

土壤多样性研究趋势与未来挑战*

任圆圆 张学雷[†]

(郑州大学水利与环境学院, 自然资源与生态环境研究所, 郑州 450001)

摘要 根据 2013 年美国 CRC 出版的新著《土壤多样性 (Pedodiversity)》的主要章节, 结合文献综述了国际间土壤多样性研究的进展与现状, 着重分析总结了土壤多样性的研究模式。首先, 介绍了土壤多样性概念的提出和多样性的含义; 然后, 阐述土壤多样性分析的目的和方法论, 涉及到多样性与土壤分类制、尺度与抽样强度等基本原则; 进而, 着重分析了当前土壤多样性研究的主要模式, 包括威利斯曲线、土壤多样性与生物多样性、丰富度分布模型、多样性—面积的关系、多样性—时间的关系、多样性嵌套结构、多样性与土壤形成过程、多样性与景观变迁等; 最后, 指出由于城市的无序扩张和人口密集的工业区基础设施的建设等驱动力影响, 使得土壤多样性遭到破坏, 人类应该更多关注、加强对土壤圈和土壤多样性的保护。

关键词 土壤多样性; 方法论; 研究模式; 保护

中图分类号 S154

文献标识码 A

在土壤科学发展的历史进程中, 相对于土壤的生态环境意义来讲, 人们往往更多关注土壤的生产性能, 这在一定程度上阻碍了对土壤的深入调查和对土壤在一些重要的生态环境过程中作用的了解。如今, 这一认识正在发生变化, 即从简单的农事关注点到认知土壤圈对气候或生物地理圈层系统非常重要, 强调保护好土壤表层对生物圈的保护而言至关重要。从过去六十年所保存的生物学著作和文献可知, 生物多样性研究的作用已经被公认为是生态学领域的主要课题之一。第一个在一定区域内尝试分析和量化土壤多样性的土壤学家是俄罗斯人 Fridland^[1], 但并未被世人重视。在 20 世纪 90 年代初期, Ibáñez 等^[2-3]运用由生态学家发展而来的数学工具去研究土壤多样性并建立了一个全新的术语“pedodiversity”, 随后陆续发表了一些解释分析土壤多样性主要测度方法的文章, 从此真正开启了土壤多样性理论方法的探索。

土壤多样性的分析需要运用土壤和生态环境专业领域的信息或数字化调查基础数据, 但是从全球来看, 很多国家仍缺失有效的、标准化的、可更新的土壤信息数据库。很多发展中国家甚至还没有最基础的土壤调查, 绘图和详细记录也还未开始进行, 这些均阻碍了土壤多样性的计量研究。可喜的是, 自土壤多样性研究开始至今, 在国际间已经取得了显著的进展。2013 年 4 月, 由美国 CRC 出版的专著《土壤多样性 (Pedodiversity)》^[4], 邀请当今世界上代表性国家的有关学者, 在介绍有关土壤多样性研究进展的基础上, 对这一新兴学科的发展与应用前景进行了展望。书中, 西班牙 Juan José Ibáñez、Javier Caniego 和 Asunción Saldaña 分别就土壤多样性的研究现状和未来挑战、土壤多样性和生物多样性的分形分析和土壤多样性与景观生态学等内容进行了论述; 意大利 Enrico Feol、Carmelo Dazzi 关于环境系统中多样性的测度和人为景观变化对土壤多样性的响应和土壤遗产保护的研究; 美国 Jonathan

* 国家自然科学基金项目 (41171177) 资助

[†] 通讯作者, E-mail: zxlzsu@zzu.edu.cn

作者简介: 任圆圆 (1987-), 女, 河南省襄城县人, 博士研究生, 主要从事水土资源多样性的研究。

E-mail: ayuan6710@163.com

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-07-12

Phillips、James Bockheim 关于非线性变化及趋异进化 (Divergent Evolution) 与土壤多样性、土壤地方性及其对系统土壤多样性的重要性的研究; 伊朗 Norair Toomanian 对土壤多样性与地形的研究; 中国张学雷也介绍了我国土壤多样性的主要研究进展及其未来的机遇与挑战。本文根据《土壤多样性 (Pedodiversity)》的主要章节, 结合文献着重介绍了国际间土壤多样性研究的现状与进展以及未来挑战。土壤多样性的研究于 20 世纪 90 年代初在西班牙兴起之后, 很快被引入到中国并一直在进行之中^[5-9], 涉及到的研究内容包括城市化过程对土壤多样性的影响^[10]、土壤分类系统和生物分类系统多样性对比^[11]、土壤与水体多样性的对比研究^[12-13]、土壤与土地利用多样性关联分析^[14-15]等。

1 土壤多样性概念的提出

“多样”的概念似乎清晰而直观, 也常见某些类似的表达术语, 例如: 多种多样、异质性、变异性、复杂性等。在科学的层面上, 这些同义词的使用会引起一些混乱和模糊。来自不同学科的专家已经认同, 我们人类周围多样性的概念及普遍性涉及到生物体、岩石、地形或土壤等自然要素。随着空间范围或区域的增大多样性会随之增加这一情况可能追溯到几个世纪以前, 关于自然资源的第一手调查数据资料和其多样性特点, 或许会追溯到史前时代。

对多样性概念的探索应该从实用性角度出发, 生物多样性、土壤多样性等的含义应该如何被定义? 又应该如何测量? 进行这些研究与探索的目的和意义是什么? 现在来看, 起码涉及到以下领域, 即生物多样性和保护生物遗产、地质多样性和保护地质遗产、过去环境存储的记忆、气候变化的驱动力、文化多样性 (远古的和传统的可持续土地利用) 以及用于土壤监测和质量评价的基准土壤。

关于土壤多样性, 目前查到的世界上第一个提出土壤多样性概念雏形的是俄国土壤学家 Fridland^[1], 尽管没有得到其本人后续的深入研究报道。以信息理论为基础的多样性指数出于各种各样的研究目的已在很多学科中得到应用, 同样的情况也出现在土壤学中。Minasny 等^[16]提及早期 Jacuchno^[17]利用仙农熵和均匀性来分别评估俄国和斯洛伐克的土壤覆盖层的异质性, 但是这些研究的对象是农业耕种方式下大范围同类型的土地而不是当前见到的土壤多样性的机理性研究。这些科学家并未直接进行多样性研究, 因此是否应该将他们看作是土壤多样性研究的先驱者存在争议。同样地, Beckett 和 Bic^[18]在对土壤调查图进行分析时发现, 在澳大利亚土壤类型和土系的数量取决于调查区域的规模, 他们使用重对数坐标系证明土壤类别和面积 (soil type vs area) 之间的关系遵循幂指数。可见, 他们研究的目的是土壤多样性本身, 而是着眼于对土壤调查程序和标准的重申。因此, 这些作者是否应该划为土壤多样性研究的建立者和先驱者也存在争议。

在俄罗斯土壤学家 Fridland 开始探索土壤多样性概念之后, Ibáñez 等^[2]引入数学方法 (丰富度、仙农多样性指数、仙农均匀度) 来研究空间土壤分布格局的生态多样性。1992 年里约峰会之后, 以及后来由 Wilson 和 Peter^[19]提议建立的新词汇 “生物多样性 (biodiversity)” 在公众舆论形成影响后, 澳大利亚土壤学家 McBratney^[20]建议使用新词 “pedodiversity”, 另一位澳大利亚地质学家 Sharples^[21]提出了 “地多样性 (geodiversity)” 的概念。

2 什么是多样性?

文献中关于生物多样性的定义很多, 其中代表性的有 Huston^[22]。

“多样性的概念有两个基本的组分和两个不可避免的价值判断。其中，两个基本的组分是任何不同物体混合物具有的最常见的统计属性，不管是不同颜色的团状物体，还是由不同蛋白质编码组成的 DNA 组分，或者是其他物种、或更高的分类级别或土壤类型、或某个景观的生境斑块。每一个物体的组群中均有两个基本的属性：(1) 存在一定数目的不同类型客体事物的混合体或者样本（例如物种，土壤类型）；(2) 每一个不同类型的客体事物存在相对数量、总量。价值判断标准是：(1) 所选择的等级是否足够的不同使得能被认定为属于不同类型的物体；(2) 物体的某一个特定的等级是否足够的相似使得可以被认定为是同一类型。所有这些都影响着生物多样性的量化与界定。”

多样性在概念上应包括物种的多样性（丰富度）、某个体在这些物种中的分布方式（均匀性或均一度）。多样性指数要么是尝试将它包含的两个多样性组成成分趋向于一个值，要么是忽视其中一个成分。从方法论的角度来看，多样性分析最常见的方法划分为两类^[23]：

(1) 丰富度指数：一个地区不同物体的数量（指在一个特定的样区内生物物种或土壤类型的数量）；

(2) 丰富度模型：描述被观察事物丰富度模式最接近的分布模型（如等比级数、对数分布、对数正态分布、断（鲁）棒模型等）。

同时，一些研究者认为类别的不同其实是表现在“相似-不相似”的程度上，并建议这样的分类距离也应该考虑进来^[24]。

土壤多样性研究最常见的指数是丰富度指数（ S ）、仙农熵多样性指数（ $SHDI$ ）、仙农熵均匀度指数（ $SHEI$ ）。 S 是不同土壤类型的数量，与土壤特定的分类系统的数量相一致（如土壤亚类）。 $SHDI$ 和 $SHEI$ 计算如下：

$$SHDI = -\sum_{i=1}^n p_i \times \ln p_i \quad (1)$$

$$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^n p_i \times \ln p_i}{\ln n} \quad (2)$$

式中， $SHDI$ 为仙农熵多样性指数， p_i 表示第 i 个土壤类别在所有土壤类别总面积中所占的比例， n 表示土壤类别个数。 $SHDI > 0$ 表示没有限制， $SHDI$ 等于 0 时表示土壤类别仅有一种（此时没有多样性）。 $SHEI$ 为均匀度指数， $SHEI$ 值的范围为 0~1，当只有一个类别时取 0，亦就是没有多样性，它们的分布也是不均匀的（某一个或者是少数等级对象占主导地位）；当地区内所有类别面积均匀分布时产生最大的均匀度，值为 1（丰富度比例是一样的）。

3 土壤多样性分析的目的

土壤多样性方法能够用以不同的目的，主要包括：

- (1) 土壤生态集合体的多样性模式（土壤景观、区域土壤等）；
- (2) 土壤基因多样性（指定区域内土壤层的基因多样性）；
- (3) 随着样区的增加土壤丰富度和土壤多样性也会随之增加（土壤多样性—面积关系）；
- (4) 土壤丰富度和土壤多样性的增加和减少会随着年代序列发生改变，如某一特定的群岛，或某海洋阶地中不同年代的岛屿（多样性—时间关系）；
- (5) 土壤集聚群体的其他规律，如它们之间潜在的嵌套模式，物种范围规模分布（species-range size distribution），尺度的非变异性或尺度与土壤景观格局的关联依赖性等；
- (6) 用于设计土壤保护区网络的规模；
- (7) 不同自然资源在空间和时间上的多样性模式（如土壤，岩石，地形和生物多样性等）；

- (8)土壤地理学中定量化的数学表达(如地方特有土壤的量化、稀有土壤等);
- (9)土壤的性质和土壤类型集合体的调控(如是否有耗散结构特征、非线性或复杂的系统);
- (10)运用土壤系统分类对景观生态环境中土壤性质变异性的空间再造。

以上各点之间有一些是有关联的,如果将他们交叉在一起可能会有新的创新点出现,如多数的土壤发生学研究主要关注随着时间推移土壤的成土过程,但从空间分异角度研究成土作用则较少(例如近期才开始的运用数字制图工具来研究土壤景观)。

4 土壤多样性的方法论

4.1 分类制与多样性

从多样性的概念可以看出,在一个样区内只要能确定分级或分类就可以进行多样性的分析。近些年以来,有一些土壤学家不再考虑使用土壤科学中的传统分类法,而是使用间接的方法进行估算并取得好的结果,如数值模拟方法。Phillips 和 Marion^[25]以及 Petersen 等^[26]对两种方法进行了尝试并指出将传统的和数值模拟的分类方法进行比较发现只存在较小的差别。同样地,McBratney 和 Minasny^[24]认为在多样性指数中整合分类距离(在土壤等级之间分类的不同)提高了土壤多样性的测度水平。但是,Toomanian 和 Esfandiarpour^[27]的研究也证明只有少数情况下两者会有微小的差别。

出于实用性目的,运用诸如数值模拟的分类方法或许是明智的选择,但如果对土壤多样性研究比较感兴趣且能够在全世界范围内进行合作交流的话,还是尽量使用认知度广泛的分类方法^[28]。实际上,只有属于同一个分类系统群体的客观物体可以被计量和比较,或者研究区域中某空间范围内的每一个土壤类别均可以得到分析^[23]。目前,美国农业部(USDA)的分类方法^[29]已经被世界范围内的土壤学家所应用,同时国际土壤科学联合会(IUSS)也认为世界土壤资源参比基础(WRB)是世界性的分类体系,所以国际间土壤多样性研究应尽量使用这两个土壤分类系统。

也有人认为以上两种分类系统可以均不采用,也能进行土壤多样性指标的计算。Petersen 等^[26]从常见土壤属性的 n 维空间开始计算,估量了变量空间,认为“结果的价值不在于用分类学和参数的方法来计算土壤的数量,而是 n 维的超容积对所有观察都能包含”。显然,这样做有新意,但却容易回到使用一些同义词诸如丰富度、多样性、变化性、异质性、可变性、复杂性等概念的纠结之中。因此,这就需要有一个一致的意见或者至少是澄清一个术语来避免混淆和促进相互之间的比较分析。在文献中,多样性超越丰富度,但也考虑到相对丰富度。同样地,考虑类别间相互关系导致了复杂性概念的产生,Saldarña 和 Ibáñez^[30]认为土壤多样性文献中连接性与复杂性的概念与过去几十年生态学著作中的研究具有相似性。

近来,在土壤多样性指标使用的讨论中,一些土壤学家认为分类学距离的使用应该被鼓励,并与土壤类型丰富度和每一种土壤类型各自的数量进行关联分析^[24, 26-27],尤其是通过运用 Rao 二次熵指数 Q 来实现。但是,Ricotta^[31]总结了生物多样性指标的研究现状后指出,它至少违背了两个通常没有争议的原理^[32]:(1)给定物种数量 n ,最大的多样性出现了等概率物种分布;(2)置换不变性。其中,最后一个原理假设多样性的值与相对丰富度 $p_1, p_2 \dots p_n$ 相一致,对于他们的变换值 $p_1', p_2' \dots p_n'$ 是完全相同的。因此,Rao 二次熵指数 Q 似乎不是一个科学的、合理的解决方案^[31]。鉴于此,将分类距离方法加入到多样性计量研究中得到一个新的算法是否更加可取还有待商榷^[33]。

4.2 多样性、系统分类、尺度和抽样强度

在讨论当今国际间土壤多样性主要研究进展时,一些问题和顾虑也应该考虑到。正如生物多样性的研究^[31],土壤丰富度和土壤多样性的值取决于:(1)分类方法;(2)尺度;(3)

抽样强度。在一个指定的土壤分类方法下,土壤类型的数量和分类等级数决定了对获得数据的多样性分析。在多级层次的系统分类体系中,类别数量明显从最高到最低级别持续增加,土壤多样性的值取决于所使用的分级级数。同样地,随着距离的增加土壤类群的数量会随之增加,所以,不同的成土作用过程的假定和样本选择的强度以及调查人员的技术均决定着土壤类型的数量。这些土壤类型最终会体现在制图上,这对后续在图斑基础上的土壤多样性分析产生至关重要的影响。最后,土壤多样性的估算可以以之前镶嵌好的土壤图或地理参考数据基础为依据。运用地图分类的等级程序来进行地图概括时,在小比例尺尺度下会丢失一些重要的信息。因此,从非嵌套的小比例尺的土壤地图上获得的结果只是大概估算。Ib áñez 等^[3]和 Hupy 等^[34]的研究说明在不同成图比例尺下对土壤多样性的影响。

5 土壤多样性分析的研究模式

5.1 自然界中自然体的不对称分布普遍符合威利斯曲线

在所有的自然资源清单中威利斯曲线是普遍存在的^[35-36],此曲线被证明体现了所有生物类别的分布本质,它来源于分类组合按照从最大丰富度到最小丰富度排列时所呈现的频率分布为凹面形状。这同样适用于分类单元中子单元的频率分布,即当子分类群/每个分类单元使用给定的分布单位并按照从最大的丰富度到最小的丰富度排列时也符合此曲线。威利斯曲线能表明在一个组合中既有稀有类群,又有其他较为丰富的类别。所有生物多样性和土壤多样性清单都遵循这一趋势,这样的情况也适用于生物和土壤分类制的结构分析上^[37]。

5.2 土壤多样性与生物多样性

土壤多样性受生物多样性启发而建立,将土壤多样性和生物多样性分析进行比较也有一些研究报道。如 Feoli 和 Orlicí^[38]重申了生物多样性分析,认为生态学家已经在生物群落的物种集合体中发现一些规律,在对土壤集合体进行分析时也会出现相似情况^[2, 27, 35-36, 39-42]。研究表明,在一些地区不同的环境和尺度下土壤多样性和生物多样性有很强的关联性^[26, 43],土壤多样性和地形多样性之间也是如此^[27, 44]。此外,不同类群之间生物多样性、岩石多样性、气候多样性之间的关系也已经得到了证明^[43]。Phillips 和 Marion^[42]、Scharenbroch 和 Bockheim^[45]通过运用传统的和数值分类的方法研究证明森林微环境和土壤多样性之间存在清晰的关系。

5.3 丰富度分布模型

生态群落中物种数量的分布在群落结构研究中是非常重要的,最常见的模型有:(1)等比级数;(2)对数级数;(3)对数正态分布;(4)断(鲁)棒模型^[23]。生物多样性研究表明在不均匀分布的生态系统中物种更加符合对数正态分布^[23],然而在扰动的情形下,也可测度到对数或等比分布^[46]。Ib áñez 等^[3]、Guo 等^[47]、Scharenbroch 和 Bockheim^[45]指出在土壤类别分布中也出现了类似的规律。

5.4 多样性—面积的关系

物种和面积之间的关系在生物多样性分析中得到了广泛的研究,保护生物学的理论核心也是如此^[22, 48]。物种—面积关系通常符合幂律,因此,分类群数量的对数与面积的对数间是正比例关系。同样, Ib áñez 等^[35-36]、Ib áñez 和 Effland^[43]、Phillips 和 Marion^[25, 42]、Guo 等^[47]、Toomanian 和 Esfandiarpour^[27]指出土壤多样性—面积之间的关系也符合幂律。研究证明在一个指定的大小不一的群岛或其他类似栖息地的空间间断客体(如湖—森林破碎斑块和山顶的微环境),指数幂律函数的值通常在 0.25 左右^[49]。值得注意的是,在群岛的岛屿中分析土壤类群的数量也发现存在同样的规律^[35, 43]。

5.5 多样性—时间的关系

在自然界尚未被人类活动干扰的地区,随着时间的变迁物种多样性逐渐增加这一论断已经在生态学著作中得到了充足的论证^[48]。Toomanian 和 Esfandiarpour^[27]发现土壤多样性—面积关系在河流阶地的年代序列上符合指数定律^[41]。同样, Ib áñez 和 Effland^[43]证明在夏威夷群岛按照 USDA 土壤分类顺序和亚顺序,从年轻的岛屿向稍古老岛屿土壤多样性会有显著的增加。此外, Phillips 和 Marion^[42]以及 Scharenbroch 和 Bockheim^[45]的研究指出森林土壤构成在相互作用中随着时间和树木的生长周期的变化其多样性是如何增加的。Ib áñez 等^[2,44]指出流水下切和流域的等级化如何通过时间过程导致了土壤多样性的增加。

5.6 多样性和嵌套式结构

物种或者土壤类型 (species or soil type) 的一般分布模型和土壤类型—面积的关系关联起来即产生了概念“嵌套子集”^[50]。这个模式的产生基于“分类集合或分类单元出现在较小的集聚体中,也会出现在同类型较大的集聚体中,但是反过来则不成立”这一观点。大的集聚体包含其他特殊的在小的集聚体中不会出现的土壤类型,一些类别的出现与其特有的生态栖息地环境密切相关。通常而言,大的岛屿较小的岛屿有更多的物种或土壤类型,这是因为较大的岛屿上有更丰富多样的土壤形成因素,如地形、小气候和成熟的沉积地貌^[36]。在土壤学领域中通过预测上面提到的土地单元大小的增加,有可能预测到一些特殊的土壤类型出现的概率^[36]。

5.7 多样性和复杂性科学

关于土壤^[2,51]、土壤多样性^[2]、地貌系统和非线性系统^[52]之间的关系研究至少追溯到 20 多年以前,研究表明土壤和地貌的关系取决于它们之间的非线性特征。Phillips 等^[39-42]研究地貌系统的非线性,并按照非线性体系研究土壤多样性和地形地貌之间的关系。Ib áñez 等^[2,51]也进行着相似的研究,如运用非平衡热力学和大灾难理论观点来研究土壤的起源。

5.8 多样性和土壤形成过程

传统的土壤学理论认为在相似的初始条件和环境发育历史背景下,土壤的起源应该遵从从一个趋同的发育途径并最终达到某一终极土壤类别的中心概念^[53]。因此,按照 Jenny 理论成熟土壤景观是随着时间推移而发展,这种趋同的发展趋势导致了土壤多样性的减少^[54]。然而,非线性动力学的方法证明除此之外在以上提到的条件下也可以出现相反的发展方向^[39,51],且能够导致土壤多样性的增加。

传统的土壤学将研究重点集中在土壤类型的演变,而非线性动力学、复杂性科学和土壤多样性的方法却在研究着土壤类型起源的数学结构分析。运用土壤丰富度—面积的关系,Phillips 等^[40-42]指出应该沿着空间和时间的轴线来理解土壤的成土作用,它们是随着一个特定的地形区域内土壤多样性的增多而增加的,尤其是在高分辨率的尺度下其内部的因素(土壤系统的不稳定性作为不同成土作用的一个驱动因素)至少应该和外部的因素同等重要。

5.9 多样性、分形、多维分形

Ib áñez 等^[35-36]及 Ib áñez 和 Effland^[43]运用土壤丰富度—面积关系推断在地理空间上土壤类型的分形分布。同样地,Caniego 等^[55]在全球尺度上运用多维分形方法分析土壤圈结构的尺度非变异性。

5.10 多样性、生物地理学、土壤地理学

岛屿生物地理学理论^[49]是生物地理学理论的基石,同时也是“保护生物学”不可缺少的方法^[22,48]。这个理论预测,运用生物学的假设,岛屿上的物种—面积曲线符合一个幂指数定律,指数值为 0.25。Ib áñez 等^[35]发现土壤丰富度—面积的关系也有同样的统计分布和指数,表明土壤空间分布也是非线性的产物。Ib áñez 和 Effland^[43]提出了一个关于岛屿土壤地理学的理论:岛屿上的土壤集合体和生物群落的驱动因素是板块构造论(岩性和地形)和纬度。这些研究推断生物多样性和土壤多样性遵循统一的理论基础,测度土壤多样性和生物多样性

的指标值呈正相关。

5.11 多样性和景观变迁

Arnett 和 Conacher^[56]指出在地壳构造表面形成之后,随着河流侵蚀的加剧和河道网的发展,异质性和土壤地貌单元的数量产生了持续的增加。Ib áñez 等^[2]在土壤多样性框架和复杂体系理论下研究了相似的案例,得到了相似的结论。Hupp^[57]也得出了相似的结论:随着河网的渐进发展,地貌单元的数量和地表植物群的丰富度之间存在着正相关的关系。

Ib áñez 等^[44]完成了一运河截面在过去 250 万年间古代重建的演变研究,研究了区域内河网河口是如何引起包括丰富度和岩石多样性、地貌的、土壤的和植物群落单元的增加。河网的切割过程中使得老地形分水岭的地貌单元数量增加了大约 75%,土壤丰富度增加了 51.5%。与此同时,Phillips^[52]分析并确认了系统的非线性动力学的运用,其研究表明生物多样性、土壤多样性和地表形态多样性的趋势也遵从同样的规律^[2,39,43]。

6 土壤多样性和土壤圈的保护

6.1 土壤多样性处于危险之中

人类对土地、土壤资源和生态环境系统的影响和冲击随着时间的发展越来越明显,和生物多样性一样,人类活动的干扰将破坏全球的土壤多样性^[58-59]。Amundson 等^[60]的研究表明一些土系经过土地利用变化已经濒临灭绝。同样地,Lo Papa 等^[58]展示了在西西里岛过去的 53 年间流失的土壤多样性,并运用马尔科夫链和元胞自动机进行了预测。

Zhang 等^[59]研究了在中国经济高速发展过程中,土地利用变化对土壤多样性的影响及其产生的生态环境效应。Dazzi 等^[61]、Lo Papa 等^[58]研究了农村地区农业工业化过程所引起的干扰。这些研究显示,城市化、工业化将越来越多的自然土壤演变为城市土壤,人类在改变自然土壤类型时造成了一定的破坏,使之丧失了固有的生产和生态功能。

6.2 土壤多样性和土壤保护

土壤对人类的生存而言至关重要,土壤多样性的保护值得特别关注,因为土壤多样性是生物多样性的基础,土壤多样性的流失意味着生物多样性也难以继。Ib áñez 和 Saldaña^[28]的分析指出不但土壤资源多样性格局必须得到保护,而且还设计了具体的土壤保护网策略,确保在一个指定的区域运用最小面积保护所有的土壤类型。

7 结语

土壤多样性的研究是一个充满生机的新兴学科领域,已经被越来越多地看作是一个创新性显著、有研究价值的土壤计量手段^[62]。一些时空变异分析模型被用来进行土壤多样性分析,以此说明自然资源清单及其保护的重要性,利用数学方法进行土壤多样性研究不但为了量化土壤地图而且有助于对经典理论土壤学的重新思考。

生物多样性分析有着悠久的历史 and 成功的案例,正如 Hurlbert^[63]、Peters^[64]和 Ricotta^[31]所分析过去的几十年间,不同时期生物多样性理论方法的进展和研究现状,为土壤多样性的深入研究提供了可借鉴的知识积累。Ricotta^[31]认为“在生态学的所有概念中,生物多样性很明显似乎是最直观、最易被引起重视而进行研究的。就生物多样性的概念而言,在生态学家之中已存在许多的模棱两可甚至混乱,土壤多样性的评价也有类似担忧”。随着土壤多样性文献的增加与发展,土壤学家似乎开始重复着生态学家的覆辙,不断更新的概念、指数和其他数学方法的膨胀似乎开始阻碍而不是促进对土壤多样性的深入研究,这一点值得注意。

仙农熵多样性指数在生态学和土壤学文献中也曾受到指责^[24,26-27]。但是,它仍是生物多样性研究中应用最广泛、最持久的测度指数^[31,65]。与所有的多样性指数相同,仙农熵指数有一些约束条件,近年来有越来越多的研究也对其进行改进或者推荐使用其他多样性指数,也有研究将新的指数与仙农熵指数的算法进行比较。但到目前为止,尚没有一个公认的指数来代替仙农熵指数。从严格的数学角度而言,仙农熵指数是一个量化多样性好的算法^[66]。Hurlbert^[63]、Peters^[64]、Ricotta^[31]和 Ibáñez 等^[2]均不同意在生物多样性的研究中增加和扩张更多的测度方法,因为作为土壤学家我们不能重蹈生态学领域对生物多样性计量时的覆辙。

土壤多样性的研究虽然取得了显著的进展,但有一些问题亟待解决:(1)为什么土壤多样性的结果与生物多样性的结果相似?(2)这些相似性是地球表面系统非线性动力学的本质结果吗?(3)土壤多样性如何与其他资源的多样性进行比较,如地貌单元的多样性^[25,27,39-41,56]以及 Williamson^[67]和 Ibáñez 等^[44]讨论的岩石单元的多样性?因为,这些尚未解决的问题恰恰是土壤多样性研究未来的主要挑战。

参 考 文 献

- [1] Fridland V M. Structure of the soil mantle. *Geoderma*, 1974, 12: 35-41
- [2] Ibáñez J J, Jiménez-Ballesta R, García-Álvarez A. Soil landscapes and drainage basins in Mediterranean mountain areas. *Catena*, 1990, 17: 573-583
- [3] Ibáñez J J, De-Alba S, Bermúdez F F, et al. Pedodiversity: Concepts and measures. *Catena*, 1995, 24: 215-232
- [4] Ibáñez J J, Bockheim J. *Pedodiversity*. USA: Science Publishers, CRC Press, 2013: 1-258
- [5] 张学雷. 土壤多样性: 土壤地理学研究的契机. *土壤*, 2014, 46(1): 1-6. Zhang X L. Pedodiversity: An opportunity for soil geographic studies (In Chinese). *Soils*, 2014, 46(1): 1-6
- [6] 陈杰, 张学雷, 龚子同, 等. 土壤多样性的概念及其争议. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 189-193. Chen J, Zhang X L, Gong Z T, et al. Pedodiversity: A controversial concept (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 189-193
- [7] 张学雷, 陈杰, 檀满枝, 等. 土壤多样性理论方法的新近发展与应用. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 374-379. Zhang X L, Chen J, Tan M Z, et al. Some most recent research progress on pedodiversity (In Chinese). *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(3): 374-379
- [8] 张学雷, 陈杰, 龚子同. 土壤多样性理论在欧美的实践及在我国土壤景观研究中的应用前景. *生态学报*, 2004, 24(5): 1063-1072. Zhang X L, Chen J, Gong Z T. What to do in China after a review of researches practices on pedodiversity in Europe and America (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 1063-1072
- [9] 孙燕瓷, 张学雷, 陈杰, 等. 土壤多样性的概念、方法与研究进展. *土壤通报*, 2005, 36(6): 954-958. Sun Y C, Zhang X L, Chen J, et al. Pedodiversity: Its concept, methodology and research practice (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 954-958
- [10] 孙燕瓷, 张学雷, 陈杰. 城市化对苏州地区土壤多样性的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2060-2065. Sun Y C, Zhang X L, Chen J. Impact of urbanization on pedodiversity in Suzhou area (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2060-2065
- [11] 张学雷, 王辉, 张薇, 等. 土壤系统分类与生物系统分类体系中的多样性特征对比分析. *土壤学报*, 2008, 45(1): 1-8. Zhang X L, Wang H, Zhang W, et al. Comparison of diversity characteristics between pedological and biological taxonomies (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 1-8
- [12] 段金龙, 张学雷. 中国中、东部典型样区土壤与水体多样性关联分析. *水科学进展*, 2012, 23(5): 635-641. Duan J L, Zhang X L. Correlative analysis of pedodiversity and spatial distribution of water body diversity at different scales in East and Central China (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 635-641

- [13] 段金龙, 屈永慧, 张学雷. 地表水空间分布与土壤类别多样性关联分析. 农业机械学报, 2013, 44(6): 110-115. Duan J L, Qu Y H, Zhang X L. Correlative analysis between surface water spatial distribution diversity and pedodiversity (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 110-116
- [14] 段金龙, 张学雷. 中国中、东部典型省会和县域土壤及土地利用多样性关联的对比研究. 地理科学, 2013, 33(2): 195-202. Duan J L, Zhang X L. Comparison of pedodiversity and land use diversity correlative analysis between typical provincial capitals and counties in east and central China (In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(2): 195-202
- [15] 段金龙, 张学雷. 基于仙农熵的土壤多样性和土地利用多样性关联评价. 土壤学报, 2011, 48(5): 893-903. Duan J L, Zhang X L. Correlative evaluation of pedodiversity and land use diversity based on Shannon entropy (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(5): 893-903
- [16] Minasny B, Mcbratney A, Hartemink A E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the world reference base. Geoderma, 2010, 155: 132-139
- [17] Jacuchno V M. K voprosu opredelenia raznoobrazija struktury pocvennogo pokrova. Tezisy dokl. III. VSES Sov. Po structure pocv. Pokrova. Vaschnil, Moskva, 1976
- [18] Beckett P H T, Bie S W. Use of soil and land-system maps to provide soil information in Australia//CSIRO Division of Soil Technical Paper No.33. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, Australia, 1978
- [19] Wilson E O, Peter F M. Biodiversity. Washington, DC: National Academy Press, 1988
- [20] McBratney A B. On variation, uncertainty and informatics in environmental soil management. Australian Journal of Soil Research, 1992, 30: 913-935
- [21] Sharples C. A methodology for the identification of significant landforms and geological sites for geoconservation purposes. Report to the Forestry Commission, Hobart, Tasmania, 1993
- [22] Huston M A. Biological diversity: The coexistence of species on changing landscapes. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994
- [23] Magurran A E. Ecological diversity and its measurement. Croom Helm, London, UK, 1998
- [24] McBratney A, Minasny B. On measuring pedodiversity. Geoderma, 2007, 141: 49-54
- [25] Phillips J D, Marion D A. Soil geomorphic classification, soil taxonomy, and effects on soil richness assessments. Geoderma, 2007, 141: 89-97
- [26] Petersen A, Grönggröft A, Miehlich G. Methods to quantify the pedodiversity of 1 km² areas. Results from southern African drylands. Geoderma, 2010, 155: 140-146
- [27] Toomanian N, Esfandiarpour I. Challenges of pedodiversity in soil science. Eurasian Soils Science, 2010, 43: 1486-1502
- [28] Ibáñez J J, Saldaña A. Continuum dilemma in pedometrics and pedology//Krasilnikov P V. Soil geography and geostatistics: Concepts and applications. CEC-JRC Scientific and Technical Reports, Ispra Italy, 2008: 130-147
- [29] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington DC, 2010
- [30] Saldaña A, Ibáñez J J. Pedodiversity, connectance and spatial variability of soil properties, what is the relationship? Ecological Modelling, 2007, 208: 342-352
- [31] Ricotta C. Through the jungle of biological diversity. Acta Biotheoretica, 2005, 53: 29-38
- [32] Pielou E C. Ecological diversity. New York, USA: Wiley, 1975
- [33] Vane-Wright R I, Humphries C J, Williams P M. What to protect: Systematics and the agony of choice. Biological Conservation, 1991, 55: 235-254

- [34] Hupy C M, Schaetzl R J, Messina J M, et al. Modelling the complexity of different, recently deglaciated soil landscapes as a function of map scale. *Geoderma*, 2004,123: 115-130
- [35] Ibáñez J J, Caniego J, San-José F, et al. Pedodiversity-area relationships for islands. *Ecological Modelling*, 2005,182: 257-269
- [36] Ibáñez J J, Caniego J, García-Álvarez A. Nested subset analysis and taxa-range size distributions of pedological assemblages: Implications for biodiversity studies. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 239-256
- [37] Ibáñez J J, Ruiz-Ramos M, Tarquis A. The mathematical structures of biological and pedological taxonomies. *Geoderma*, 2006, 134: 360-372
- [38] Feoli E, Orłóci L. Can similarity theory contribute to the development of a general theory of the plant community? *Community Ecology*, 2011,12: 135-141
- [39] Phillips J D. *Earth surface systems*. Oxford, UK: Blackwell, 1999
- [40] Phillips J D. The relative importance of intrinsic and extrinsic factors in pedodiversity. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91: 609-621
- [41] Phillips J D. Divergent evolution and spatial structure of soil landscape variability. *Catena*, 2001,43: 101-113
- [42] Phillips J D, Marion D A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 2005,124: 73-89
- [43] Ibáñez J J, Effland W R. Toward a theory of island Pedogeography: Testing the driving forces for pedological assemblages in archipelagos of different origins. *Geomorphology*, 2011,135: 215-223
- [44] Ibáñez J J, Pérez-González A, Jiménez-Ballesta R, et al. Evolution of fluvial dissection landscapes in mediterranean environments// Quantitative estimates and geomorphological, pedological and phytocenotic repercussions. *Z. Geomorph. N.F.* 1994,37: 123-138
- [45] Scharenbroch B C, Bockheim J C. Pedodiversity in an old-growth northern hardwood forest in the Huron Mountains, Upper Peninsula, Michigan. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37: 1106-1117
- [46] Tokeshi M. Species abundance patterns and community structure. *Advances in Ecological Research*, 1993, 24: 111-186
- [47] Guo Y, Gong P, Amundson R. Pedodiversity in the United States of America. *Geoderma*, 2003, 117: 99-115
- [48] Rosenzweig M L. *Species diversity in space and time*. Cambridge, New York, USA: Cambridge University Press, 1995
- [49] MacArthur R H, Wilson E O. *The theory of island biogeography*. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 1967
- [50] Patterson B, Atmar W. Nested subsets and the structure of insular mammalian faunas and archipelagos. *Biological Journal of the Linnean Society*, 1986, 28: 65-82
- [51] Ibáñez J J, Jiménez-Ballesta R, García-Álvarez A. Sistemología y termodinámica en edafogénesis. II. Suelos, estructuras disipativas y teoría de catástrofes. *Rev. Écol. Biol. Sol*, 1991, 28: 237-254
- [52] Phillips J D. Qualitative chaos in geomorphic systems, with an example from wetland response to sea level rise. *Journal of Geology*, 1992,100: 365-374
- [53] Jenny H. *Factors of soil formation*. New York, USA: McGraw-hill Book Co., 1941
- [54] Johnson D L, Watson-Stegner D. Evolution model of pedogenesis. *Soil Science*, 1987, 143: 349-366
- [55] Caniego F J, Ibáñez J J, San-José F. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at planetary level: A multifractal approach. *Geoderma*, 2006, 134: 306-317
- [56] Arnett R R, Conacher A J. Drainage basin expansion and the nine unit landsurface model. *Australian Geographer*, 1973,12: 237-249
- [57] Hupp C R. *Vegetation patterns in relation to basin hydrogeomorphology*//Thornes J B. *Vegetation and erosion: Processes and environments*. New York, USA: Wiley, 1990: 217-237

- [59] Lo Papa G, Palermo V, Dazzi C. Is land-use change a cause of loss of pedodiversity? The case of the Mazzarrone study area, Sicily. *Geomorphology*, 2011, 135: 332-342
- [60] Zhang X L, Chen J, Tan M Z, et al. Assessing the impact of urban sprawl on soil resources of Nanjing city using satellite images and digital soil databases. *Catena*, 2007, 69: 16-30
- [61] Amundson R Y, Guo P, Gong P. Soil diversity and land use in the United States. *Ecosystems*, 2003, 6: 470-482
- [62] Dazzi C, Lo Papa G, Palermo V. Proposal for a new diagnostic horizon for WRB Anthrosols. *Geoderma*, 2009, 151: 16-21
- [63] McBratney A B, Odeh I O A, Bishop T F A, et al. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 2000, 97: 293-327
- [64] Hurlbert S H. The noconcept of species diversity: A critique and alternative parameters. *Ecology*, 1971, 52: 577-586
- [65] Peters R H. A critique for ecology. New York, USA: Cambridge University Press, 1991
- [66] Magurran A E. Measuring biological diversity. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2004
- [67] Mart ín M A, Rey J M. On the role of Shannon's entropy as a measure of heterogeneity. *Geoderma*, 2000, 98: 1-3
- [68] Williamson M H. Island populations. Oxford, UK: Oxford University Press, 1981

Study on Pedodiversity: Status quo and Future Challenges

Ren Yuanyuan Zhang Xuelei[†]

(School of Hydraulic and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Institute of Natural Resources and Eco-environment, Zhengzhou 450001, China)

Abstract Based on some chapters of the book "Pedodiversity" published by CRC in the US in 2013 and some other related references, a review is presented here of status quo of the study on pedodiversity and challenges it may face in future worldwide, with emphasis on research modes of the study on pedodiversity. Besides, this paper has a few paragraphs devoted to history, progresses major achievements and future challenges of the study.

First of all, a brief introduction is made to how the concept of pedodiversity was initiated and connotation of diversity: (1) The exploration of the concept of diversity should proceed from the angle of practicality and the concept should encompass species diversity (or richness) and distribution of individuals of the (evenness or uniformity); From the point of view of methodology, the most popular methods for diversity analysis may be grouped into two general classes: indices of richness and object abundance models. (2) To the knowledge of the authors, the first pedologist who tried to analyze and quantify pedological diversity of a region was a Russian, V. M. Fridland. Regretfully his work did not arouse any attention from his colleagues in the circle. Then at the beginning of the 1990s, Ibáñez and his coworkers adopted the mathematical tools developed by some ecologists in studying soil diversity, created a neologism, "pedodiversity" and then published a number of papers, explaining the main measuring methods used in analyzing soil diversity or pedodiversity, which, as a matter of fact, triggered an expedition to explore theories of and methods for soil diversity theory.

Then attempts are made to elaborate objectives and methodology of the pedodiversity analysis, including some fundamental principles, like diversity vs soil classification systems, scale vs sampling intensity. Nowadays, the USDA (United States Department of Agriculture) Soil

Taxonomy is being used by pedologists the world over, and at the same time, WRB (the World Reference Base for Soil Resources), developed jointly by the International Union of Soil Sciences (IUSS) and FAO and later pedologists the world over, has been accepted as a universal soil classification system. In addition, the measurement of pedorichness and pedodiversity depends on methods and scales of soil classification and sampling intensity.

And next, analysis is done with emphasis of major models currently used in the research of pedodiversity, such as Willis curve, soil diversity vs biodiversity, abundance distribution models, diversity-area relationships, diversity-time relationships, diversity nested systems, diversity vs pedogenetic processes, diversity vs landscape evolution, etc., of which some are elaborated in detail:

(1) Willis curve: The Willis curve has been proved to be able to embody the distribution nature of all biospecies. It originates from the array of taxonomic groups in line with the variation of abundance from the maximum to the minimum, appearing in a concave-shaped curve of frequency distribution.

(2) Soil diversity vs biodiversity: Several studies have found strong correlations between pedodiversity and biodiversity under different environments and at different in some regions, and between pedodiversity and landform diversity, too. Furthermore, the relationships of biodiversity of various species groups with lithological diversity and climate diversity have also been demonstrated.

(3) Abundance distribution models: The distribution of the numbers of species within an ecological community has long been regarded as a critical aspect in the study of community structure. The most commonly used models include geometric series, logarithmic series, log-normal distribution, "broken stick" (robust) model. Researches show that the same regularities do exist in categorical distribution of soils.

(4) Diversity-area relationships: The pedodiversity-area relationship fits a power law and has nothing related to the type and scale of classification. It has been demonstrated that in a given archipelago or other spaces, the power law function value of the index of discontinuous objects index is generally around 0.25.

(5) Diversity-time relationships: In a natural area free of human activities, species diversity improves with the time passing on and so does pedodiversity.

In the end, as soil is essential to human survival, pedodiversity preservation merits special attention, perhaps more than other natural resources. Nowadays, the pedosphere and many of its soil types are on the edge of extinction as a result of intensive and widespread impact of human activities. Moreover, the impacts on land, soil resources and eco-environment are intensifying more and more significantly with the time going on, and land degradation, industrialized farming and orderless urban sprawl are the main driving forces of changes in and loss of pedodiversity.

Key words Pedodiversity; Methodological aspects; Analysis patterns; Protection

(责任编辑: 檀满枝)