:天鹅漫游虫 *Litonotus cygnus*; Acp:乳头壳吸管虫 *Acineta papillifera*; Stco:天蓝喇叭虫 *Stentor coerules*; Voc:钟形钟虫 *Vorticella campanula*; Sap:污秽纤虫 *Saprodinium putrinum*; Spc:尾刀口虫 *Spathidium caudatum*; Stg:旋回侠盗虫 *Stebolidium gyrans*; Cop:盘状肾形虫 *Colpoda patella*; Tap:膜状急纤虫 *Tachysoma pellionella*; Dia:美洲长颈虫 *Dileptus americanus*; Cht:柱纤口虫 *Chaenea teres*

型,共筛选出三个环境因子有机质(SOM),湿度(SWC),速效钾(RAK)进行 CCA 分析,应用蒙特卡拟合方法对环境因子显著性检验。结果显示(图 9),排序轴 1 和排序轴 2 共同解释了纤毛虫群落方差的 67.89%,在一定程度上可以较好的反映出湿地土壤纤毛虫群落与环境因子的关系。速效钾(RAK) ($F=0.012, P=0.036$) 是显著解释变量,解释了纤毛虫群落变异的 34.7%,是影响年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落分布的主要环境因子。代表 RAK 的箭头长度最长,说明 RAK 对于群落变化的影响最大,样地 SD2、SD3 投影点与其距离最近,说明 RAK 对该样地的影响最大;样地 SD1 投影点与代表 SOM 的箭头,说明 SOM 对该样地的影响最大;样地 SD5 与代表 SWC 的箭头距离最近,说明 SWC 对该样地的影响最大。SWC、SOM、RAK 与 Eum、Cor 和 Dia 等呈正相关关系,与 Hag、Asv 和 Stvi 成呈负相关关系。说明 SWC、SOM 是影响湿地土壤纤毛虫分布的因素。

2.5.3 秋季年楚河流域湿地土壤纤毛虫与理化因子关系

首先对秋季年楚河流域湿地土壤纤毛虫进行 DCA 前项选择,发现排序轴轴长大于 3,可以使用单峰模型,共筛选出三个环境因子湿度(SWC),土壤温度(ST),速效钾(RAK)进行 CCA 分析,应用蒙特卡拟合方法对环境因子显著性检验。结果如图 10 所示,轴 1 和轴 2 共同解释率物种变异的 72.60%,说明轴 1 和轴 2 能够较大程度上反映出秋季年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落与环境因子之间的关系。代表 ST 的箭头长度最长,表明 ST 对于群落变化的影响最大,且样地 SD1 投影点与其距离最近,说明 ST 对该样地的影响最大;样地 SD2、SD3 投影点与代表 SWC 的箭头距离最近,说明 SWC 对该样地的影响最大;样地 SD5 与带包 RAK 的箭头距离最近,说明 RAK 对该样地的影响最大。SWC 与 Cht、Urm、Lic 等呈负相关关系,ST、RAK 与 Cyc、Sao、Urd 等呈正相关关系,说明 SWC、ST、RAK 是影响其分布的因素。

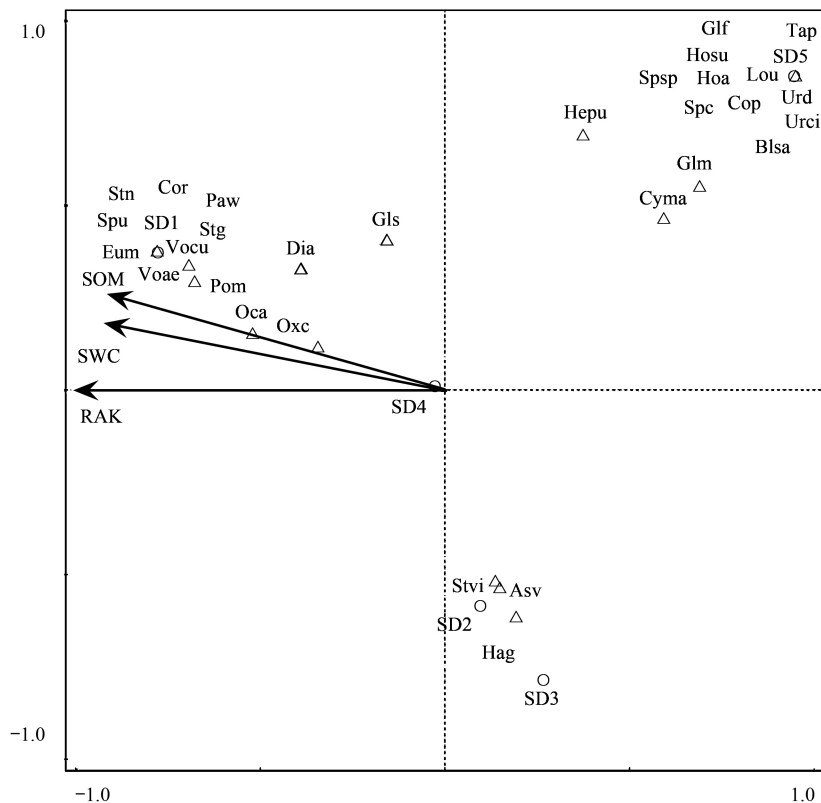


图9 夏季湿地土壤纤毛虫与环境因子的典范对应分析

Fig.9 Canonical correspondence analysis between soil ciliates and environmental factors in summer wetland of the Nianchu River Basin

Hag:大弹跳虫 *Halteria grandinella*; Asv:团脾晚虫 *Askenasia volvox*; Stvi:绿急游虫 *Strombidium viride*; Stn:背状棘尾虫 *Stylonychia notophora*; Spu:苔藓刀口虫 *Spathidium muscorum*; Cor:肾形肾形虫 *Colpoda reniformis*; Eum:黏游仆虫 *Euplotes muscicola*; Stg:旋回侠盗虫 *Steobolidium gyrans*; Paw:柔似尾枝虫 *Paraurostyla weisei*; Vocu:杯钟虫 *Vorticella cupifera*; Voae:领钟虫 *Vorticella aequilata*; Pom:胶衣足吸管虫 *Podophrya maupasi*; Dia:美洲长颈虫 *Dileptus americanus*; Gls:闪瞬目虫 *Glaucoma scintillans*; Oca:赫奕尖毛虫 *Oxytricha caudens*; Oxc:叶绿尖毛虫 *Oxytricha chlorelligera*; Glf:前口瞬目虫 *Glaucoma frontata*; Tap:膜状急纤虫 *Tachysoma pellionella*; Hosu:沟裸口虫 *Holophrya sulcata*; Spsp:刀刀口虫 *Spathidium spathula*; Hoa:腔裸口虫 *Holophrya atra*; Lou:单核斜叶虫 *Loxophyllum uninucleatum*; Hepu:点滴半眉虫 *Hemiphrys punctata*; Spc:尾刀口虫 *Spathidium caudatum*; Cop:盘状肾形虫 *Colpoda patella*; Urd:差异瘦尾虫 *Uroleptus dispar*; Urci:契氏片尾虫 *Urosoma cienkowskii*; Blsa:半威赭虫 *Blepharisma salinarum*; Glm:大口瞬目虫 *Glaucoma macrostoma*; Cyma:大蓝环虫 *Cyrtolophosis major*

3 讨论

3.1 年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落分布特征

湿地生态系统兼有陆地生态系统和水生态系统的某些特征,是二氧化碳的“汇”,在全球气候变化上具有重要的意义^[2]。优势类群能够明显的控制土壤纤毛虫群落结构和群落环境,是土壤纤毛虫群落基本特征的其中一部分^[22]。年楚河湿地土壤纤毛虫优势类群为前管目,次优势类群为刺钩目,两者是年楚河流域湿地土壤纤毛虫最重要的组成部分,对于湿地生态系统有着不可忽视的重要作用^[34]。土壤纤毛虫是土壤中细菌和真菌的采食者,是土壤中微生物循环系统的重要组成部分,能够很好的促进微生物的生长,促进 C 和 N 对较高营养水平的有效性^[35],并且其物种组成和种群密度会随着环境变化而变化,是监测环境变化的有效手段。年楚河流域湿地土壤纤毛虫多样性指数(H' 、 E' 、 C')季节间均无显著性差异($P>0.05$),SD4 样地多样性指数在 5 个样地中均最高,原因可能是 SD4 样地的海拔相对较低,生存环境较为优渥,物种丰富,群落结构复杂^[22, 36]。SD3 多样性指数春季最高,可能是因为春季温度开始升高,土壤纤毛虫物种数增加,使土壤纤毛虫的多样性指数升高。春季不同湿地土壤纤毛虫群落相似性系数在 0.13—0.21 之间,属于极不相似到中等不相

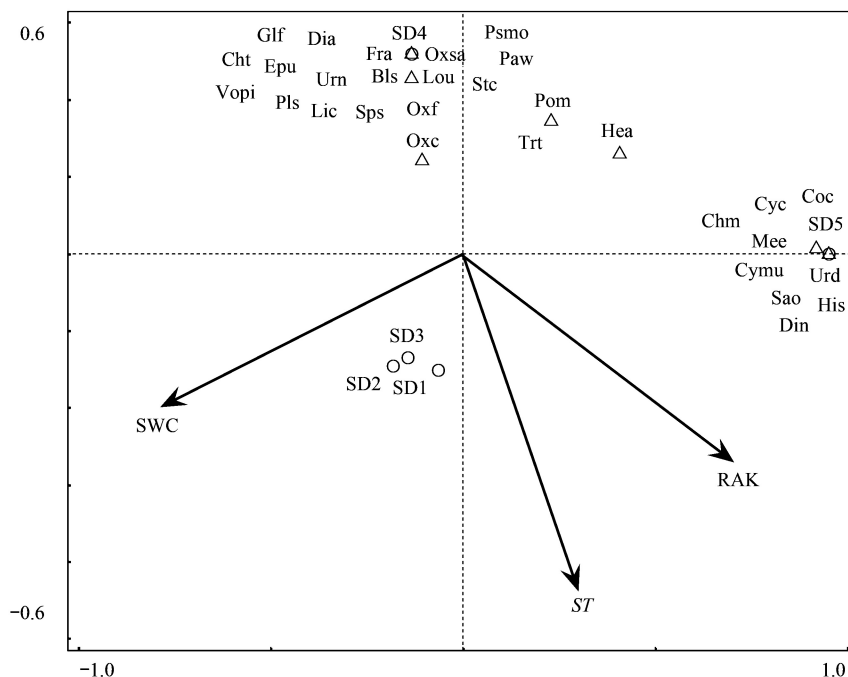


图 10 秋季湿地土壤纤毛虫与环境因子的典范对应分析

Fig.10 Canonical correspondence analysis between soil ciliates and environmental factors in autumn wetland of the Nianchu River Basin

Coc: 僧帽肾形虫 *Colpoda cucullus*; Cyc: 居中膜袋虫 *Cyclidium centrale*; Chm: 苔藓拟斜管虫 *Chilodontopsis muscorum*; Mee: 如意扭头虫 *Metopoes*; Cymu: 黏液蓝环虫 *Cyrtolophosis mucicola*; Urd: 差异瘦尾虫 *Uroleptus dispar*; Sao: 椭圆嗜腐虫 *Sathrophilus ovatus*; His: 似织毛虫 *Histiculus similis*; Din: 小单环栉毛虫 *Didinium balbianii nanum*; Glf: 前口瞬目虫 *Glaucoma frontata*; Dia: 美洲长颈虫 *Dileptus americanus*; Cht: 柱纤口虫 *Chaenea teres*; Epu: 瓶累枝虫 *Epistylis urceolata*; Urn: 暗尾丝虫 *Uronema nigrican*; Vopi: 点钟虫 *Vorticella picta*; Pls: 游荡平体虫 *Platynematum solivagum*; Lic: 天鹅漫游虫 *Litonotus cygnus*; Sps: 浮雕刀口虫 *Spathidium scalpriforme*; Fra: 尖锐前口虫 *Frontonia acuminata*; Bls: 单核赭虫 *Blepharisma steini*; Oxa: 腐生尖毛虫 *Oxytricha saprobia*; Lou: 单核斜叶虫 *Loxophyllum uninucleatum*; Oxf: 伪尖毛虫 *Oxytricha fallax*; Oxc: 叶绿尖毛虫 *Oxytricha chlorelligera*; Psmo: 念珠伪钟虫 *Pseudovorticella moninata*; Paw: 柔似尾枝虫 *Paraurostyla weisei*; Stc: 弯棘尾虫 *Stylonychia curvata*; Pom: 胶衣足吸管虫 *Podophrya maupasi*; Trt: 细颈须毛虫 *Trachelocerca tenuicollis*; Hea: 敏捷半眉虫 *Hemiohphrys agilis*

似之间;夏季相似性系数范围为 0.16—0.37,属于极不相似到中等不相似之间;秋季相似性系数为 0.13—0.26,属于极不相似到中等不相似,其中夏季 SD2 和 SD3 样地的相似性程度最高为 0.37。对年楚河流域五个湿地样地进行聚类分析发现,SD5 样地和其他 4 个样地聚为一类,说明 SD5 样地空间差异性较大,原因可能是 SD5 样地的 ST 和 RAK 明显高于其他 4 个样地,导致 SD5 样地土壤纤毛虫物种组成出现差异,在空间上的相似性程度低。

3.2 年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落影响因素

SD1 的全氮(TN)、有效磷(AP)、速效钾(RAK)及有机质(SOM)含量明显高于其他样地。该样地靠近牧区,牛羊等畜牧的粪便,可能导致该样地有机质等理化因子明显高于其他样地。年楚河流域湿地各样地 SWC、RAK 和 SOM 分布在轴 1 附近,与轴 1 具有最大的相关性,ST 分布在轴 2 附近,与轴 2 具有最大的相关性,ST、SWC、RAK、SOM 是影响年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落分布的主要因素,且 SWC 和 RAK 能够显著解释土壤纤毛虫物种分布。造成纤毛虫物种分布的主要原因是温度和降水,最佳土壤温度适宜土壤动物生存,土壤温度调节土壤纤毛虫的取食和代谢活动^[37],Opperman 等研究发现土壤温度升高会导致土壤纤毛虫数量明显增加,群落结构发生改变^[38],土壤水分是限制土壤纤毛虫分布、生存和繁殖的主要环境因子^[39],冯伟松等研究南极菲尔德斯地区土壤原生动物时发现,土壤原生动物密度与土壤含水量正相关^[9];土壤动物能够通过生命活动在氮、磷元素循环中起着重要作用,土壤动物的生物量与土壤中氮、磷的含量正相关^[40],

Patrick 研究发现土壤原生动动物在有机质丰富的土壤中丰度更高,同等条件下添加粪浆的土壤中土壤原生动动物总量明显更高^[41],且土壤中有有机质的微小变化影响土壤纤毛虫物种分布,土壤理化因子决定了土壤纤毛虫物种分布^[42]。综上年楚河流域湿地土壤纤毛虫群落受多个环境因子的共同影响,每种环境因子都对土壤纤毛虫群落特征产生不同的影响,其共同作用影响土壤纤毛虫群落在不同样地间的分布。年楚河流域湿地土壤纤毛虫 $C/P(0.35) < 1$,说明年楚河流域湿地土壤环境未污染,适宜土壤动物生存,对于维持和保护中国生态屏障(青藏高原)生态环境良好发展具有重要作用,因为肾形纲土壤纤毛虫为 R-对策,该对策土壤纤毛虫往往生活在土壤质量较差的环境中,旋毛纲、异毛纲和瓶纤纲土壤纤毛虫为 K-对策,该对策土壤纤毛虫往往生活在土壤质量较好的环境中, C/P 值越大,即 R-对策肾形纲土壤纤毛虫在土壤环境中较 K-对策土壤纤毛虫更具优势,生态环境质量较差。

4 结论

年楚河流域 5 个湿地样地共鉴定出土壤纤毛虫 154 种,隶属于 9 纲、19 目、43 科、70 属;优势类群是前管目(Prorodontida),共计 18 种,占总物种数的 11.69%;多样性指数(H、E、C)在季节间均无显著性差异($P > 0.05$),且 SD4 样地多样性指数最高;年楚河流域湿地土壤纤毛虫 $C/P(0.35) < 1$,说明年楚河流域湿地土壤环境未污染;5 个样地土壤纤毛虫相似程度不高,物种空间分布差异性大;SWC、ST 和 RAK 是年楚河流域湿地土壤纤毛虫的影响因子。

参考文献(References):

- [1] 朱永官,彭静静,韦中,沈其荣,张福锁. 土壤微生物组与土壤健康. 中国科学:生命科学, 2021, 51(1): 1-11.
- [2] 吕宪国. 湿地科学研究进展及研究方向. 中国科学院院刊, 2002, 17(3): 170-172.
- [3] 陈素芳,徐润林. 土壤原生动物的研究进展. 中山大学学报:自然科学版, 2003, 42(S1): 187-194.
- [4] 宁应之,万贯红,杨元罡,武维宁,周小燕,王一峰,刘娜,程晓,陈凌云. 甘肃省徽县不同退耕还林模式下土壤纤毛虫群落特征. 生态学报, 2019, 38(6): 1697-1706.
- [5] 宁应之,周小燕,烟郑杰,张世虎,陈凌云,万贯红. 土壤纤毛虫群落对退牧还草生态恢复的响应——以玛曲县为例. 生态学报, 2020, 40(7): 2386-2395.
- [6] 禹娟红,包振国,王秉忠,刘玲玲,车树理. 不同植被恢复模式对土壤纤毛虫群落特征的影响. 林业科技通讯, 2017, (4): 3-7.
- [7] 宁应之,杨永强,董玫含,张惠茹,马继阳. 土壤纤毛虫群落对不同退还模式生态恢复的响应. 生态学报, 2018, 38(10): 3628-3638.
- [8] 宁应之,武维宁,杜海峰,王红军. 土壤纤毛虫群落对退耕还林生态恢复的响应——以侧柏林为例. 生态学报, 2016, 36(2): 288-297.
- [9] 宁应之,王婷婷,武维宁,陈凌云,杜国祯. 甘南高寒草甸土壤纤毛虫对磷酸氢二铵添加的响应. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1668-1678.
- [10] 刘旻霞,李全弟,蒋晓轩,夏素娟,南笑宁. 兰州市北山不同林地春夏季土壤纤毛虫群落特征. 生态学报, 2020, 40(12): 3955-3967.
- [11] 徐润林,孙逸湘. 大鹏半岛土壤纤毛虫的群落特点. 应用生态学报, 2000, 11(3): 428-430.
- [12] 冯伟松,余育和. 南极菲尔德斯半岛地区土壤原生动生态学. 水生生物学报, 2000, 24(6): 610-615.
- [13] 王超,徐润林. 鼎湖山不同森林类型土壤纤毛虫群落比较研究. 土壤, 2017, 49(4): 725-732.
- [14] 张灿,刘旻霞,李瑞,赵瑞东,邵鹏. 甘南高寒草甸冷暖气土壤纤毛虫群落对坡向的响应. 生态学报, 2017, 36(9): 2465-2472.
- [15] 刘旻霞,张灿,李瑞,赵瑞东,邵鹏. 不同坡向对高寒草甸秋冬季土壤纤毛虫群落的影响. 兰州大学学报:自然科学版, 2019, 55(3): 380-387, 394-394.
- [16] 万玛央措,徐富荣,杨怀印,沈小亚,刘浩,武维宁,陈鹏,刘娜,陈凌云,宁应之. 甘肃农田四种土壤腹毛类纤毛虫(纤毛门,旋毛纲,腹毛亚纲)的形态学研究. 动物学杂志, 2021, 56(4): 543-557.
- [17] 普布,袁文军. 西藏双湖地区土壤纤毛虫群落特征. 高原科学研究, 2019, (4): 12-20.
- [18] 巴桑,黄香,普布,马正学. 拉鲁湿地夏秋季纤毛虫群落特征及其与水环境的关系. 生态学报, 2014, 33(10): 2740-2748.
- [19] 刘务林,朱雪林. 中国青藏高原湿地. 北京:中国林业出版社, 2013.
- [20] 刘天仇,陈爱兰. 年楚河流域降水特性. 成都科技大学学报, 1995, (4): 12-18.
- [21] 王秀丽,刘石臣. 西藏年楚河流域水资源调查. 东北水利水电, 2000, 18(9): 22-23.
- [22] 王壮壮,贺凯,朱时应,普布. 西藏年楚河流域湿地大型土壤动物群落特征. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 184-190.

- [23] Foissner W. Estimating the species richness of soil protozoa using the “non-flooded petri dish method”//Lee J J, Soldo A T, eds. *Protocols in Protozoology*. Lawrence: Allen Press, 1922.
- [24] Wilbert N. Eine verbesserte technik der protargolimpragnation für ciliaten. *Mikrokosmos*, 1975, 64: 171-179.
- [25] 吕立平, 樊阳波, 胡晓钟. 十种旋唇纲纤毛虫的形态学描述. *水生生物学报*, 2017, 41(5): 1126-1139.
- [26] 张琦. 十种土壤腹毛类纤毛虫的分类研究[D]. 保定: 河北大学, 2021.
- [27] 宁应之, 马继阳, 吕昭. 六种土壤腹毛类纤毛虫的形态学研究. *动物学杂志*, 2018, 53(3): 415-426.
- [28] 宁应之, 孙静, 王红军, 杜海峰, 刘汉成, 刘光龙. 甘肃甘南高原沼泽湿地 6 种土壤纤毛虫记述. *动物学杂志*, 2014, 49(2): 261-271.
- [29] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带 29 种土壤纤毛虫记述(纤毛门: 动基片纲). *西北师范大学学报: 自然科学版*, 1999, 35(3): 75-82.
- [30] Lynn D H. *The Ciliated Protozoa: Characterization, Classification, and Guide to the Literature*. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2008: 1-605.
- [31] Foissner W, Berger H, Xu K, Zechmeister-Boltenstern S. A huge, undescribed soil ciliate (Protozoa: Ciliophora) diversity in natural forest stands of Central Europe. *Biodiversity & Conservation*, 2005, 14(3): 617-701.
- [32] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: I α 多样性的测度方法(下). *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- [33] Pielou E C. *Ecological Diversity*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1975.
- [34] 王壮壮, 刘洋, 贺凯, 樊海德, 普布. 西藏年楚河流域大型土壤动物群落特征与生态位. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3911-3921.
- [35] Brussaard L, Behan-Pelletier V M, Bignell D E, Brown V K, Didden W, Folgarait P, Fragoso C, Freckman D W, Gupta V V S R, Hattori's T, Hawkworth D L, Klopatek C, Lavelle P, Malloch D W, Rusek J, Sderstrom B, Tiedje J S, Virginia R A, 闵庆文. 土壤中的生物多样性与生态系统功能. *人类环境杂志*, 1997, 26(8): 555-562.
- [36] 王壮壮, 贺凯, 朱时应, 普布. 年楚河流域康马县高寒草地土壤节肢动物多样性研究. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(6): 76-84.
- [37] 邹涛, 申海香, 宁应之, 马正学. 甘肃小陇山麻沿林区土壤纤毛虫群落特征. *动物学杂志*, 2009, 44(6): 64-73.
- [38] Opperman M H, Wood M, Harris P J. Changes in microbial populations following the application of cattle slurry to soil at two temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21(2): 263-268.
- [39] Schlesinger W H. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1997.
- [40] 张雪萍, 李春艳, 殷秀琴, 陈鹏. 不同使用方式林地的土壤动物与土壤营养元素的关系. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(1): 26-31.
- [41] Jjemba P K. The effect of chloroquine, quinacrine, and metronidazole on both soybean plants and soil microbiota. *Chemosphere*, 2002, 46(7): 1019-1025.
- [42] 王壮壮, 朱时应, 张秋涵, 何梦萨, 普布. 亏祖山秋季不同海拔土壤纤毛虫优势种生态位及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2022, 42(9): 3494-3503.