

甘南高原沼泽湿地秋季纤毛虫物种多样性及其与环境因子的关系^{*}

宁应之^{1**} 王芳国¹ 杜海峰² 王红军³ 苏 苙¹

(¹西北师范大学生命科学院, 兰州 730070; ²陇南市环境监测站, 甘肃陇南 746000; ³国家林业局甘肃濒危动物保护中心, 甘肃武威 733000)

摘 要 用非淹没培养皿法、活体观察法和蛋白银染色法, 对甘南高原沼泽湿地秋季纤毛虫物种多样性进行了研究, 并采用灰色系统关联分析法分析了各样点纤毛虫群落组成参数与其生存环境因子间的关系。结果表明: 6 个样点共鉴定出 157 种纤毛虫, 隶属于 3 纲 11 目 34 科 53 属, 其中包括 1 个新种, 24 个未定名种, 4 个国内新纪录种。在鉴定到的纤毛虫中, 下毛目为优势类群, 前口目为次优势类群, 寡毛目和袋形目为罕见类群, 常见类群包括肾形目、篮口目、管口目、膜口目、盾纤目、异毛目和缘毛目。甘南高原沼泽湿地纤毛虫物种丰富, 群落结构复杂, 生境类群构成特殊, 罕见种和特有种所占比例较大, 广布种所占比例较小。灰色系统关联分析表明, 各采样点纤毛虫物种丰度与其微生境环境因子密切相关, 其中有机质和铵态氮是影响高原沼泽湿地纤毛虫群落稳定性的主要因素。

关键词 高原沼泽湿地; 秋季; 纤毛虫; 物种多样性; 环境因子

中图分类号 Q959.116 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)3-0634-07

Ciliate species diversity and its relationships with environmental factors in plateau swamp wetlands of southern Gansu Province, Northwest China in autumn. NING Ying-zhi^{1**}, WANG Fang-guo¹, DU Hai-feng², WANG Hong-jun³, SU Chang¹ (¹College of Life Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; ²Longnan Environmental Monitoring Station of Gansu Province, Longnan 746000, Gansu, China; ³Gansu Endangered Animals Protection Centre of State Forestry Administration of China, Wuwei 733000, Gansu, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 634–640.

Abstract: By using non-flooded Petri dish method, live observation, and protargol dyeing, this paper studied the ciliate species diversity in the plateau swamp wetlands of southern Gansu Province in autumn, with the relationships between the ciliate community's structural parameters and environmental factors analyzed by grey relational analysis. At six sampling sites, a total of 157 ciliate species were collected, belonging to 53 genera, 34 families, 11 orders, and 3 classes, among which, 1 species was new, 24 species were uncertain, and 4 species were newly recorded in China. Among the species identified, Hypotrichida was the most predominant group, followed by Prostomatida, while Oligotrichida and Bursariomorphida were of rare groups. The common groups included Colpodida, Nassulida, Cyrtophorida, Hymenostomatida, Scuticociliatida, Heterotrichida, and Peritrichida. Due to the habitat peculiarity in the plateau swamp wetlands, the ciliate species diversity and community complexity were high, rare and endemic species had greater proportion, while cosmopolitan species occupied smaller proportion. Grey relational analysis showed that the abundance of ciliate species at the sampling sites had close correlations with the microhabitat environmental factors, among which, organic matter and ammonium nitrogen contents were the major factors affecting the ciliate community stability in the plateau swamp wetlands.

Key words: plateau swamp wetland; autumn; ciliates; species diversity; environmental factor.

^{*} 国家自然科学基金项目(30870273)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: ningyz@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2012-10-29 接受日期: 2012-12-26

甘肃甘南高原沼泽湿地作为青藏高原上范围最大的湿地,被誉为“黄河蓄水池”,是黄河上游至源头的重要水源涵养和补给区,在保障黄河中下游地区的工农业生产和生态安全方面发挥着巨大的作用(蔡迪花等,2007)。近年来,该地区受全球气温升高和超载放牧的影响,草场沙化现象日趋严重,湿地面积急剧减少,不少河流常年干涸或变成了季节河,生物多样性受到严重威胁(程晓等,2009)。湿地是一种介于水陆之间具有丰富生物多样性的生态系统,在生产动植物产品、提供动植物栖息地、维持全球生态平衡等方面具有重要的作用(苏兰等,2012)。郎惠清和祖文辰(1983)对沼泽湿地的基本特征、类型、分布与分区、形成与发展,资源的利用以及开发与保护等方面进行了论述,系统地介绍了我国沼泽湿地研究情况。近年来,沼泽泥炭的研究偏重于资源的开发与利用,同时关于沼泽湿地动态监测以及对全球变化的影响亦成为热点之一(黄锡畴,1989;王荣芬,1994)。

纤毛虫是生态系统微生物群落的重要组成部分,在调控细菌群落、转化养分方面具有重要作用(王焕校,2000)。它是单细胞真核动物,个体微小、繁殖速度快、相对比表面积大、对环境反映十分敏感,常被作为环境微变化的指示生物。国内与土壤纤毛虫有关的研究工作始于20世纪80年代(崔振东,1986),20世纪90年代时初具规模。目前,甘南高原沼泽湿地生物资源的相关研究多见于对草场退化、大型动物和植被分布等宏观领域的研究(汪之波和陈有华,2008),而对甘南高原沼泽湿地纤毛虫的研究未见报道。在当前基础资料匮乏的状况下,调查湿地纤毛虫的区系结构及其生物多样性显得尤为重要。本文对甘南高原沼泽湿地纤毛虫进行了鉴定和分类,并在此基础上研究了该区纤毛虫物种多样性特征,分析了其群落组成与环境因子的关系。旨在为该区生物物种多样性的保护、环境修复以及

建立高原沼泽湿地生态系统环境质量的生物学评价体系提供基础资料和理论依据,也为丰富我国纤毛虫分类学和微型生物在湿地生态系统中的研究内容和全球气温变化对高原沼泽湿地影响方面提供基础资料。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

甘肃甘南高原沼泽湿地位于甘肃甘南藏族自治州,青藏高原东缘,甘、青、川三省交合部。地理坐标为100°45′45″E—102°29′00″E,33°06′30″N—34°30′15″N。黄河干流从青海入境后自东、南、北三面绕玛曲县境而过,形成黄河首曲。海拔均在3300 m以上。气候属高原大陆性气候-高寒湿润区,由于受大气环流和高原地貌的影响,全年无明显四季之分,而且高寒多风雨雪。冷季长达172 d左右,夏季温暖而短暂,年均无霜期19 d,全年无绝对无霜期。年平均气温1.1~2.7℃。年平均日照2583.9 h,光能丰富、日照长但热量不足(杨霞等,2002)。境内858676 hm²的草场以及星罗棋布的大小湖泊和沼泽湿地,构成黄河上游完整的水源体系。由西向东依次分布有暗棕壤,高山草甸壤、亚高山草甸壤、草甸壤、沼泽壤和泥炭壤等6个类型的土壤,微酸性至碱性,结构良好(张超等,2008)。基本植被类型为亚高山以禾本科、莎草科、菊科、蔷薇科等的物种分布最为广泛(戚登臣和李广宇,2007)。研究区共设置6个样点,其环境因子测定结果见表1。

1.2 样点设置及采样

在高原沼泽湿地面积分布较广的甘南藏族自治州玛曲县共设置了6个样点,分别是尼玛、娘玛寺、阿孜、采日玛、曼日玛1、曼日玛2,各采样点均为高寒沼泽湿地。采样时间为2009年10月28日—11月3日,样点分布情况见图1。

用15 mL圆筒形采样器在每个样点面积约400 m²

表1 甘肃甘南高原沼泽湿地各样点环境因子

Table 1 Environmental factors in various sampling sites in plateau swamp wetlands of Gannan, Gansu

样点	海拔 (m)	温度 (℃)	含水量 (g·kg ⁻¹)	pH 值	有机质 (g·kg ⁻¹)	铵态氮 (g·kg ⁻¹)	速效磷 (g·kg ⁻¹)	速效钾 (g·kg ⁻¹)
曼日玛1	3452	10.0	629.6	6.88	99.36	0.0008	0.018	0.488
曼日玛2	3467	14.0	753.2	6.83	102.12	0.0010	0.015	0.427
阿孜	3516	7.5	696.0	6.59	111.32	0.0012	0.012	0.486
采日玛	3527	9.0	717.5	6.84	101.43	0.0009	0.020	0.421
娘玛寺	3506	6.0	364.3	7.43	73.37	0.0008	0.019	0.465
尼玛	3432	13.0	436.6	7.44	107.41	0.0009	0.015	0.534

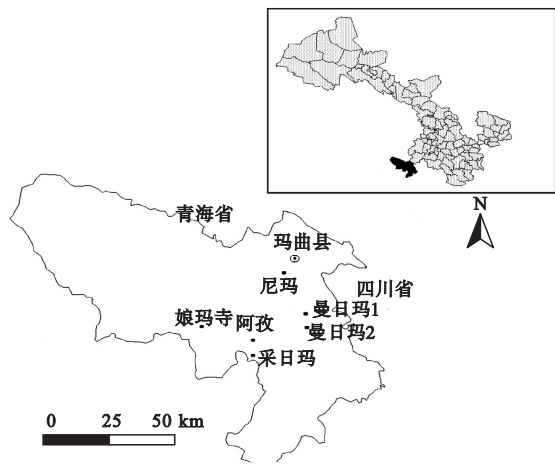


图 1 甘肃甘南高原沼泽湿地采样示意图
Fig.1 Sampling sites of plateau swamp wetlands of Gannan, Gansu

的范围内用梅花五点取样法进行取样(张志杰和张维平,1991)。采样时用曲管地温计测量土壤温度,鉴定主要植被种类和类型,同时用 GPS 定位后记录采样点海拔和经纬度。

1.3 室内工作方法

1.3.1 样品预处理 土样带回实验室后,分两部分处理:一部分新鲜湿土样做直接观察、土壤含水量和 pH 的测定之用;剩余土样摊涂于牛皮纸上使之自然风干,期间用透气纸遮盖土样,并关闭门窗以防止外界空气中纤毛虫包囊进入土样,风干后土样分别装袋标号待理化因子测定和培养观察之用。

土壤水含量的测定使用烘干法(李广文等,2009);土壤 pH 的测定用 TSS-851 土壤湿度酸度计(四平市电子技术研究所)测定。土壤速效磷含量的测定用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;有机质的测定用水合热-光电比色法测定;速效钾含量的测定用四苯硼钠比浊法测定;铵态氮含量的测定采用硝普钠的靛酚兰比色法,测定仪器为 TFW-II 土壤养分多功能分析仪(武汉市天联科教仪器发展有限公司)。

1.3.2 定性和定量研究 定性研究采用“非淹没培养皿法”(Foissner *et al.*, 2002),必要时进行粗培养、纯培养或克隆培养直到没有新物种出现为止(宁应之等,2007)。固定染色技术为 Wilbert 之蛋白银法(Wilbert, 1975)。物种鉴定参考相关的资料文献(Berger & Foissner, 1987;沈韞芬等,1990;Foissner, 1993, 1995;尹文英,1998;施心路,1999a, 1999b, 2000;Lee *et al.*, 2000;Foissner *et al.*, 2002;Hu *et al.*, 2004;宁应之等,2009 等)。纤毛虫密度

采用“3 级 10 倍”环式稀释法(Stout, 1962)进行测定。

1.3.3 数据统计和分析 (1) 对鉴定到的各级分类单元及物种进行统计,将物种数最多的目定义为优势类群,次多的目定义为次优势类群,单种的目定义为罕见类群(宁应之,1998)。

(2) 多样性指数计算

根据 Gleason-Margalef 物种多样性指数公式:

$$d = \frac{S-1}{\ln N}$$

式中: d 为多样性指数; S 为种类数(实验土样 50 g 内所有观察到的物种数); N 为个体总数(实验土样中纤毛虫密度 $\times 50$ g 实验土样)。 d 值的大小表明物种多样性的高低(沈韞芬等,1990)。

(3) 灰色关联度的计算

灰色系统关联分析法是对系统所包含的相互联系、相互影响、相互制约的因素之间关联程度进行定量比较的一种研究方法。其实质是对反映各因素变化特性的数据序列所进行的几何比较,根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。曲线越接近,相应序列之间的关联度就越大,反之则越小;它克服了统计相关分析两个因素互相的关联程度相等的缺陷,为各因素间的关联分析提供了一种可供尝试的新方法(肖新平,1997)。

灰色关联度的计算步骤:

设 X_1, X_2, \dots, X_N 为 N 个因素,反映各因素变化特性的数据列分别为 $\{X_1(t)\}, \{X_2(t)\}, \dots, \{X_N(t)\}, t = 1, 2, \dots, M$ 。因素 X_j 对 X_i 的关联系数定义为:

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(t) + k\Delta_{\max}} \quad (t = 1, 2, \dots, M)$$

式中, $\xi_{ij}(t)$ 为因素 X_j 对 X_i 在 t 时刻的关联系数,其中,

$$\Delta_{ij}(t) = |X_i(t) - X_j(t)|$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_i \Delta_{ij}(t)$$

$$\Delta_{\min} = \min_j \min_i \Delta_{ij}(t)$$

k 为介于 $[0, 1]$ 区间上的分辨系数。在实际的计算中,灰色关联度的公式为:

$$\gamma_{ij} \approx \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \xi_{ij}(t)$$

所有数据均采用 SPSS 16.0 软件进行处理;利用 GPS 获得的经纬度数据在地图上定位后,用 Arc-View GIS 3.3 绘制采样图;折线、柱状图等均采用

Origin 8.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 物种分布和生境类群特征

对甘肃甘南高原沼泽湿地秋季 6 样点鉴定到的 157 种纤毛虫行归纳和分析结果显示,阿孜样点纤毛虫物种数最多,有 3 纲 11 目 32 科 51 属 108 种;曼日玛 2 样点次之,有 3 纲 10 目 31 科 51 属 98 种;曼日玛 1 样点有 3 纲 10 目 29 科 41 属 82 种;采日玛样点有 3 纲 10 目 27 科 39 属 77 种;尼玛样点有 3 纲 10 目 25 科 36 属 65 种和娘玛寺样点有 3 纲 10 目 25 科 37 属 58 种,其中娘玛寺样点中的纤毛虫物种数最少。具体分布情况如图 2 所示。

将甘南高原沼泽湿地研究区内所鉴定到的纤毛虫根据其不同生境划分为 4 类,淡水生但少见于土壤的类群最多,为 57 种,占所鉴定到纤毛虫物种总数的 36.31%;淡水与土壤共有类群包括强烈倾向于土壤的类群为 56 种,占所鉴定到纤毛虫物种总

数的 35.67%。淡水类群 32 种,占所鉴定到纤毛虫物种总数的 20.38%;土壤特有类群有 12 种,占所鉴定到纤毛虫物种总数的 7.64%,为最低。

2.2 群落组成

甘南高原沼泽湿地秋季 6 样点共鉴定到 157 种纤毛虫,隶属于 3 纲 11 目 34 科 53 属,其中多膜纲(Polyhymenophorea)的物种数最多占鉴定到纤毛虫总数的 43.95%;动基片纲(Kinetofragminophorea)的物种数次之,占鉴定到纤毛虫总数的 42.67%;寡膜纲(Oligohymenophorea)物种较少,占鉴定到的纤毛虫总数的 13.38%。群落组成详见表 2。

从各样点纤毛虫物种数的变化来看(图 2),阿孜样点物种数最多,娘玛寺样点的物种数最少,其他样点从高到低依次为:曼日玛 2、曼日玛 1、采日玛和尼玛。丰度和多样性指数各样点变化均与物种数的变化趋势相一致(图 3)。

2.3 优势类群

甘肃甘南高原沼泽湿地秋季 6 样点鉴定到的纤毛虫群落中下毛目(Hypotrichida)为优势类群,优势度为 35.67%;前口目(Prostomatida)为次优势类群,优势度为 22.93%;寡毛目(Oligotrichida)和袋形目(Bursariomorphida)各仅有一种,均为罕见类群;常见类群为肾形目(Colpodida)、篮口目(Nassulida)、管口目(Cyrtophorida)、膜口目(Hymenostomatida)、盾纤目(Scuticociliatida)、异毛目(Heterotrichida)和缘毛目(Peritrichida)。

研究表明,研究区内纤毛虫群落组成具有独特性,在全世界目前发现的土壤纤毛虫种类中,下毛目的种类占 37%,肾形目的种类占 18%(Foissner, 1987)。也有研究发现,纤毛虫中的下毛目和肾形目的种类常常占优势(Stout, 1962; Bamforth, 1971)。

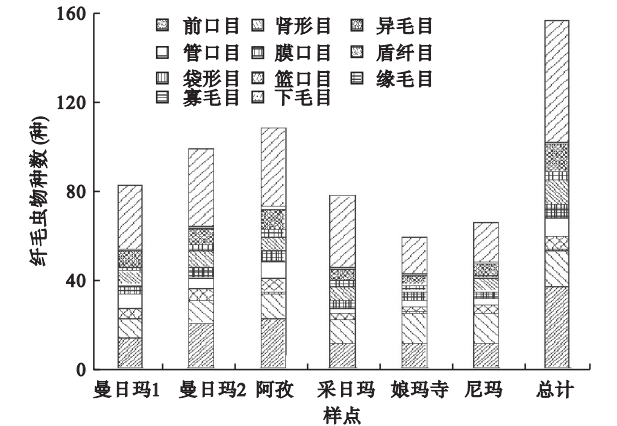


图 2 各样点纤毛虫物种数及其群落组成
Fig.2 Species number and the composition of the ciliates community in various sampling sites

表 2 甘肃甘南高原沼泽湿地秋季纤毛虫的群落组成
Table 2 Composition of ciliates community in plateau swamp wetlands in Gannan, Gansu in autumn

门	纲	目	科	属	种	比例(%)
纤毛门 Ciliophora	动基片纲 Kinetofragminophorea	前口目 Prostomatida	8	15	36	22.93
		肾形目 Colpodida	3	3	16	10.19
		袋形目 Bursariomorphida	1	1	1	0.64
		篮口目 Nassulida	2	3	6	3.82
		管口目 Cyrtophorida	1	2	8	5.09
		膜口目 Hymenostomatida	3	3	6	3.82
	寡膜纲 Oligohymenophorea	盾纤目 Scuticociliatida	3	3	11	7.01
		缘毛目 Peritrichida	1	1	4	2.55
		异毛目 Heterotrichida	5	6	12	7.64
	多膜纲 Polyhymenophorea	寡毛目 Oligotrichida	1	1	1	0.64
		下毛目 Hypotrichida	6	15	56	35.67
总计	3 纲	11 目	34 科	53 属	157 种	100.00

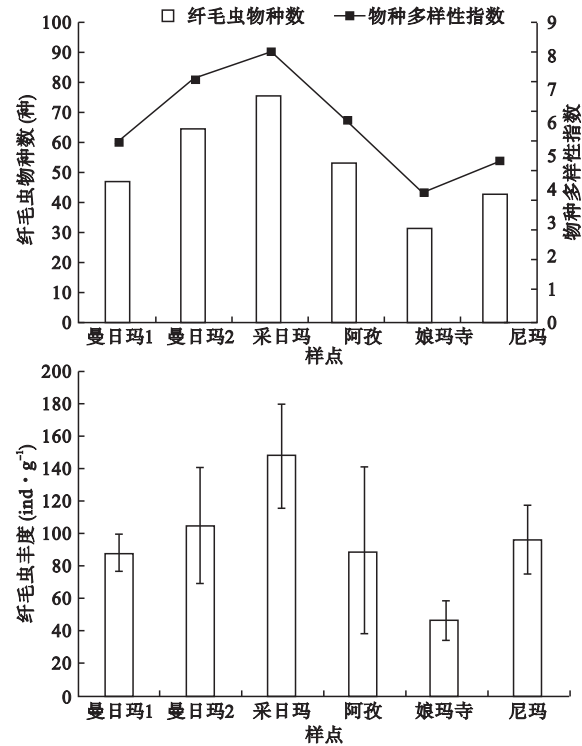


图 3 各样点的纤毛虫物种数、物种多样性指数和丰度
Fig.3 Species number, species diversity index and abundance of ciliate in various sampling

然而,本研究区下毛目 (Hypotrichida)、前口目 (Prostomatida) 和肾形目 (Colpodida) 类群所占比例分别为 35.67%、22.93% 和 10.19%。前口目类群所占比例明显超过了肾形目类群所占的比例,成为次优势类群,肾形目 (Colpodida) 则成为了常见类群。

2.4 广布种、罕见种

依据物种在各样点出现的频率划分,分布频率

为 1.00 的广布种有 8 种,占纤毛虫总物种数的 5.10%,分别为:膨胀肾形虫 (*Colpoda inflata*)、东方肾形虫 (*Colpoda orientalis*)、齿脊拟肾形虫 (*Paracolpoda steini*)、钩刺斜管虫 (*Chilodonella uncinata*)、巴维利亚斜管虫 (*Chilodonella bavoriensis*)、杯形钟虫 (*Vorticella cupifera*)、大弹跳虫 (*Halteria grandinella*) 和阔柱片尾虫 (*Urosoma macrostyla*);分布频率为 0.60~0.85 的常见种有 50 种,占所有纤毛虫总数的 31.84%;分布频率为 0.10~0.50 的罕见种有 99 种,占所有纤毛虫总数的 63.06%;在 6 个样点中仅仅在一个样点有分布的特有种为 29 种,占所有纤毛虫总数的 18.47%。从上述结果看,甘南高原沼泽湿地秋季纤毛虫以罕见种和特有种为主,所占比例较大,广布种所占比例较小。

2.5 纤毛虫群落组成参数与理化因子的灰色关联度

高原沼泽湿地纤毛虫群落与其生存环境的关系属于灰色系统,可以采用灰色系统关联度分析法进行研究,纤毛虫组成参数,包括纤毛虫物种数、纤毛虫丰度和物种多样性指数,作为母数列 Y_i 。将土壤环境因子,包括有机质含量、铵态氮含量、速效磷含量、速效钾含量、土温、含水量、pH 值和海拔,分别定义为子因素列 X_i 。

为了消除量纲的差异,数据结果采用初值化处理,其结果见表 3。

通过计算,对于 $Y_1, k\Delta_{\max} = 1.3150, k\Delta_{\min} = -1.9236$;对于 $Y_2, k\Delta_{\max} = 1.4492, k\Delta_{\min} = -1.9236$;对于 $Y_3, k\Delta_{\max} = 1.3948, k\Delta_{\min} = -1.9236$ 。取分辨系数 0.1,得灰色关联系数,关联度结果见表 4。

表 3 纤毛虫群落组成参数与土壤理化因子标准化值

Table 3 Standardized value of structural parameters of ciliates community and environmental factors of soil										
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	Y_1	Y_2	Y_3
0.1047	-0.0013	0.0150	0.1783	0.0268	0.1867	-0.3468	-0.8161	-0.0651	-0.3429	-0.3515
0.3201	0.0007	-0.0150	-0.4317	1.3150	0.9544	-0.4893	-0.4254	0.8660	0.7855	0.8522
1.0381	0.0027	-0.0450	0.1583	-0.7783	0.5991	-1.1733	0.8508	1.1964	1.4492	1.3948
0.2663	-0.0003	0.0350	-0.4917	-0.2952	0.7327	-0.4608	1.1373	-0.0951	0.0553	0.1045
-1.9236	-0.0013	0.0250	-0.0517	-1.2614	-1.4610	1.2208	0.5903	-1.6569	-1.3386	-1.3112
0.1945	-0.0003	-0.0150	0.6383	0.9930	-1.0119	1.2493	-1.3369	-0.2453	-0.6085	-0.6889

X_1 : 有机质; X_2 : 铵态氮; X_3 : 速效磷; X_4 : 速效钾; X_5 : 土温; X_6 : 含水量; X_7 : pH 值; X_8 : 海拔; Y_1 : MPN 法测得的纤毛虫密度; Y_2 : 纤毛虫物种数; Y_3 : 多样性指数。

表 4 纤毛虫群落组成参数与土壤理化因子灰色关联度

Table 4 Grey relational grade of structural parameters of soil ciliates community and environmental factors of soil								
关联矩阵	有机质	铵态氮	速效磷	速效钾	土温	含水量	pH 值	海拔
纤毛虫密度	0.4962	0.4505	0.4345	0.2931	0.4125	0.4582	0.2469	0.2375
物种数	0.3716	0.3547	0.3691	0.2247	0.3654	0.4217	0.3001	0.2365
多样性指数	0.3731	0.3260	0.3360	0.2163	0.3714	0.4412	0.2925	0.2410

通过对 8 种土壤环境因子灰色关联度排序得出,对纤毛虫密度 (Y_1) 的相对重要程度为: $X_1(0.4962) > X_6(0.4582) > X_2(0.4505) > X_3(0.4345) > X_5(0.4125) > X_4(0.2931) > X_7(0.2469) > X_8(0.2375)$ 。即有机质>含水量>铵态氮>速效磷>土温>速效钾>pH 值>海拔;对纤毛虫物种数 (Y_2) 的相对重要程度为: $X_6(0.4217) > X_1(0.3715) > X_3(0.3691) > X_5(0.3654) > X_2(0.3547) > X_7(0.3001) > X_8(0.2365) > X_4(0.2247)$,即含水量>有机质>速效磷>土温>铵态氮>pH 值>海拔>速效钾;对物种多样性指数 (Y_3) 的相对重要程度为: $X_6(0.4412) > X_1(0.3731) > X_5(0.3714) > X_3(0.3360) > X_2(0.3260) > X_7(0.2925) > X_8(0.2410) > X_4(0.2163)$,即含水量>有机质>土温>速效磷>铵态氮>pH 值>海拔>速效钾。分析结果显示,在湿地环境因子中影响纤毛虫群落的化学因子有机质和铵态氮相对较大,物理因子中土温和含水量影响较为明显。

3 讨 论

甘肃甘南高原沼泽湿地纤毛虫群落组成具有独特性,Foissner(1987)对全世界所记录的土壤纤毛虫进行了总结,根据对其在土壤中的固有程度推测,将 269 种土壤纤毛虫划分为 3 大类,62 种为土壤和淡水共有种,约占总数的 23%;142 种为强烈倾向于土壤生活的种类,约占总数的 53%;65 种被认为是真正的土壤种,约占总数的 24%。本研究区淡水生但少见于土壤的类群最多,为 57 种,占总数的 36.31%;淡水类群 32 种,占总数的 20.33%;淡水与土壤共有类群包括强烈倾向于土壤的类群 56 种,占总数的 35.67%;土壤特有类群最少,仅有 12 种,占总数的 7.64%。本研究中,土壤和淡水共有种所占比例高于 23%,而且淡水与土壤兼有包括强烈倾向于土壤生活的种类低于 53%,土壤特有类的比例也远低于 Foissner 得出的 24%,这说明甘南高原沼泽湿地的纤毛虫群落与淡水纤毛虫、土壤纤毛虫群落都有明显的差异,倾向于淡水和土壤的中间过渡态。研究区纤毛虫中,下毛目(Hypotrichida)、前口目(Prostomatida)和肾形目(Colpodida)纤毛虫物种数远远大于其他类群,这除了与虫体本身生理和适应性特征外,与该地区的特殊的湿地生境类型是相适应的。该地区也出现了如袋形目(Bursariomorphida)和缘毛目(Peritrichida)等一些水生、大型的纤毛虫种类。而且一些淡水生纤毛虫、主要分布于淡水

的纤毛虫甚至成为广布种和优势种,这进一步验证了高原沼泽湿地纤毛虫群落具有区别于土壤纤毛虫和淡水纤毛虫群落的特点。

甘南高原沼泽湿地研究区内各样点纤毛虫群落组成表现出了很强的空间异质性。灰色关联度分析显示,各样点纤毛虫群落组成差异与各样点的环境因子有很强的相关性,且不同的环境因子对纤毛虫群落有不同的影响。分析结果显示,在湿地环境因子中化学因子有机质和铵态氮对纤毛虫群落的影响相对较大,物理因子中土温和含水量的影响较为明显,但总体而言,在所有环境因子中化学因子较物理因子对纤毛虫密度的影响大,且有机质的作用最大。由此推断,在甘南高原沼泽湿地中,有机质含量和铵态氮含量是影响高原沼泽湿地纤毛虫群落稳定性的主要因素。这进一步证实纤毛虫群落可以反映其生长和繁殖的环境的状况,故可利用其进行环境效应参数评价、监测和环境状况预报。

纤毛虫作为生态系统微型生物群落的重要组成部分,在生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要作用。高原沼泽湿地纤毛虫与其生存环境因素分析也显示其对生活的微环境变化十分敏感的特点,纤毛虫物种数、丰度和物种多样性指数等结构参数均能客观地反映土壤状况及变化趋势,其中物种多样性指数可直接反映生物群落本身结构的复杂程度、稳定性大小和生态环境质量的优劣。本研究显示,研究区各样点的纤毛虫物种数、丰度、多样性指数的变化趋势是相一致的,由高到低依次为:阿孜、曼日玛 2、曼日玛 1、采日玛、尼玛样点。由此推断,各样点土壤环境状况良好程度由高到低依次为阿孜、曼日玛 2、曼日玛 1、采日玛、尼玛样点。这和牛世全等(牛世全等,2010)利用该区各样点土壤酶活性获得的环境状况评价结果是相一致的,也和各样点的实际情况是相符的。

由于我国地域的多样性,加上原生动物群落在生态环境中的特殊性,我国原生动物的研究状况还未形成完善的系统,尤其利用纤毛虫的环境效应参数评价、监测和预报环境的应用方面还需要大量系统的研究。在此基础上,结合微环境中的理化因子、相应的植被类型、盖度、以及土壤酶的活性等才可能建立方便、快捷、高效且具有可行性的具体标准。

致 谢 中国科学院海洋研究所责任研究员徐奎栋博士为本文的中、英文摘要做了修改和润色,谨此致谢。

参考文献

- 崔振东. 1986. 长白山北坡针阔混交林土壤原生动物的生态分布. 生态学杂志, **5**(2): 1-5.
- 蔡迪花, 郭 锐, 韩 涛. 2007. 1990—2001 年黄河玛曲高寒沼泽湿地遥感动态监测. 冰川冻土, **29**(6): 874-881.
- 程 晓, 刘汉成, 杜海峰, 等. 2009. 甘肃黄河首曲湿地省级自然保护区肉鞭虫物种多样性研究. 西北师范大学学报(自然科学版), **45**(6): 92-97.
- 黄锡畴. 1989. 沼泽生态系统的性质. 地理科学, **9**(2): 97-104.
- 李广文, 王永洁, 罗金明, 等. 2009. 融冻时期扎龙湿地土壤含水量变化研究. 高师理科学刊, **29**(6): 71-74.
- 牛世全, 李君锋, 杨婷婷. 2010. 等甘南玛曲沼泽湿地土壤微生物量、理化因子与土壤酶活的关系. 冰川冻土, **32**(5): 1022-1029.
- 郎惠清, 祖文辰. 1983. 中国沼泽. 山东科学技术出版社.
- 宁应之, 王 娟, 刘 娜, 等. 2007. 甘肃天水麦积山风景名胜区分土壤纤毛虫的物种多样性. 动物学研究, **28**(4): 367-373.
- 宁应之, 沈韞芬. 1998. 中国典型地带土壤原生动物. I. 区系特征和物种分布. 动物学报, **44**(1): 5-10.
- 宁应之, 刘汉成, 刘 娜, 等. 2009. 中国土壤一新种和五新纪录种(原生动物, 纤毛门). 动物分类学报, **34**(4): 699-708.
- 戚登臣, 李广宇. 2007. 黄河上游玛曲湿地退化现状成因及保护对策. 湿地科学, **5**(4): 342-347.
- 苏 兰, 黄俊浩, 吴 明, 等. 2012. 湿地植被演替中昆虫多样性变化研究进展. 生态学杂志, **31**(6): 1577-1584.
- 施心路. 1999a. 下毛目纤毛虫的系统修订. I. 原下毛亚目, 排毛亚目(纤毛动物门). 动物分类学报, **24**(3): 241-261.
- 施心路. 1999b. 下毛目纤毛虫的系统修订. II. 尾柱亚目(纤毛动物门). 动物分类学报, **24**(4): 361-371.
- 施心路. 2000. 下毛目纤毛虫的系统修订. III. 散毛亚目: 游仆亚目(纤毛动物门). 动物分类学报, **25**(1): 9-22.
- 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 1990. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 王焕校. 2000. 污染生态学. 北京: 高等教育出版社.
- 王荣芬. 1994. 我国沼泽资源开发利用现状. 地理科学, **64**(3): 261-268.
- 汪之波, 陈有华. 2008. 甘肃甘南藏族自治州生态环境现状与恢复对策. 氨基酸和生物资源, **30**(2): 63-66.
- 肖新平. 1997. 关于灰色关联度量化模型的理论研究和评论. 系统工程理论与实践, **4**(8): 76-81.
- 杨 霞, 翟兴礼, 余国莹. 2002. 若尔盖高原湿地生物多样性现状及其保护对策. 长春大学学报, **12**(3): 16-20.
- 尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社.
- 张 超, 宁应之, 刘汉成, 等. 2008. 甘南高寒草甸土壤纤毛虫物种多样性. 西北师范大学学报(自然科学版), **44**(6): 87-92.
- 张志杰, 张维平. 1991. 环境污染生物检测与评价. 北京: 环境科学出版社.
- Bamforth SS. 1971. The numbers and proportions of testacies and ciliates in litters and soils. *Journal of Protozoology*, **18**: 24-28.
- Berger H, Foissner W. 1987. Morphology and biometry of some soil hypotrichs (Protozoa: Ciliophora). *Zoologische Jahrbücher Systematik*, **114**: 193-239.
- Foissner W. 1987. Soil Protozoa: Fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators and guide to the literature. *Progress in Protistology*, **2**: 69-212.
- Foissner W. 1993. Colpodea (Ciliophora). Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- Foissner W. 1995. Tropical protozoan diversity: 80 ciliate species (Protozoa, Ciliophora) in a soil sample from a tropical dry forest of Costa Rica, with descriptions of four new genera and seven new species. *Archiv Für Protisten Kunde*, **145**: 37-79.
- Foissner W, Agatha S, Berger HA. 2002. Soil Ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Namibia (southwest Africa), with Emphasis on Two Contrasting Environments, the Etosha Region and the Namib Desert. Linz, Austria: Denisia.
- Hu XZ, Warren A, Song WB. 2004. Observations on the morphology and morphogenesis of a new marine hypotrichida ciliate (Ciliophora, Hypotrichida) from China. *Journal of Natural History*, **38**: 1059-1069.
- Lee JJ, Leedale GF, Bradbury P. 2000. The Illustrated Guide to the Protozoa (2nd ed.). Lawrence: Allen Press.
- Stout JD. 1962. An estimation of micro faunal population in soil and forest litter. *Soil Science*, **13**: 314-320.
- Wilbert N. 1975. Eine verbesserte Technik der protargolimprägation für ciliaten. *Mikrokosmos*, **6**: 171-179.

作者简介 宁应之,男,1963年生,教授,博士,中国动物学会原生动物学分会理事。主要研究方向为土壤原生动物分类学、生态学与物种多样性。E-mail: ningyz@nwnu.edu.cn
责任编辑 张 敏