

土壤原生动物的研究进展*

陈素芳, 徐润林

(中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275)

摘要: 根据国内外文献报道, 对土壤原生动物研究的方法学、动物地理学、生态学以及土壤环境生物学等多个方面进行了综述。结果显示: 土壤原生动物作为生物圈中的重要组成部分, 在能量流和物质循环中起着其它生物类群无法替代的作用; 它们的地理分布也具有非常特殊的类型; 其种类组成在全球生物多样性研究中有着非常重要的意义。在应用生物学方面, 它们也具有广泛的前景。

关键词: 土壤原生动物; 生物多样性; 地理分布; 矿化作用

中图分类号: Q951 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) S1-0187-08

土壤原生动物泛指生活在土壤或土壤表面覆盖的凋落物中的原生动物。对土壤原生动物的研究始于19世纪30年代, 人们发现土壤中有许多原生动物种类并就此展开了广泛的研究与讨论, 当时一般认为土壤中发现的原生动物来自于淡水或海水栖息地。20世纪初 Martin 及同事首次证实土壤原生动物是一个相对独立存在的以土壤为栖息地的群落^[1, 2], 成为土壤原生动物研究的转折点, 人们对土壤原生动物开始了详细而系统的研究。

20世纪20-30年代, 主要的研究集中于土壤原生动物的染色、培养、计数、食性、与细菌的关系等。40-60年代主要是解决定量方面的问题, 经反复比较, 一般认为“三级十倍环式稀释法”(three level ten-fold dilution method)较为合适。此后, 在全球开展了土壤原生动物的生态调查, 内容包括: 土壤原生动物种类组成, 种的分布机率与地理条件、广域气候、土壤环境条件的关系。近20年来, 国际上对土壤原生动物的生态研究, 已趋向微域环境的分析, 如从原生动物的现存量(数量与生物量)、呼吸量来分析它在土壤生态系统能量转化中的作用, 土壤原生动物对受到人类经济活动影响的土壤环境的指示作用等。

在我国, 土壤原生动物的研究起步较晚, 系统性的研究更少。仅有的有关土壤原生动物的研究包括长白山针阔混交林带、中国典型地带、衡山及西天目山亚热带、青岛地区、大鹏半岛以及南极菲尔德斯半岛地区土壤原生动物生态学研究等^[3-12]。

1 土壤原生动物研究方法

1.1 土壤原生动物定量研究方法

目前国际上通用的土壤原生动物定量研究方法主要有两类: 一类是培养计数法, 另一类是直接计数法。

被广泛采用的培养计数法是“最大可能数”(MPN: most probable number)法, 又称最大或然数或稀释培养法。它是根据微生物数量统计原理, 得出每单位土壤中原生动物的最大数量的方法。该法最初是由 Cutler 提出^[13], 并由

Singh 和 Stout 分别改进为“三级十倍稀释法”^[14, 15]。经反复验证该方法已得到广泛的认同及应用。在此基础上 Darbyshire 又在该法中引入了多倍稀释及微量滴定板的使用^[16], Aurelio et al. 和 Ekelund & Christensen 应用计算机软件来计算土壤中原生动物最大可能数量等^[17, 18]。

培养计数法都是在合适的生长介质上建立逐步稀释的土壤悬浮液系列, 在最初的一个月里分几次镜检土壤悬浮液稀释液中原生动物的生长情况, 通过这种方法可以得到一个对所有原生动物(包括包裹与滋养态)数量的一个估计。这种方法简便易行, 不受时间、地点的限制, 不要求在采样后短时间内完成定量分析等。但由于该方法是对土壤进行培养, 因此所有的包裹(包括那些在原位条件下并不萌发的包裹)都有可能优越的培养条件下脱包裹而呈活动态, 所得结果可能高估了土壤中活动的原生动物的数量, 所反映的实际上是原生动物潜在的最大丰度。另一方面, 因为土壤中鞭毛虫和肉足虫数量一般比较多, 必须要选择较高的稀释倍数, 而纤毛虫的数量一般比较少, 因此在选择较高稀释倍数时, 就会使纤毛虫缺失环多, 所得到的纤毛虫的丰度小, 这样可能低估纤毛虫的数量。而且如果有些原生动物在培养建立的过程中被杀死或者不能依赖所提供的食物生存, 同样会低估土壤中原生动物的数量。另外由于培养计数法在镜检时是在低倍镜下进行, 只能分辨大的类群, 无法鉴定到种, 不能统计每个种的数量, 因此不可能从量的角度来确定优势种, 优势种只能根据定性研究中每个种的出现相对多少来确定。

直接计数法有几种: 比较简单的方法是将一部分土壤与无菌水或土壤提取液混合形成悬浮液, 直接在光学显微镜下计数。其他的方法有 Coiteaux & Palka 提出的微孔过滤技术(the Millipore filtering technique)以及 Heal 提出的琼脂膜技术(the agar film technique)等^[19, 20]。Foissner 认为直接计数法对于有壳肉足虫与纤毛虫计数效率高, 但对于裸肉足虫以及异养鞭毛虫效率很低, 因为它们经常被土壤颗粒掩盖^[21, 22]。由于直接计数法是在采样后12 h内完成, 休眠的个体(包裹)尚未萌发, 自然条件下的滋养体亦未繁殖,

* 收稿日期: 2003-04-04

作者简介: 陈素芳(1979年生), 女, 硕士生; 通讯联系人: 徐润林; E-mail: lsscl@zsu.edu.cn

因而所得结果是原位条件下土壤中原生动物滋养体个体数。而且直接计数法可在高倍镜下鉴定种类,并可以统计到各种原生动物的数量,因此可以对原生动物优势种准确定量。

在有些研究中需计算土壤原生动物滋养体与包囊的比值,一般是 MPN 法与由 Culter 最初提出的“盐酸法”相结合而获得^[13]。其技术路线是准备两套稀释系列,其中一套稀释系列用 2% 的 HCl 处理 16 h,然后用碱来中和。HCl 是用来杀死土壤原生动物的滋养体,这样通过比较两套稀释系列中原生动物数量的不同来计算土壤中滋养体与包囊的比值。Bodenheimer & Reich 认为这种方法可能会杀死一些原生动物的包囊^[23]。另外也有人提出一种热处理方法,同样也是准备两套稀释系列,其中一套稀释系列加热到 45℃,用来杀死其中的原生动物滋养体,该法对包囊的影响目前还不了解^[24]; Griffiths & Ritz 提出用超速离心与染色结合的方法来区分营养状态与包囊状态的原生动物,但只适用于农业土壤^[25]; Bamforth 提出用直接计数法估计纤毛虫滋养体数量,而用 MPN 方法估计土壤中所有的纤毛虫数量,从而计算营养状态与包囊状态的纤毛虫比值等^[24]。

1.2 土壤原生动物定性研究方法

最简单的土壤原生动物定性研究方法是倒一小部分土壤于有丰富培养基的培养皿中,加水或弱盐溶液浸湿,在室温黑暗条件下培养,几个小时后可以观察到原生动物。在随后的 1~2 个月中定期的观察中可以看到土壤原生动物群落会随时间改变,而且能够观察到新出现的种类。在大多数情况下,种类鉴定是需要通过分离并纯培养。常用的分离方法有两种:一是可以通过显微操作技术,用小的毛细管将单个原生动物从丰富培养基中转移到一些培养介质上;二是可以用定量研究中得到一些比较常见的原生动物进行纯培养。

对于土壤原生动物的鉴定目前还存在很多困难,如目前有关鞭毛虫形态描述的系统性文献比较少;虽然有一些肉足虫鉴定的文献,但在许多情况下使用一般光学显微镜只能鉴定到属;对一些纤毛虫种的鉴定也常常需要掌握蛋白银染色技术等。

2 环境因子对土壤原生动物的影响

在众多的环境因素中,有两个因素对土壤原生动物十分重要,一是可利用的土壤孔隙网状结构(the architecture of the habitable soil pore network),该因素是由土壤的结构与质地决定的;另一个因素是含水量。这两个因素之间的相互关系构成了土壤原生动物生存的基本环境^[26]。

在多数情况下,土壤的团块结构(aggregate structure)能够有效的阻止土壤中原生动物的迁移。只有当土壤含水量足够高时,土壤原生动物才能从一个聚集点(aggregate)迁移到另一个聚集点,因此不同采样点土壤原生动物群落可能会有很大的不同。

一种特定原生动物能够利用的土壤孔隙的直径下限是由该种原生动物可以穿过的最小孔径所决定的,上限是由最大充满水的孔隙直径所决定的。如果土壤含水量非常低,以致于最大的充满水的孔隙直径要比原生动物所能够穿过的孔隙直径还要小,那么土壤里不可能有该原生动物的活动。普遍认为土壤原生动物能够穿过的最小孔径为 3 μm ^[27, 28],但在一些比较干燥的土壤中的小型鞭毛虫如

Cercomonas sp. 可以穿过更小的孔径^[29]。Old 等认为一些大型肉足虫可以穿过直径为 1 μm 的孔径^[30]。

另一个影响土壤原生动物活动的因素是土壤孔隙直径比较小,使可能的捕食者无法进入,这种土壤结构称为土壤原生动物被保护的孔隙(protected pore space for protozoa)。线虫可能是原生动物主要的捕食者,一般认为直径小于 30 μm (对于更小的线虫类型可能是 20 μm) 的土壤孔隙可以限制线虫的进入。纤毛虫也可能是小型原生动物的捕食者,如肾形虫 *Colpoda steinii* 可被 30 μm 的孔径所限制^[29]。因此对于一些小型的土壤原生动物来说,保护孔隙直径在 3~30 μm 之间。

在一定的土壤含水量下,不同质地与结构的土壤孔隙直径是不同的,所以不同土壤为原生动物提供的可栖息孔隙空间也不同。在沙质土壤中,大部分水存在于孔径大于 30 μm 孔隙中,原生动物只能利用一些有限的被保护的孔隙空间。在肥沃的土壤中会有大量的、可被原生动物利用的孔隙空间。另外,如果土壤颗粒过细,缺乏原生动物活动的孔隙,原生动物也会很少见。南极菲尔德斯半岛地区的研究表明土壤含水量是土壤原生动物生存、繁殖与分布的限制因子^[12]。中国典型地带土壤原生动物研究揭示了原生动物丰度与土壤含水量的变化呈显著正相关^[8]。

除了上述的因素外,土壤 pH 也是一个重要的因素。不同的土壤原生动物对 pH 值的要求不同。有壳肉足虫最适 pH 值范围比较狭窄,超过这一范围的个体数目比较少。它们在粗腐殖质中比较丰富,在细腐殖质中则较稀少。Foissner 根据土壤有壳肉足虫对不同 pH 值的倾向性对其作出了比较完备的分类,并根据多方面的数据提出区分存在于粗腐殖质与细腐殖质环境中的特种类名录^[31]。

有关其它土壤原生动物对 pH 值的耐受性的文献比较少,而且大部分是有关纤毛虫的。Stout 认为大多数原生动物可以在相对宽的 pH 值范围内生存,但最适 pH 值范围比较窄^[32]; Stout & Heal 研究中提到 pH 值在 3.5~9.5 之间是大多数广泛分布的土壤原生动物生存范围^[33]; Homma & Cook 发现不同土壤中嗜菌性巨大肉足虫 *Vampyrellid* sp. 在 pH 值为 7.0 时丰度达到最大;而 pH 值在 4.0 或 8.5 时生命活动受到抑制^[34]。

宁应之等认为,在一定范围内, pH 值越高,土壤原生动物丰度就越大。但与土壤含水量以及温度相比, pH 对土壤原生动物的影响最小^[7]。

在较宽的温度范围内提高温度有利于促进土壤原生动物的活动以及新陈代谢,同时可以减少原生动物的世代时间。对于许多原生动物,温度的上限在 30℃ 左右, 35~40℃ 可以导致其死亡^[33]。但也有报道表明一些肉足虫种类,包括一些病原性种类 *Acanthamoeba* sp.、*Naegleria* sp. 可以在 37℃ 以上生长,它们的包囊能在更高的温度下存活;土壤鞭毛虫 *Heteromita globosa* 在 1.5℃ 以上都可保持活跃状态^[26]; Stout & Heal 认为在土壤原生动物与温度之间关系复杂^[33]。对中国典型地带的土壤原生动物的研究表明:在一定范围内,土壤原生动物丰度与温度成正相关^[7]。

土壤中有机的分解导致 O_2 缺乏与 CO_2 过剩,但 O_2 的缺乏情况更为普遍。因为 O_2 只微溶于水,而且扩散非常缓慢,厌氧生物将会短暂存在。 CO_2 易溶于水,对土壤 pH 值产生影响。在有食物存在的位点经常有厌氧情况的发生,因此一般认为土壤原生动物可以忍受无氧或微氧环境。

Christensen et al 证实了在低氧浓度土壤中有大量的土壤原生动物存在^[35, 36]; Neff 认为 *Acanthamoeba* sp. 在无氧条件下

不能生长^[37]。Rønn & Gavito 发现 CO₂ 浓度上升使细菌数量增多, 原生动物数量上升^[38]。Treonis & Lussenhop 的研究中提到 CO₂ 浓度上升导致鞭毛虫数量增加但不是很明显, 肉足虫数量会明显下降^[39]。Anderson & Griffin 发现大气中 CO₂ 浓度的增加导致植物根部原生动物数量显著增加, 并有利于物质矿化作用的增强, 同时有助于植物对营养的吸收和生长^[40]。

原生动物丰度与土壤有机质、TN 和 TP 均呈极显著或显著的正相关, 在一定范围内, 有机质、总氮和总磷的含量越高, 原生动物丰度就越大^[7, 41, 42]。原生动物的丰度与 TK 呈显著的负相关。在这 4 个因子中, 有机质对原生动物的影响最大, 其次是 TN, 再次之是 TP 和 TK^[7]。

3 土壤原动物在土壤生态系统中的作用

3.1 原生动物在碎屑食物链中的作用

土壤生态系统很大程度上是建立在死亡有机物所储存的能量及营养基础上。细菌及真菌等分解者可以利用这些能量与营养转化为自身生物量, 而这些分解者又被小型动物、原生动物及线虫等摄食。目前已有多个土壤食物链结构的模型提出, 原生动物可被更高营养级, 例如捕食性的线虫及小的节肢动物等捕食。原生动物在这些食物链中起着关键的作用: 它们是细菌的重要捕食者, 并且被杂食性的及肉食性的线虫所捕食; 一些小型鞭毛虫及肉足虫也可被一些大型肉足虫及纤毛虫捕食。原生动物可以捕食一些多细胞动物无法摄取的细菌。因此, 土壤原动物在细菌与更高营养级之间起着重要的链接作用。

3.2 原生动物对细菌的摄食作用

原生动物对土壤细菌数量的影响: 自然土壤环境中细菌的数量受到多种因素的影响, 原生动物对细菌捕食也是因素之一。在现场进行的细菌与土壤原生动物关系的研究中人们发现: 在没有灭菌的对照土壤中的细菌数量明显减少, 同时土壤中原生动物数量增加^[43]。土壤原动物的活动被放线菌酮抑制时, 细菌的数量保持高密度^[44]。Rønn 等研究原生动物对引入到土壤中的两种细菌 *Mycobacterium chlorophenolicum* 和 *Pseudomonas chlororaphis* 影响时发现: 将 *Pseudomonas chlororaphis* 引入后不久数量下降并伴随着原生动物数量的上升, 但将 *Mycobacterium chlorophenolicum* 引入后数量基本保持稳定, 并且对原生动物数量没有明显的影响。他们认为不同细菌作为原生动物食物的适合度是不同的^[45]。

大量的研究表明当培养环境中只有单种细菌时, 原生动物虽然可以减少该细菌的数量却不能完全除去该细菌。对这种现象目前有 3 种解释:

(1) Danso & Alexander 认为, 当细菌的数量下降到原生动物通过摄食细菌获得的能量小于或等于需要用来寻找并消化细菌的能量时, 原生动物就会死亡或者进入包裹状态, 细菌得以幸存^[46]。

(2) Habte & Alexander 提出细菌的繁殖也可能参与保持原生动物与细菌数量之间的动态平衡^[47]。

(3) Sardeshpande 认为土壤颗粒不能保护细菌使它们不被原生动物摄食^[48]。

但 Foissner 在进一步分析他们的数据发现: 在液体培养基中剩存的细菌浓度要比灭菌土壤中剩存的细菌浓度更低, 因此土壤的结构可能有利于细菌的存活, 细菌可生存在原生动物无法进入的微小空间里, 土壤的空间异质性可能参与捕食者-被捕食者之间关系的稳定^[26]。

近来的研究表明: 在土壤中加入含有斑脱土的砂土 (bentonite clay) 时, 引入到土壤中的根瘤菌在原生动物的捕食下剩存数量更多^[49]; Postma 等研究了不同土壤部分中鞭

毛虫捕食下的细菌的数量, 发现在土壤团块结构与颗粒中细菌的数量更多, 可能是因为这些结构为细菌提供了原生动物无法进入的微生态位等^[50]。

原生动物对细菌群落组成的影响:

Mallory et al 发现: 在加入细菌 *Enterobacter agglomerans* 时, 细菌 *Salmonella typhimurium* 在原生动物捕食下数量可以降低到极低的水平。他们认为当细菌 *Enterobacter agglomerans* 大量存在时, 可以作为一种补充食物, 即使细菌 *Salmonella typhimurium* 的数量很低, 原生动物仍然可以继续捕食, 最终可导致细菌 *Salmonella typhimurium* 数量减少为零。就此他们提出当两种或以上的细菌存在于环境中时, 至少有一种细菌的密度在捕食极限值 (threshold value for predation) 之上并且有一种细菌的密度在捕食极限值之下时, 后者很有可能会完全被原生动物从环境中除去^[51]。

原生动物对细菌的这种选择性捕食压力有利于那些没有因捕食而被消除的细菌的生存。如生长率高的细菌与生长率低的细菌相比在原生动物的捕食压力下可以保存更高的数量。原生动物的捕食同样有利于那些因形状或大小而不被原生动物捕食的细菌的生存。Güde 发现在活性污泥中鞭毛虫对细菌的捕食有利于螺旋状及丝状细菌数量的增加^[52]; 纤毛虫 *Cyclidium* sp. 对棒状细菌的捕食导致了长形的细菌出现。这些长形个体的生长率比棒状个体低, 如果没有原生动物的摄食, 将会被更有效率的棒形个体淘汰^[53]。

原生动物对细菌活动的刺激作用:

原生动物的存在可以促进大量的细菌活动, 例如固 N、CO₂ 释放、硝化作用以及铁载体的分泌等。

原生动物的捕食对细菌生长与代谢活动的促进可从 3 个方面加以考虑: ①原生动物选择性捕食有利于那些快速生长的细菌种类; ②原生动物分泌的有机物质促进了细菌的活动^[54]; ③细菌被捕食时, 数量保持在指数增长期^[55]。

3.3 原生动物对真菌数量的影响

嗜真菌的肉足虫可能会影响植物病原性真菌群落。在遭受小麦全蚀病 (由真菌 *Gaeumannomyces graminis* 引起) 的土壤中发现嗜真菌的肉足虫的数量比正常土壤中高^[56]; 在土壤中加入真菌后常可以观察到嗜真菌的原生动物数量显著增高, 这些也许会有不良的作用, 例如为了加强植物根部的定居作用将菌根真菌加到土壤中, 或者为了控制一种植物病害而将一种真菌引入到土壤中, 土壤原生动物有可能减少这些引入到土壤中的有益真菌的数量。

3.4 原生动物的摄食对分解及矿化作用的影响

对 C 矿化作用的影响:

研究发现在土壤微环境中, 微生物呼吸 (包括细菌及真菌) 占土壤异养呼吸的 91%, 只有 9% 来自于土壤动物, 其中 69% 来自于原生动物^[31]。因此一般认为原生动物本身所产生的 CO₂ 占整个土壤生态系统产生的 CO₂ 比例是非常小的。有原生动物存在的微环境中累积的 CO₂ 浓度比没有原生动物时高, 一般认为是原生动物对细菌活动的促进作用导致环境中 CO₂ 浓度上升。

De Telegdy - Kovats 发现细菌与原生动物一起培养时的总呼吸率要比单独培养细菌时高; 多次加入原生动物, 导致 CO₂ 的产生量下降。他认为细菌与原生动物数量之间存在着生态平衡, 打破这个平衡必然导致 CO₂ 水平降低^[57]。

Coleman 等在研究无菌土壤中肉足虫的捕食对被同化的碳总量的影响时发现: 肉足虫的捕食导致环境中产生的 CO₂ 浓度上升, 但有机碳与 CO₂ 的总值并没有受捕食所影响。他认为捕食并不能提高碳的总体同化率, 只是碳在有机体与 CO₂ 之间的分配不同^[58]。但 Ekelund F & Rønn 认为原生动物实际上促进了细菌对碳的利用^[26]。

对 N 矿化作用的影响:

大量的研究证实原生动物可以提高土壤中 N 的矿化作用。细菌与真菌降解有机物,将 N 转化为自身的生物量;线虫与原生动物摄食细菌及真菌,把过量的 N 以氨的形式释放,通常占总的矿化 N 的 25%~40%^[59]。因此原生动物对 N 矿化的促进作用来自于对细菌活动的刺激,或者直接分泌无机营养 N。细菌可以有效地利用无机营养 N。Wood 比较肉足虫与线虫对矿化作用的影响时发现:两种捕食者都可通过促进细菌活动的方式影响细菌的呼吸作用及细菌的群体数量,但肉足虫始终都能促进 N 的矿化;线虫只有在食物数量下降时才可促进 N 矿化。他推测肉足虫与线虫对 N 矿化作用的促进是以分泌无机 NH_3 的形式直接促进 N 矿化作用;肉足虫始终都能分泌无机 N,而线虫在细菌食物充足时分泌有机 N,当细菌食物耗尽时,分泌无机 N^[60]。

除了对上述的几种营养元素的矿化有一定作用外,土壤原生动物对 S 和 P 的矿化也有一定促进作用^[61-63]。

3.5 土壤原生动物对植物生长的影响

土壤中可提供给植物生长利用的营养与植物根系、土壤微生物及动物之间的相互作用是密切相关的。植物根际是土壤微生物最重要的栖息地,原生动物对微生物的捕食提高了微生物的产量和营养物的矿化,并间接地促进了植物的生长。Clarholm 认为,植物根尖生长时,分泌有机 C 到周围环境中,有利于细菌的生长。大量的细菌生长使有机 N 转化为细菌体的 N;随后细菌被原生动物捕食,原生动物将摄食的细菌生物量中的 N 约 1/3 以 NH_4^+ 的形式释放并被植物根系吸收,从而促进了植物的生长。这种促进作用一般称为营养效应 (nutrient effects)^[64]。

Bonkowski & Brandt 的研究发现原生动物促进了复杂根系的生长:使根系更细,而且具有更多的分支,认为这种根部形态变化现象更类似于激素效应,因此他们提出原生动物通过对根系细菌的选择性捕食影响植物生长的激素效应理论^[65]。

3.6 原生动物对有害生物的控制

一些土壤原生动物选择性以某些细菌及真菌为食,可被用来控制土源性植物病原菌及真菌等。原生动物对有害生物的控制是通过竞争以及捕食。有报道介绍说当土壤原生动物存在时,马铃薯的生长保持正常,即使加入一种植物致病细菌 *Bacillus aroideae* 也不会影响它的生长;没有原生动物存在时马铃薯在几天内枯萎。有些研究者发现巨型肉足虫能够消灭多种病原真菌以及非病原真菌的菌丝、孢子等^[31]。

4 土壤原生动物多样性以及区系地理分布

Vickerman 提出全世界已被描述并现存的原生动物有 40 000 种^[66]。其中的 8 000 种自由生活纤毛虫里有 600 种首先是在土壤中发现的^[67, 68]。已较为详细描述土壤原生动物包括 400 种纤毛虫、260 种鞭毛虫、200 种有壳肉足虫及 60 种裸肉足虫^[69]。原生动物学家们目前还不了解有多少种现存的原生动物种类尚未描述。有观点认为全球现存的原生动物种类数在 100 000 种以上^[69]。

1999 年第三届欧洲原生动物学会上,有关原生动物多样性及其区系地理分布的讨论有两种对立的观点:Finlay 等原生动物生态学家们认为:大多数原生动物是全球性分布的,它们在大多数情况下以包裹的形式存在,在环境适宜时脱包裹成为滋养体;原生动物的区域物种多样性与全球物种多样性的比值很高,全球原生动物种类数可能比较少;大多数的纤毛虫已被发现,现存自由生活的纤毛虫可能只有 3 000 种。这种观点被称为“普遍分布模型”(ubiquity model)^[70-76]。

Foissner 等原生动物分类学家们则认为:大多数原生动物的分布受区系地理的限制;原生动物丰度很高并不代表全球物种多样性低;目前尚有 70%~80% 的纤毛虫种类没有被描述,全球自由生活的纤毛虫多达 30 000 种,包括 1 330~2 000 种的土壤纤毛虫。该理论被称为“生物地理分布模型”(“biogeography model”)^[70, 77-79]。

“普遍分布模型”

May 指出:1 cm 以上的陆生动物,个体大小每下降 10 倍,种类数则增大 100 倍;而小于 1 cm 的陆生动物,个体越小则种类数越少^[80]。Finlay 等根据 May 的理论提出因为原生动物个体直径小于 1 cm,它们的全球物种多样性可能很低^[71]。

因为动物个体越小,它们种群的丰度越大。Finlay 等认为原生动物个体极小,它们的丰度必定很高、容易迁移、特有种的灭绝及形成率很低,因此大多数原生动物的分布没有地理限制,可以全球性分布;它们的区域性物种多样性与全球物种多样性比值也会很高,全球原生动物种类数可能比较低^[73, 74]。

Finlay 根据现有的文献认为现存自由生活纤毛虫种类有 3744 种;纤毛虫新种的鉴定很大程度上依赖于当时的技术手段及研究者个人的条件,有关原生动物种类的定义也并不明确,因此纤毛虫的鉴定中有同一物种或同一个属具有多个不同名称的现象,需要进行修订,一些种类可能因此被合并或取消;目前不断发现的新种、新属有些可能已被描述过,目前真正发现的新种数可能与因为种类的修订而减少的种类数相当,纤毛虫的种类数可能会保持恒定或下降,估计在 3 000 种左右^[73]。

一些被认为有特定地理分布的原生动物在以后研究中经常可以发现可分布更广泛的区域^[75, 76]。

“生物地理分布模型”

Foissner 则认为不可能对现存的全球自由生活原生动物种类数作出精确的预测^[77],Finlay 的预测偏低,全球纤毛虫可能有 30 000 种,土壤纤毛虫种类数也远远大于目前所发现的种类数^[77];他利用 Hodkinson 的统计方法^[81]来预测土壤原生动物多样性,认为土壤纤毛虫至少有 1 330~2 000 种,其中 75%~80% 的种类还没有被描述;并且有些遗传学家也认为原生动物特别是纤毛虫的种类数是 Finlay 所预测的 10~100 倍^[82]。

Foissner 同时还指出:目前大部分被描述的种类是常见种;原生动物的鉴定目前还存在很多困难,很多少见种被数量上占优势的常见种所掩盖,一般来说这些少见种构成了大部分生物群落种类数的 80%^[77, 78];Finlay & Fenchel^[72]的研究集中于一些小的群落生境及个别土样中一些常见种,大部分少见种被忽视。虽然在单个土样中平均只能发现到 1~3 个新种,但大量土样分析可以发现约有 50% 的种类是没有被描述的^[77, 79]。

Finlay 等假定原生动物在全世界的主要分布生境都已被充分研究过,从而预测了全球自由生活的纤毛虫种类数^[82],Foissner 指出只有欧洲以及北美部分池塘、湖泊、江河等被详细调查过,而其它地区及生境的研究则非常少;生物多样性的中心区域即冲积平原 (floodplain) 是世界陆地面积的重要部分,也很少被原生动物学家们研究;在这些冲积平原土样中,有丰富的新种及新属^[78]。

据统计,每年平均有 360 种原生动物新种被发现。Foissner 在研究世界各地的土壤纤毛虫时发现了 700 多个新种,他认为在海水及淡水生境中也至少有 70%~80% 的纤毛虫种类还没有被发现^[77]。

Foissner 指出一些原生动物有特定的地理分布,如一些大型纤毛虫或有壳肉足虫等,它们具有鲜明的形态学特征,比较容易调查它们的分布;许多有壳肉足虫的分布限于冈

瓦纳大陆 (Gondwanan) 或古劳伦大陆 (Laurasian)^[78]。Meisterfeld & Lor-wai Tan 在澳大利亚的一些生境发现了 6 种属于冈瓦纳大陆热带与亚热带类群 (Gondwana - tropical and subtropical groups) 的原生动物^[83]。土壤纤毛虫 *Gigantothrix herzogi* 和 *Bresslauides discoideus* 等很可能只分布于冈瓦纳大陆或古劳伦大陆^[84]。

研究鞭毛虫的地理分布比较困难, 它们大多数特征只有在电子显微镜下才可辨认, 也有一些例外如 *Hemimastix amphikineta* 的特征很明显。Foissner 曾在 30 多个冈瓦纳样点发现过这种鞭毛虫, 但在欧洲的 200 个土样中都没有找到^[78]。这说明了自由生活原生动物具有区域性分布的特点。

国内的研究表明土壤原生动物的地理分布更符合于 Foissner 的理论^[6, 9, 11]。

区域物种多样性与全球物种多样性比值

原生动物区域物种多样性与全球物种多样性的比值首先是由 Fenchel 等提出, 他们认为全世界自由生活的原生动物有 3 000 种, 原生动物的区域性物种多样性与全球物种多样性比值为 10%。这个比值与多细胞动物以及植物相比是相当高的, 因此他们认为“任何种类”可以在“任何地方”发现, 以及“全部淡水原生动物种类最终可以在一个小的池塘发现”^[85, 86]。Foissner 则认为原生动物的全球物种多样性是未知的, 因此 Finlay 得出的原生动物区域性物种多样性与全球物种多样性比值是毫无意义的; 另外从生态学观点来看, 在一个小池塘里可以找到全世界所有的纤毛虫种类是不可能的; Foissner 用尽各种方法在一个面积为 100 m² 的山毛榉树林里取样并培养, 最多只发现了 160 种纤毛虫, 这与全球纤毛虫种类数相差甚远^[77]。

Finlay 根据水生系统中的随机取样分析, 认为大多数纤毛虫种类是普遍存在的, 有极大的丰度; 全球纤毛虫种类多样性比较低^[86]。Foissner 认为由水生系统的结果归纳到陆生系统也是不合适的, 土壤原生动物可能与其他土壤微生物一样集群不均匀分布, 用随机取样的方法来分析土壤环境中原生动物分布并不合适^[77]。

5 原生动物作为土壤环境指示生物

自由生活的原生动物是土壤生态系统重要组成部分, 研究它们群落结构及丰度的动态变化, 可用于评价、监测生物以及非生物环境污染。实际上, 上世纪初原生动物就被广泛用于淡水生态系统的监测; 在土壤中, 原生动物仍很少被用为指示生物。

土壤原生动物作为指示生物具有下列优点: ①原生动物群落结构及丰度动态变化可影响土壤形成及土壤肥力; ②原生动物生长迅速, 并直接通过细胞膜与外界接触, 能对环境变化作出敏捷的反应, 可以作为早期警告系统生物监测工具; ③可在 24 h 内得到结果, 比其他任何真核生物监测系统更迅速; ④原生动物与大型动物的基因组类似, 与原核生物相比它们对环境的反应更具有说服力; ⑤全球范围内土壤原生动物在形态、生态、遗传等方面比较相似, 一些原生动物作为指示生物可以在全球范围内应用; ⑥原生动物可在缺乏高等有机体的极端环境条件生存; ⑦一些普遍分布的种类可以用来比较不同地区的调查结果^[26, 87]。

作为指示生物, 原生动物有着其他动物无法替代的特点: ①它们是细菌的主要摄食者, 摄食的细菌量相当多; ②具有更高的呼吸率; ③世代时间极为短暂; ④繁殖速度快等^[31]。

有壳肉足虫在陆地生境中是很好的指示生物: 它们比较容易鉴定及计数, 在土壤中具有较高的生物量, 而且生

活方式各异, 有明显垂直分布的特点, 另外有关有壳肉足虫的个体生态学资料也较丰富, 所以能被广泛应用于各种生物及非生物环境变化的监测。如一些有壳肉足虫可以作为土壤腐殖质类型的指示生物, 它们在最适环境以外数量一般很低, 即使土壤腐殖质类型只有微妙的不同, 有壳肉足虫的种类及数量也有着明显的区别。另外在粗腐殖质中有壳肉足虫的空壳降解更为缓慢, 可用有壳肉足虫的活体与空壳的比值来区分细腐殖质与粗腐殖质^[31]。

纤毛虫可作为土壤污染良好的指示生物, 但常限于凋落层, 例如森林或严重受到干扰的土壤; 一些纤毛虫可以用来监测土壤中氧容量 (oxygen regime), 特别是周期性的或者个别的氧耗尽情况, 这些用物理化学手段监测比较困难, 如纤毛虫 *Metopus husei* 只能在微氧或者无氧条件下生存并繁殖, 可用来监测土壤中微氧或氧耗尽情况^[87]。

研究表明, 土壤原生动物对农药的反应与其他有机体类似, 一些杀虫剂对原生动物的抑制作用非常明显, 而杀真菌剂对原生动物一般没有明显的影响^[88]。如 Jjemba 的研究表明 Chloroquine、Quinacrine dihydrochloride 对土壤原生动物丰度有促进作用, Metronidazole 在较低的浓度下就可抑制原生动物丰度^[89]。Ekelund 指出杀真菌剂 Propiconazole、Fenpropimorph 对鞭毛虫数量有抑制作用等^[90, 91]。另外 Campbell 发现被重金属 Ni、Cu 和 Zn 污染的肾形虫 *Colpoda steinii* 的数量受到抑制^[92], 因此土壤原生动物作为土壤中残留的农药以及重金属污染的指示生物有着广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] MARTIN C H. The presence of protozoa in soils[J]. Nature, 1913, 91(2266): 111.
- [2] MARTIN C H, LEWIN K R. Some notes on soil protozoa[J]. Phil Trans Roy Soc London, 1914, B05: 77 - 94.
- [3] 崔振东. 长白山森林生态系统土壤原生动物初步研究[J]. 森林生态系统研究, 1983, 3: 144 - 153.
- [4] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 1992, 97 - 150.
- [5] 宋微波. 长颈虫属两种土壤纤毛虫研究(动基片纲: 刺钩目)[J]. 动物分类学报, 1994, 19(4): 385 - 391.
- [6] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物: I. 区系特征和物种分布[J]. 动物学报, 1998, 44(1): 5 - 10.
- [7] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物: II 生态学研究[J]. 动物学报, 1998, 44(3): 271 - 276.
- [8] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物群落结构及其特征[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 1999, 35(2): 50 - 54.
- [9] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物食性的观察[J]. 动物学研究, 1998, 19(5): 397 - 400.
- [10] 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)[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 1999, 35(3): 75 - 82.
- [11] 徐润林, 孙逸湘. 大鹏半岛土壤纤毛虫的群落特点[J]. 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物生态学研究[J]. 水生生物学报, 2000, 24(6): 610 - 615.
- [13] CULTER D W. A method for estimating the number of active protozoa in the soil[J]. J Agric. Sci, 1920, 10: 135 - 143.
- [14] SINGH B N. A method of estimating numbers of soil protozoa, especially amoebae, based on their differential feeding on bacteria[J]. Ann Appl Biol, 1946, 33: 112 -

- 119.
- [15] STOUT J D. An estimation of microfaunal populations in soils and forest litter[J]. *Z soil Sci*, 1962, 13: 314 – 320.
- [16] DARBYSHIRE J F, WHEATLEY R E, GREAVES M P, et al. A rapid micromethod for estimating bacterial and protozoa populations in soil[J]. *Rev Ecol Biol Soil*, 1974, 11: 465 – 475.
- [17] AURELIO M, BRIONES J, REICHARDT W. Estimating microbial population counts by “most probable number” using Microsoft Excel[J]. *J Microb Methods*, 1999, 35: 157 – 161.
- [18] FINLAY B J, BLACK H I J, BROWN S, et al. Estimating the growth potential of the soil protozoan community. *Protist*, 2000, 151: 69 – 80.
- [19] COÛTEAUX M M, PALKA L. A direct counting method for soil ciliates[J]. *Soil Biol Biochem*, 1988, 20: 7 – 10.
- [20] HEAL O W. The use of cultures for studying testacea (protozoa: rhizopoda) in soil[J]. *Pedobiologia*, 1964, 4: 1 – 17.
- [21] FOISSNER W. Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative examples[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 1999, 74: 95 – 112.
- [22] FOISSNER W. Estimation of numbers of protista in soil: a test of the direct method[J]. *J Protozool*, 1983, 30, 49A (abstract).
- [23] BODENHEIMER F S, REICH K. Studies on soil protozoa [J]. *Soil Sci*, 1933, 38: 259 – 265.
- [24] BAMFORTH S S. Proportions of active ciliate taxa in soils [J]. *Biol Fertil Soils*, 2001, 33: 197 – 203.
- [25] GRIFFITHS B S, RITZ L. A technique to extract, enumerate and measure protozoa from mineral soils[J]. *Soil Biol Biochem*, 1988, 20: 163 – 173.
- [26] EKELUND F, RØNN R. Notes on protozoa in agricultural soil with emphasis on heterotrophic flagellate and naked amoebae and their ecology[J]. *FEMS Microbiol Reviews*, 1994, 15: 321 – 353.
- [27] POSTMA J, VAN VEEN J A. Habitable pore space and survival of *Rhizobium leguminosarum* biovar *trifolii* introduced into soil[J]. *Microb Ecol*, 1990, 19: 149 – 161.
- [28] DARBYSHIRE J F, ROBERTSON L, MACKIE L A. A comparison of two methods of estimating the soil pore network available to protozoa[J]. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17: 619 – 624.
- [29] CUTLER D W, DIXON A. The effect of soil storage and water content on the protozoan population[J]. *Ann Appl Biol*, 1927, 14: 247 – 254.
- [30] OLD K M, DARBYSHIRE J F. *Arachnula impatiens* Cienk, a mycophagous giant amoebae from soil[J]. *Protistologica*, 1980, 16: 277 – 287.
- [31] FOISSNER W. Soil protozoa: Fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators, and guide to the Literature[J]. *Progress in protistology*, 1987, 2: 69 – 212.
- [32] STOUT J D. Reaction of ciliates to environmental factors [J]. *Ecology*, 1956, 37: 178 – 191
- [33] STOUT J D, HEAL O W. Protozoa[M]. In: *Soil Biology* (Burgess A, Raw F eds), Academic Press, New York, 1967, 149 – 195.
- [34] HOMMA Y, COOK R J. Influence of matric and osmotic water potentials and soil pH on the activity of giant vampyrellid amoebae[J]. *Phytopathology*, 1985, 75: 243 – 246.
- [35] CHRISTENSEN S, GRIFFITHS B S, EKELUND F, et al. Huge increase in bacterivores on freshly killed barley roots [J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 1992, 86: 303 – 310.
- [36] GRIFFITHS B S, EKELUND F, RØNN R, et al. Protozoa and nematodes on decomposing barley roots [J]. *Soil Bio Biochem*, 1993, 25: 1293 – 1295.
- [37] NEFF R J, NEFF R H, TAYLOR R E. The nutrition and metabolism of a soil amoeba, *Acanthamoeba* sp.[J]. *Physiol Zool*, 1958, 31: 73 – 91.
- [38] RØNN R, GAVITO M, LARSEN J. Response of free – living soil protozoa and microorganisms to elevated atmospheric CO₂ and presence of mycorrhiza [J]. *Soil Bio Biochem*, 2002, 34: 923 – 932.
- [39] TREONIS A M, LUSSENHOP J F. Rapid response of soil protozoa to elevated CO₂[J]. *Biol Fertil Soils*, 1997, 25: 60 – 62.
- [40] ANDERSON O R, GRIFFIN K L. Abundances of protozoa in soil of laboratory – grown wheat plants cultivated under low and high atmospheric CO₂ concentrations [J]. *Protistology*, 2001, 2 (2): 76 – 84.
- [41] FORGE T A, HOGUE E, NEILSEN G. Effects of organic mulches on soil microfauna in the root zone of apple: implications for nutrient fluxes and functional diversity of the soil food web[J]. *Appl Soil Ecol*, 2003, 22: 39 – 54.
- [42] VERHOEVEN R. Response of soil microfauna to organic fertilization in sandy virgin soils of coastal dunes [J]. *Biol Fertil Soils*, 2001, 34: 390 – 396.
- [43] SØRENSEN S J, SCHYBERGA T, RØNN R. Predation by protozoa on *Escherichia coli* K12 in soil and transfer of resistance plasmid RP4 to indigenous bacteria in soil [J]. *Appl Soil Ecol*, 1999, 11: 79 – 90.
- [44] INGHAM E R, DOYLE J D, HENDRICKS C W. Assessing interactions between the soil foodweb and a strain of *Pseudomonas putida* genetically engineered to degrade 2,4-D [J]. *Appl Soil Ecol*, 1995, 2: 263 – 274.
- [45] RØNN R, GRUNERT J, EKELUND F. Protozoan response to addition of the bacteria *Mycobacterium chlorophenolicum* and *Pseudomonas chlororaphis* to soil microcosms [J]. *Biol Fertil Soils*, 2001, 33: 126 – 131.
- [46] DANSO S K A, ALEXANDER M. Regulation of predation by density: the protozoan – rhizobium relationship [J]. *Appl Microbiol*, 1975, 29: 515 – 521.
- [47] HABTE M, ALEXANDER M. Protozoan density and the coexistence of protozoa predators and bacterial prey [J]. *Ecology*, 1978, 59: 483 – 488.
- [48] SARDESHPANDE J S, BALASUBRAMANYA R H, KULKARNI J H, et al. Protozoa in relation to *Rhizobium* S – 12 and *Azotobacter chroococcum* in soil [J]. *Plant Soil*, 1977, 47: 75 – 80.
- [49] HEYNEN C E, VAN ELSAS J D, KUIKMAN P J. Dynamics of rhizobium leguminosarum biovar trifolii introduced into soil: the effect of bentonite clay on predation by protozoa [J]. *Soil Biol Biochem*, 1988, 20: 483 – 488.
- [50] POSTMA J, HOK-A-HIN C H, VAN VEEN J A. Role of micro niches in protecting introduced *Rhizobium leguminosarum* biovar trifolii against competition and predation in soil [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1990, 56: 495 – 502.

- [51] MALLORY LM, CHANG S Y, LI N, et al. Alternative prey: a mechanism for elimination of bacterial species by protozoa[J]. Appl Environ Microbiol, 1983, 46: 1073 – 1079.
- [52] GÜDE H. Grazing by protozoa as selection factor for activated sludge bacteria[J]. Microb Ecol, 1979, 5: 225 – 237.
- [53] SHIKANO S, LUCKINBILL L S, KURIHARA Y. Changes of traits in a bacterial population associated with protozoal predation[J]. Microb Ecol, 1990, 20: 75 – 84.
- [54] HERVEY R J, GREAVES J E. Nitrogen fixation by *Azotobacter chroococcum* in the presence of soil protozoa[J]. Soil Sci, 1941, 51: 85 – 100.
- [55] JOHANNES R E. Influence of marine protozoa on nutrient regeneration[J]. Limnol Oceanogr, 1965, 10: 434 – 442.
- [56] CHAKRABORTY S, WARCUP J H. Populations of mycophagous and other amoebae in take-all suppressive and non-suppressive soils[J]. Soil Biol Biochem, 1984, 16: 197 – 199.
- [57] DE TELEGDY-KOVATS L. The growth and respiration of bacteria in sand cultures in the presence and absence of protozoa[J]. Ann Appl Biol, 1932, 19: 65 – 86.
- [58] COLEMAN D C, ANDERSON R V, COLE C V, et al. Trophic interactions in soils as they affect energy and nutrient dynamics. IV. Flows of metabolic and biomass carbon[J]. Micro Ecol, 1978, 4: 373 – 380.
- [59] FORGE T A, MUEHLCHEN A M, SIMARD S W. Influences of clearcut harvesting and fertilization on structure and function of the soil food web in ICH forests of Southern Interior British Columbia[J]. <http://www.For.Gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/En/En59.htm>, 2001.
- [60] WOODS LE, COLE C V, ELLIOTT E T, et al. Nitrogen transformations in soil as affected by bacterial-microfaunal interactions[J]. Soil Biol Biochem, 1982, 14: 93 – 98.
- [61] GUPTA V V S R, GERMIDA J J. Influence of bacterial-amoebal interactions on sulfur transformations in soil[J]. Soil Biol Biochem, 1989, 21: 921 – 930.
- [62] COLE C V, ELLIOTT E T, HUNT H W. Trophic interaction in soils as they affect energy and nutrient dynamics. V. transformations[J]. Micro Ecol, 1979, 4: 381 – 387.
- [63] MCGILL W B, COLE C V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter[J]. Geoderma, 1981, 26: 267 – 286.
- [64] CLARHOLM M. Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen[J]. Soil Biol Biochem., 1985, 17, 181 – 187.
- [65] BONKOWSKI M, BRANDT F. Do soil protozoa enhance plant growth by hormonal effects[J]. Soil Biol Biochem, 2002, 34: 1709 – 1715.
- [66] VICKERMAN K. The diversity and ecological significance of protozoa[J]. Biodiv Conserv, 1992, 1: 334 – 341.
- [67] CORLISS J O. The kingdom Protista and its 45 phyla[J]. BioSystems, 1984, 17: 87 – 126.
- [68] FOISSNER W. An updated compilation of world soil ciliates (protozoa, ciliophora), with ecological notes newrecords, and descriptions of new species[J]. Europ J Protistol, 1998, 34: 195 – 235.
- [69] COÛTEAUX M M, DARBYSHIRE J F. Functional diversity amongst soil protozoa[J]. Appl Soil Ecol, 1998, 10: 229 – 237.
- [70] HANSEN P J, LEICK V. Meeting Report: Third European congress of protistology and 9th European congress on ciliate biology, Helsingør, Denmark, July 26 – 30[J]. Protist, 1999, 150: 225 – 228.
- [71] FINLAY B J, ESTEBAN G F, FENCHEL T. Global diversity and body size[J]. Nature, 1996a, 383: 132 – 133.
- [72] FINLAY B J, FENCHEL T. Divergent Perspectives on Protist Species Richness[J]. Protist, 1999, 150: 229 – 233.
- [73] FINLAY B J. The global diversity of protozoa and other small species[J]. International Journal for Parasitology, 1998, 28: 29 – 48.
- [74] FINLAY B J, ESTEBAN G F, CLARKE J K. Biodiversity of terrestrial protozoa appears homogeneous across local and global spatial scales[J]. Protist, 2001, 152: 355 – 366.
- [75] FINLAY B J, CLARKE K J. Apparent global ubiquity of species in the protist genus *paraphysomonas*[J]. Protist, 1999, 150: 419 – 430.
- [76] FINLAY B J. Global dispersal of free – living microbial eukaryote species[J]. Environ Microb, 2002, 296: 1061 – 1063.
- [77] FOISSNER W. Global soil ciliate (Protozoa, Ciliophora) diversity: a probability-based approach using large sample collections from Africa, Austria and Antarctica[J]. Biodiv Conserv, 1997, 6: 1627 – 1638.
- [78] FOISSNER W. Protist diversity: estimates of the near-imponderable[J]. Protist, 1999, 150: 363 – 368.
- [79] FOISSNER W. Soil ciliates (Protozoa: Ciliophora) from evergreen rain forests of Australia, South America and Costa Rica: diversity and description of new species[J]. Biol Fertil Soils, 1997, 25: 317 – 339.
- [80] MAY R M. How many species are there on Earth? [J]. Science, 1988, 241: 1441 – 1449.
- [81] HODKINSON I D, HODKINSON E. Pondering the imponderable: a probability-based approach to estimating insect diversity from repeat faunal samples [J]. Ecol Entomol, 1993, 18: 91 – 92.
- [82] FINLAY B J, CORLISS J O, ESTEBAN G, et al. Biodiversity at the microbial level: the number of freeliving ciliates in the biosphere[J]. Quart Rev Biol, 1996, 71: 221 – 237.
- [83] MEISTERFELD R, TAN L W. First records of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) from Mount Buffalo National Park, Victoria: preliminary notes[J]. Victorian Naturalist, 1998, 115: 231 – 238.
- [84] FOISSNER W. Notes on the soil ciliate biota (protozoa, ciliophora) from the Shimba Hills in Kenya (Africa): diversity and description of three new genera and ten new species[J]. Biodiv Conserv, 1999, 8: 319 – 389.
- [85] FENCHEL T, ESTEBAN G F, FINLAY B J. Local versus global diversity of microorganisms: cryptic diversity of ciliated protozoa[J]. Oikos, 1997, 80: 220 – 225.
- [86] FINLAY B J, ESTEBAN G F. Freshwater protozoa: biodiversity and ecological function[J]. Biodiv Conserv, 1998, 7, 1163 – 1186.
- [87] FOISSNER W. Soil protozoa as bioindicators: pros and cons, methods, diversity, representative examples[J]. Agr Ecosyst Environ, 1999, 74: 95 – 112.
- [88] FOISSNER W. Protozoa as bioindicators in agroecosystems,

- with emphasis on farming practices, biocides, and biodiversity[J]. *Agri Ecos Environ*, 1997, 62: 93 – 103.
- [89] JJEMBA P K. The effect of chloroquine, quinacrine, and etronidazole on both soybean plants and soil microbiota[J]. *Chemosphere*, 2002, 46: 1019 – 1025.
- [90] EKELUND F. The impact of the fungicide fenpropimorph (Corbel) on the bacterivorous and fungivorous protozoa in soil [J]. *J Appl Ecol*, 1999, 36: 233 – 243.
- [91] EKELUND F, WESTERGAARD W, SØE D. The toxicity of the fungicide propiconazole to soil flagellates[J]. *Biol Fertil Soil*, 2000, 31: 70 – 77.
- [92] CAMPBELL C D, WARREN A, CAMERON C M. Direct toxicity assessment of two soils amended with sewage sludge contaminated with heavy metals using a protozoan (*Colpoda steinii*) bioassay[J]. *Chemosphere*, 1997, 34(3): 501 – 514.

Advances of the Studies on the Soil Protozoa

CHEN Su-fang, XU Run-lin

(School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the references reported, the methodologies, zoogeography, ecology and environmental biology on the soil protozoan studies have been reviewed in the paper. It shows that as an important component of biosphere, the soil protozoan plays the roles in the energy flow and material cycles on the earth, which can not subtitled by the other organisms. Meanwhile, the soil protozoan shows special zoogeographic patterns in distributions. The species composition of the soil protozoa is significant in the biodiversities on the earth. The characters of the soil protozoan in biology and ecology can be used to the practices widely.

Key words: soil protozoa; biodiversity; zoogeography; minerlization