

基于土壤生物空间异质性分析的空间土壤生态学研究

李明辉¹ 何风华¹ 申卫军² 林永标² 陈章和¹

(1 华南师范大学生命科学院 广州 510631; 2 中国科学院华南植物研究所 广州 510650)

摘要 土壤生物以不同的方式改变着土壤的物理、化学和生物学特性。了解土壤生物的空间异质性是很关键的。土壤生态学和空间生态学结合的新的研究领域—空间土壤生态学关注空间在土壤生物种群结构及动态中的重要性。本文通过对土壤生物空间异质性的分析, 内容包括空间土壤生态学的提出、土壤生物空间异质性研究的意义、研究方法, 重点综述了影响土壤生物分布格局的因素、尺度, 土壤生物空间分布对植被-土壤系统的影响, 土壤生物空间异质性的作用, 其中包括土壤生物空间异质性与多样性的关系、土壤生物对局部干扰的响应、土壤生物空间格局对植被的影响。

关键词 土壤生物; 空间异质性; 空间土壤生态学

中图分类号 S154.1

1 空间土壤生态学的提出

现在, 越来越多的研究者认识到不同的空间位置在种群、群落和生态系统过程中起到基础作用, 从而诞生了“空间生态学”(spatial ecology), 且被称为“生态学理论的最后前沿”^[1]。土壤生物是土壤生态系统的一个重要组成部分, 它能够调控生物地球化学过程的作用开始引起人们的重视^[2]。尽管有研究表明, 土壤生物在不同尺度上的分布密度是可以预测的, 但是土壤生物的空间变异仍被看作是阻碍量化土壤生物种群、了解土壤生物所影响和调控的生态学过程的“噪声”^[3], 给人们了解土壤生物种群和其参与的生态学过程增加了困难^[3]。然而随着环境污染、气候变化和集约化耕作, 给土壤造成的压力越来越大, 为揭示土壤生物在整个土壤生态系统中的结构和功能, 对土壤生物的空间异质性的研究变得尤为重要^[3]。将土壤生态学和空间生态学结合的新的研究领域—空间土壤生态学关注空间在土壤生物种群结构及动态中的重要性, 揭示土壤生物群落的结构, 认识复杂的土壤生成过程, 并应用整体与局部结合的方法, 重视与环境相结合, 把土壤作为有机-生物-无机复合体, 从动态生物化学的观点来研究土壤发生与土壤肥力有关问题, 以达到改造土壤生态系统结构和功能, 揭示不同尺度土壤-植物耦合系统中土壤生物种群间、土壤生物和土

壤环境间的关系, 为研究土壤生物的空间格局与生态学过程间的相互作用关系提供理论基础。

2 土壤生物空间异质性研究的意义

环境的空间异质性是群落中物种能够共存^[4-5]和种群持续生长^[6]的主要因素。土壤是陆地生态系统植物地上和地下生物行为的重要能量源^[7-8], 虽然在 20 世纪 80 年代初, 空间异质性已经成为土壤科学研究的重要内容, 并开始由定性描述转向定量研究, 但是自 90 年代开始才有有关土壤生物空间分布格局的研究, 并且到目前为止, 以往的这些研究很少涉及土壤生物对空间生态学的作用^[3]。众多的土壤生物是人类的生物资源, 与农林业的发展息息相关, 土壤生物在分解残体, 改变土壤理化性质, 对土壤形成、发育及土壤物质迁移、能量转化等方面都有重要的作用。可是近年来, 对于空间异质性的研究主要集中在对地上生物的空间格局的研究, 即使研究地下部, 也主要是集中在土壤物理特性如土壤水分和土壤养分的空间异质性的研究上^[9,10]。土壤生物的空间异质性, 可引起植物种的多度、丰富度、生物量、根系等的异质性分布^[11], 影响微生物的分解作用、养分供应、根系的生长和根食性生物的分布, 所以土壤生物的空间异质性影响群落组成和结构^[12-14], 从而最终影响植被空间格局^[3]; 土壤

①国家自然科学基金项目(30100021)、广东省自然科学基金项目(010551)和中国科学院鹤山丘陵定位站开放基金项目(2001193906)资助。

生物的空间异质性分布能够影响土壤生物多样性和土壤生物动态变化^[3]。测定土壤生物空间异质性有助于认识和改进与此有关的空间模型,并可以帮助人们更好地理解土壤与植物之间复杂的生态学过程及反馈机制。

3 研究土壤生物空间变异的方法

地统计学既可以用于定量地分析土壤的物理参数和状态参数如颗粒组成^[15]、团聚体大小^[16,17]、水分含量^[18]、土壤养分和土壤微量元素^[19,20]等方面的研究,也可用于确定土壤空间变异尺度,揭示土壤生物和环境之间的生态学关系^[21,22]的研究。关于地统计学方面的理论介绍和拟合模型已经有相关文献报道^[23]。现就涉及空间土壤生态学的一些参数和其在土壤生态学中的意义加以介绍。地统计学的核心是空间自相关分析,半方差函数是描述土壤空间变异的一个函数,其中变程、结构方差与总体方差之比是半方差函数的主要参数。利用半方差分析模型可以量化土壤生物空间异质性的尺度(斑块大小)和分析土壤生物在其他尺度上是否具有空间相关性。对地统计学中的变异函数进行生态学解释,可以确定空间异质性程度,探测空间异质性变化的尺度等。运用最优拟合模型,进行克力格插值,可以预测土壤生物种群在研究区的空间格局^[24-25]。

4 土壤生物空间变异的影响因素

土壤空间异质性是土壤重要的属性之一^[26,27]。土壤生物具有不同尺度的时空异质性^[28]。影响土壤生物空间分布格局的主要原因是环境因素和土壤生物种群之间的相互作用。土壤母质、土壤种类和土壤质地等较大尺度的变化,决定大范围的土壤生物的空间格局。土壤生物数量,斑块的大小、形状及空间分布等具有显著的差异,这种土壤生物的空间分布特征与土壤在不同空间位置上的各种物理、化学和生物过程有着重要的联系。

4.1 外部环境对土壤生物空间格局的影响

尺度问题很复杂,然而它们处于生态学的中心地位。在小尺度或景观尺度上土壤水分和养分浓度的空间格局影响蚂蚁或白蚁的行为,这些又影响土壤水的下渗和凋落物的分解速率^[29,30]。在更广的区域尺度上,不同的沉积格局(由几公顷到集水区尺度)的形成主要是由地质和水文过程主导。土壤空间变异几乎可以存在于任何水平上,包括地区之间、

田块之间乃至地块内部甚至在几毫米的空间距离上。在田块尺度上土壤生物的空间相关性尺度可以从十几米到几十米,这同土壤生物类型、所研究的系统和取样距离有关。随着受植物影响的减少,土壤生物的聚集斑块大小相应减小。例如, Saetre^[31]发现土壤微生物在欧洲云杉(*Picea abies-birch*)和欧洲桦(*Betula pubescens*)混交林中的变程为 1~3 m。Cavigelli 等^[32]的发现与之相反,他们发现其在农用地中分布的变程为 5 cm,这可能反映了不同植物种是导致不同生态系统中土壤生物分布格局不同的关键因素。

4.1.1 土壤生物空间变异在农田系统的发生 作物残茬的数量和空间分布显著影响土壤生物的空间变异。如硝化细菌和反硝化细菌,均受耕作方式的影响,并随土层深度而异。土壤耕作不仅影响土壤物理与化学性质,也影响土壤微生物种群的变化进而影响作物生长^[33]。在畦栽作物中土壤呼吸和植物寄生线虫的变程大小反映种植的畦间距的大小^[34]。Webster 和 Boag^[24]的研究结果表明农田线虫的分布格局受耕作方式的影响,它们从有人类引起污染的集中地向外迁移。Robertson 和 Gross^[33]发现,即使耕作方式多年不变且种植品种单一的条件下,也是农林复合系统中线虫聚集强度较大,空间相关尺度为 6~80 m。

4.1.2 土壤生物空间变异在森林生态系统的发生 在森林生态系统中,即使地形和土壤质地都相似,土壤生物仍然呈现斑块状聚集格局,其聚集尺度从几厘米到几米。而土壤生物在此尺度上格局基本上是由植物生长状况、植物类型和生长空间所决定^[35,36]。在混交林中由于树种不同、凋落物性质不同从而导致土壤生物空间分布的不同,并且树种是决定土壤生物分布、所驱动的生态学过程的关键因素。植物残茬的遗留作用会对土壤生物和其空间分布格局产生长效的影响。有些土壤生物如地下鼠和蚂蚁^[37,38]等的挖掘行为和植物的共同作用影响土壤生物的空间分布格局。

4.1.3 土壤生物空间变异在其他生态系统的发生 农林复合生态系统中土壤微生物量和弹尾目小型土壤动物发生空间相关的尺度是 200 m,这反映了土壤碳的梯度分布和耕作方式对土壤生物空间分布格局的影响^[39]。Crist^[40]发现草原白蚁空间相关的尺度超过 330 m,地形和植被缀块性是影响白蚁的这种空间格局的主要因素。Ettema 等^[41]研究表明湿

地食菌线虫空间相关的尺度为 67 m，它与土壤母质的梯度分布有关，并且这种相关性随时间的变化而变化。Mitchell 等^[42]发现，在苔藓类 (*Sphagnum*) 植物覆盖的土壤上，变形虫的聚集斑块的大小为 1~10 cm (取样样方大小为 40 cm × 60 cm)，这一结果部分反映几毫米的微地形差异。小尺度的土壤生物的空间分布与底土层特性相关。例如 Wachinger^[43]借助计算机辅助断层照相系统 (computer-assisted tomography) 的研究表明小尺度上产甲烷细菌的分布同植物凋落物的分布有显著的相关性。

4.2 土壤生物种群内生态学过程对土壤生物空间变异的影响

除环境因子对土壤生物空间格局的影响外，自身种群生态学过程亦对其空间格局产生影响，如扩散、繁殖和竞争等。尽管对于土壤生物来说，这些生态学过程发生的尺度较小，但是一些土壤生物如蚯蚓，它们的空间分布格局主要是其内在种群生态过程的结果。例如一农场的蚯蚓的聚集斑块大小为 10~30 m，而在幼龄时的聚集斑块要小于成龄时的聚集斑块，这反映了虫卵分布的聚集性和成龄蚯蚓的迁移行为。并且土壤生物的空间格局是呈现动态变化的，它的分布格局对整个生态系统生态学功能的影响要大于土壤非生物资源的影响^[44]。

5 土壤生物空间异质性的作用

5.1 土壤生物空间异质性与多样性的关系

土壤生物多样性是全球生物多样性的重要组成部分。可是近年来，生物多样性的研究通常多集中在地上动植物方面，土壤生物多样性是一个被忽视的领域。由于土壤生物群落的物种丰富度极高并且其中存在许多特殊的物种和种群（或者根本一无所知），所以人类对土壤生物多样性的研究受到阻滞^[45,46]。同时，目前对地球上土壤生物资源尚缺乏系统的基础调查资料，缺乏不同土地利用方式下土壤的生物区系组成、种类、数量、分布等基础性研究工作，这是当前土壤生物多样性研究急需解决的问题。英国实施“土壤生物多样性计划”的目标是获得对土壤生物多样性和关键生态学过程中土壤生物功能作用的理解，这反映了土壤生物多样性和一些关键的生态学过程的关系是研究的热点和难点。分析和解决此问题的关键之一是考虑土壤环境的空间异质性和土壤生物种群的空间变异性，它们能够深刻地影响土壤生物种间的相互作用和在不同途径的

共存。

大多数土壤资源的空间异质性导致了微生境的多样性，而微生境多样性影响土壤生物的多样性。土壤资源斑块间分隔距离减少了土壤生物对资源的竞争压力，改善了土壤生物之间的共存关系，例如有研究表明土壤中节肢动物的丰富度随着微生境多样性（凋落物斑块镶嵌分布）的增加而增加^[47]。

5.2 土壤生物对局部干扰的响应

土壤生物种群内的异质性分布格局与土壤环境的异质性一起形成了土壤生物群落空间格局的复杂性。干扰能够改变土壤生物群落的空间格局。如 Ettema 等^[41]分析描述土壤线虫的扩散行为、土壤环境的缀块性分布格局和外源干扰事件后，提出这些因素是导致线虫复杂的时空分布格局的主要原因，并指出随机干扰是维持线虫分布景观尺度多样性的主要原因。有生物种共生斑块动态模型描述：随机干扰影响了“干扰斑块”中土壤生物的竞争，形成了“空的”斑块 (empty patches)，这些“干扰斑块”由具有不同竞争和扩散能力的物种所占据。除了竞争和扩散外，土壤生物的休眠在决定土壤生物是否能在小尺度干扰中存活也是很重要的。例如，Felske 和 Akkermans^[48]研究表明生活在草地上的细菌群落中的大部分处于休眠状态，特别细菌物种（用 16S rRNA 测得）的代谢活动的空间变异要比这些种的丰富度（用 16S rDNA 测得）的空间变异大。为进一步估计和评价土壤种群缀块动态的重要性，需要研究物种水平的时空格局分布，如土壤生物的竞争、扩散和休眠对策。

5.3 土壤生物空间格局对植被的影响

土壤生物的空间变异性影响植物根系的生长，从而影响植物的生长，它们之间这种植物-土壤反馈作用调节着植物种群的空间分布格局。研究这些因子的空间异质性，对深入了解树木根系的结构，变异规律和生长具有十分重要的意义。越来越多的研究关注陆地生态系统中地上部和地下部生物之间的反馈效应，认为它们是陆地生态系统最主要的驱动力^[49]。土壤生物的空间分布格局及其生物活动对植物种群结构和植株个体生长产生重要的影响^[34]。很多动物区系能够改变土壤的物理和化学性质，形成不同于周围环境的小生境，从而成为植物种群分布格局和动态的重要影响因子。地下鼠通过挖掘及将土壤推至地表形成土丘^[50]；蚯蚓掘土，改善土壤通气性能，增强微生物活性；微生物分解枯枝落叶，

创造有利于节肢动物取食的生境；节肢动物破碎枯枝落叶，促进微生物及其酶的作用，释放养分^[51]。土壤生物的空间分布格局在决定植物群落动态和空间格局时是很重要的，如澳大利亚东部的白蚁^[52]、荷兰的蚂蚁^[38]和加利福尼亚草地的衣囊鼠^[53]是呈现聚集格局的，在它们的聚集区其植被的分布同其周围景观明显不同，而这些土壤生物的空间分布在决定植物种群的空间格局和动态中起到重要作用。

土壤生物空间分布与植物根系共同作用影响不同植物种在群落中的空间格局分布。如有些植物种能够促进致病真菌的发生，从而导致其自身在整个群落中的减少。植被和土壤之间的反馈作用会影响植被的空间分布格局。例如有研究表明美国印地安那州的黑莓 (*Prunus serotina*) 幼苗在林下死亡率较高，然而在距离 25 ~ 30 m 的土壤中这种情况就不会发生^[54]，这主要是由于致病真菌 (*Pythium* spp.) 在林下的聚集作用所致。土壤中根食性生物对植物格局的影响主要是通过它们对不同植物种的取食作用来实现的^[55]。Olf^[55] 提出在荷兰莎草 (*Carex arenaria*) 草地上，由于兔子和蚂蚁的干扰，致病土壤线虫的空间分布受到影响，从而导致紫羊茅 (*Festuca rubra*) 为优势种。由于菌根对植物的作用也会影响植物群落的空间格局^[56, 57]。

不同的植物种的分解者不同，它们之间反馈作用关系不同^[49]。不同植物种在空间上的分隔会影响土壤养分供应格局，这又会反过来影响每个植物种占据自身的生存斑块，维持植物种群在群落中的多样性格局。在欧洲云杉和欧洲桦的混交林中，土壤微生物的聚集格局与地上植被空间格局明显具有关联性^[58]。

在较小空间尺度上，有机质的空间分布和土壤生物的分解作用影响植物对土壤养分的吸收和利用。有研究表明：呈斑块状镶嵌排列的凋落物的矿化率要比与土壤混合的缺少土壤生物的凋落物的矿化率高。这些斑块的土壤的营养成分显著高于其他斑块，能够很快被杂草类或一年生植物所占据，这主要是因为这些植物的根能够快速占据这些斑块，而且它们生长快，成为这些斑块中的优势种^[59]。最近的实验集中在是否随着资源斑块大小的增加而影响植物的生长，已有实验表明随着斑块面积的增加，植物的生长呈现出从中性到正影响然后为负的趋势，这些结果的不同是由于植物种和实验条件的不同所引起的。植物和微生物对养分的竞争在植物获

得养分中是很重要的决定因素，这可以通过有机质斑块的分隔看出。

6 结语

尽管学者们认为土壤生物的空间变异性是随机“干扰体”，但是对土壤生物空间分布的异质性进行分析能够更加清楚地了解引起其异质性分布的原因。环境因子的空间等级尺度、内在的种群过程和随机干扰都是影响土壤生物种群的斑块性和生态系统过程的因素。分析这些特征对于我们量化和了解影响土壤生物的不同时空尺度下的空间分布是非常重要的。

干扰是一种非常重要的生态过程，是土壤生物异质性分布的影响因素之一，它能够改变土壤生物的格局分布。通过研究干扰对土壤生物的作用及其反应和对土壤生物分布格局的影响，可揭示干扰在空间中的传播，生物对干扰的抗性阈限等生态学问题。

借助空间分析方法能够更好地了解引起土壤生物极端多样性的因素，从而为维持土壤生物多样性提供参考。这些工作的进行都需要进一步开展土壤生物小尺度分类学的研究。

土壤生物是生物地球化学循环（生物小循环）的驱动者。如果不从研究土壤生物入手，就不可能理解土壤生物地球化学过程，也就不可能理解土壤生物在小尺度上调控微量气体代谢和植物生长格局的过程。基于对土壤生物空间变异性的研究，基于小尺度的微观实验，模拟土壤生物空间格局对大气环境及全球气候变化的生态学影响，可为进一步反映大尺度（全球）的环境问题提供理论依据。

土壤生物的空间变异性对植物生长及其适应性有重要且复杂的影响。在研究土壤生物空间变异性对植物的生态学作用时，不仅要估计和分析异质性对生物量积累的空间效应，还要探测空间异质性与植物的适应性、以及空间异质性在种群乃至群落水平动态中潜在的生态学功能。

把 GIS 技术运用到土壤生物的空间格局分析上，结合地统计学方法也是研究土壤生物在大尺度上分布格局的一个很重要的方面。运用 GIS 技术对土壤生物的空间分布格局和地上植被空间格局的斑块镶嵌性结果做出生态学解释，在此基础上探讨生态学过程与空间格局之间的相互关系问题，在生态学中是很重要的。

参考文献

- 1 张爱兵, 谭声江, 陈建, 李典谟. 空间分子生态学—分子生态学与空间生态学相结合的新领域. 生态学报, 2002, 22 (5): 752 ~ 769
- 2 Chen GC, He ZL, Wang YJ. Impact of pH on microbial biomass carbon and microbial biomass phosphorus in red soils. *Pedosphere*, 2004, 14 (1): 9 ~ 15
- 3 Christien HE, David AW. Spatial soil ecology. *Trends Ecol. & Evol.*, 2002, 17 (4): 177 ~ 183
- 4 张宏, 史培军, 郑秋红. 半干旱地区天然草地灌丛化与土壤异质性关系研究进展. 植物生态学报, 2001, 25 (3): 366 ~ 370
- 5 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. 生态学报, 2000, 20 (6): 945 ~ 950
- 6 Ellner SP. Habitat structure and population persistence in an experimental community. *Nature*, 2001, 412: 538 ~ 543
- 7 Yang YS, Chen GS, Yu XT. Soil fertility in agroforestry system of Chinese fir and villous amomum in subtropical China. *Pedosphere*, 2001, 11 (4): 341 ~ 348
- 8 李德成, 李忠佩, 张桃林, Bruce Velde. 白蚁活动与土壤环境之间的相互作用. 土壤, 2003, 35 (2): 98 ~ 102
- 9 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 陈利顶. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异研究. 应用生态学报, 2000, 11 (4): 557 ~ 563
- 10 胡克林, 李保国, 林启美, 李贵桐, 陈德立. 农田土壤养分的空间变异性特征. 农业工程学报, 1999, 15 (3): 33 ~ 38
- 11 俞慎, 何振立, 陈国潮, 黄昌勇. 不同树龄茶树根层土壤化学特性及其对微生物区系和数量的影响. 土壤学报, 2003, 40 (3): 433 ~ 439
- 12 Vivian-smith G. Microtopographic heterogeneity and floristic diversity in experimental wetland communities. *J. Ecol.* 1997, 85: 71 ~ 81
- 13 吴建峰, 林先贵. 土壤微生物在促进植物生长方面的作用. 土壤, 2003, 35 (1): 18 ~ 21
- 14 Burke IC, Lauenroth WK, Riggall R, Brannen P, Madigan B, Beard S. Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe: the relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns. *Ecosystems*, 1999, 2: 422 ~ 438
- 15 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣. 土壤空间变异性初步研究. 水利学报, 1985, 9: 10 ~ 21
- 16 吕军, 俞劲炎. 水稻土物理性质空间变异性研究. 土壤学报, 1990, 27 (1): 8 ~ 16
- 17 梁春祥, 姚贤良. 华中丘陵红壤物理性质空间变异性的研究. 土壤学报, 1993, 30: 69 ~ 77
- 18 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. 土壤学报, 1998, 35 (1): 10 ~ 15
- 19 卢剑波, 杨京平. 黄泥岭红壤小流域土壤的空间异质性与格局研究. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2002, 28 (1): 83 ~ 88
- 20 姜勇, 张玉革, 梁文举, 闻大中. 沈阳市郊耕地土壤交换性锰含量的空间变异性. 土壤, 2004, 36 (1): 61 ~ 64
- 21 Isaaks EH, Srivastava MR. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York, USA: Oxford University Press, 1989, 561
- 22 Rossi RE, Mulla DJ, Journel AG, Franz RH, Franz EH. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol. Monogr.*, 1992, 62: 277 ~ 314
- 23 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999, 177 ~ 192
- 24 Webster R, Boag B. Geostatistical analysis of cyst nematodes in soil. *J. Soil Sci.*, 1992, 43: 583 ~ 595
- 25 Klironomos JN. Designing belowground field experiments with the help of semi-variance and power analyses. *Appl. Soil Ecol.*, 1999, 12: 227 ~ 238
- 26 周慧珍, 龚子同, Lamp J. 土壤空间变异性研究. 土壤学报, 1996, 33 (3): 222 ~ 241
- 27 王学锋, 章衡. 土壤有机质的空间变异性. 土壤, 1995, 27 (2): 85 ~ 89
- 28 Huggett RJ. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: A critical review. *Catena*, 1998, 32: 155 ~ 172
- 29 Jones JA. Termites, soil fertility and carbon cycling in dry tropical Africa: A hypothesis. *J. Trop. Ecol.*, 1990, 6: 291 ~ 305
- 30 Eldridge DJ. Effects of ants on sandy soils in semi-arid eastern Australia: Local distribution of nest entrances and their effect on infiltration of water. *Aust. J. Soil Res.*, 1993, 31: 509 ~ 518
- 31 Saetre P. Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed spruce-birch stand. *Ecography*, 1999, 22, 183 ~ 192
- 32 Cavigelli MA, Robertson GP, Klug MJ. Fatty acid methyl

- ester (FAME) profiles as measures of soil microbial community structure. *Plant Soil*, 1995, 170: 99 ~ 113
- 33 Robertson GP, Gross KL. Assessing the heterogeneity of belowground resources: quantifying pattern and scale. In: Caldwell MM, Pearcy RW. eds. *Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants: Ecophysiological Processes Above and Belowground*. Academic Press, 1994, 237 ~ 253
- 34 Stoyan H, De-Polli H, Böhms, Robertson GP, Paul EA. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant Soil*, 2000, 222: 203 ~ 214
- 35 薛立, 邱立刚, 陈红跃, 谭绍满. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. *土壤学报*, 2003, 40 (2): 280 ~ 285
- 36 Saetre P, Baath E. Spatial variation and patterns of soil microbial community structure in a mixed spruce-birch stand. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 909 ~ 917
- 37 Ayarbe JP, Kieft TL. Mammal mounds stimulate microbial activity in a semiarid shrubland. *Ecology*, 2000, 81: 1150 ~ 1154
- 38 Blomqvist MM. Interactions between above-and below-ground biota: importance for small-scale vegetation mosaics in a grassland ecosystem. *Oikos*, 2000, 90: 581 ~ 598
- 39 Fromm H, Winter K, Filser J, Hantschel R, Beese F. The influence of soil type and cultivation system on the spatial distributions of the soil fauna and microorganisms and their interactions. *Geoderma*, 1993, 60: 109 ~ 118
- 40 Crist TO. The spatial distribution of termites in shortgrass steppe- a geostatistical approach. *Oecologia*, 1998, 114: 4710 ~ 416
- 41 Ettema CH, Rathbun SL, Coleman DC. On spatiotemporal patchiness and the coexistence of five species of *Chronogaster* (Nematoda: *Chronogasteridae*) in a riparian wetland. *Oecologia*, 2000, 125: 444 ~ 452
- 42 Mitchell EAD, Borcard D, Buttler AJ, Grosvernier Ph, Gilbert D, Gobat JM. Horizontal distribution patterns of *testate amoebae* (Protozoa) in a Sphagnum magellanicum carpet. *Microb. Ecol.*, 2000, 39: 290 ~ 300
- 43 Wachinger G. Variability of soil methane production on the micro-scale: spatial association with hot spots of organic material and Archaeal populations. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 1121 ~ 1130
- 44 Rossi JP. Relationship between spatial pattern of the endogeic earthworm *Polypheretima elongata* and soil heterogeneity. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, 29: 485 ~ 488
- 45 Anderson JM. The enigma of soil animal species diversity. In: Vanek J. ed. *Progress in Soil Zoology*. Junk Publishers, 1975, 51 ~ 58
- 46 Ekschmitt K, Griffiths BS. Soil biodiversity and its implications for ecosystem functioning in a heterogeneous and variable environment. *Appl. Soil Ecol.*, 1998, 10: 201 ~ 215
- 47 Hansen R, Coleman DC. Litter complexity and composition are determinants of the diversity and composition of *oribatid mites* (Acari: *Oribatida*) in litterbags. *Appl. Soil Ecol.*, 1998, 9: 17 ~ 23
- 48 Felske A, Akkermans ADL. Spatial homogeneity of abundant bacterial 16S RNA molecules in grassland soils. *Microb. Ecol.*, 1998, 36: 31 ~ 36
- 49 Wardle DA. *Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components*. Princeton University Press, 2002
- 50 Hobbs RJ, Gulmon SL, Hobbs VJ, Gulmon SL, Hobbs VJ, Mooney HA. Effects of fertilizer addition and subsequent gopher disturbance on a serpentine annual grassland community. *Oecologia*, 1988, 72: 178 ~ 184
- 51 Waid JS. Does soil biodiversity depend upon metabiotic activity and influences? *Appl. Soil Ecol.*, 1999, 13: 151 ~ 158
- 52 Spain AV, McIvor RJ. The nature of herbaceous vegetation associated with termitaria in north-eastern. Australia. *J. Ecol.*, 1988, 76: 181 ~ 191
- 53 Hobbs RJ, Mooney HA. Community and population dynamics of serpentine grassland annuals in relation to gopher disturbance. *Oecologia*, 1985, 67: 342 ~ 351
- 54 Packer A, Clay K. Soil pathogens and spatial patterns of seedling mortality in a temperate tree. *Nature*, 2000, 404: 278 ~ 281
- 55 Olf H. Small-scale shifting mosaics of two dominant grassland species: The possible role of soil-borne pathogens. *Oecologia*, 2000, 125: 45 ~ 54
- 56 Van der Heijden, Marcel GA, Thomas B. Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. *Ecology*, 1998, 79: 2082 ~ 2091

- 57 Hartnett DC, Wilson GWT. Mycorrhizae influence plant community structure and diversity in tall-grass prairie. *Ecology*, 1999, 80: 1187 ~ 1195
- 58 Saetre P. Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed spruce-birch stand. *Ecography*, 1999, 22: 183 ~ 192

STUDY ON SPATIAL SOIL ECOLOGY BASED ON SPATIAL HETEROGENEITY ANALYSIS OF SOIL ORGANISMS

LI Ming-Hui¹ HE Feng-Hua¹ SHEN Wei-Jun² LIN Yong-Biao² CHEN Zhang-he¹

(1 *College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631;*

2 *South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650*)

Abstract The composition and structure of biotic communities in soil at one hierarchical level can influence the spatial heterogeneity of the biota at other hierarchical levels. Furthermore, there is increasing evidence that spatial soil ecology can yield new insights with regard to understanding the factors that maintain and regulate soil biodiversity, as well as how the spatial distributions of soil organisms influence both plant growth and plant community structure. In this paper, the role of soil biota in the soil ecosystem in processes was assessed, and the relationship between soil organisms spatial heterogeneity and ecosystem function was presented.

Key words Soil organism, Spatial heterogeneity, Spatial soil ecology