

段金龙, 张学雷, 李卫东, 等. 土壤多样性理论与方法在中国的应用与发展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 995-1002, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.09.0995. [Duan Jinlong, Zhang Xuelei, Li Weidong, et al. Application and development of studies on pedodiversity theory and methodology in China [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9): 995-1002, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.09.0995.]

土壤多样性理论与方法在中国的应用与发展*

段金龙^{1,2}, 张学雷^{2*}, 李卫东¹, 李 滨¹

(1. 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 郑州大学自然资源与生态环境研究所, 河南 郑州 450001)

摘 要: 土壤多样性作为土壤地理学研究领域的前沿性内容, 可量化描述土壤的空间变异性和分布格局问题, 日益受到国内外广泛关注。在简要回顾了土壤多样性在国外的产生和发展过程后, 着重对该专题在中国近 15 年的发展历程进行了深入分析, 并对中国土壤多样性研究的发展特点和趋势进行了分析与总结。根据研究时期、内容和目的的不同, 认为中国土壤多样性研究可以划分为引起与探索时期以及拓展应用时期。除以丰富度指数、仙农熵和均匀度指数为主的经典多样性计量方法外, 新提出的土壤空间分布多样性为传统方法提供了重要的数据补充, 该专题在土壤地理学和其他相关学科中仍具有广阔的应用空间和发展前景。

关 键 词: 仙农熵; 土地利用; 空间分布; 河南省; 江苏省

中图分类号: P934; S15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2014)09-0995-08

1 引 言

第三次科技革命后, 地球表面正在发生指数级的改变, 作为气候、环境和生态系统等因素共同作用的结果, 土壤圈层也正在发生不可逆的剧烈变动。为加深土壤分布特征的定量化研究, 早在 20 世纪 70 年代左右, 俄罗斯学者 Fridland^[1] 就提出了类似土壤多样性 (pedodiversity) 的概念, 但国际上一般认为, 当代土壤多样性的研究始于西班牙, Ibáñez 等^[2,3] 是该研究专题的奠基人和先行者, 其相关研究内容也为土壤多样性研究在世界范围内的传播和发展提供了最初而且主要的方法论支持, 他们借鉴生物多样性在生态学研究中的应用基础, 提出的土壤多样性理论与方法已经成为 21 世纪以来世界土

壤地理学研究领域的前沿性内容, 在这些研究中, 一般使用丰富度指数 (richness index)、仙农熵 (Shannon entropy)、均匀度指数 (Pielou index) 和多度分布模型 (abundance distribution models) 作为主要的多样性测度方法。作为计量土壤学的重要组成部分, 土壤多样性可以定量化地描述土壤的空间变异性和不同土壤类型的分布格局问题, 为土壤资源的保护和可持续合理利用以及土地资源的利用和管理提供理论及数据支持。一般认为, 土壤多样性研究可以细分为土壤类别多样性、土壤功能多样性、土壤发生多样性和土壤性状多样性几种^[4], 目前涉及土壤类别多样性的报道是国内外相关研究内容的主要组成部分。

自 1995 年 Ibáñez 等^[5] 提出土壤多样性的概念

收稿日期: 2014-06-18; 修回日期: 2014-08-18.

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目“土地利用变化对土壤多样性的影响及其生态环境效应分析”(编号: 41171177); 河南工业大学高层次人才科研基金项目“以水、土为代表的资源空间分布多样性研究”(编号: 2014BS017) 资助。

作者简介: 段金龙 (1984-), 男, 河南民权人, 讲师, 主要从事地理信息及资源遥感研究. E-mail: 215385212@qq.com

* 通讯作者: 张学雷 (1960-), 男, 江苏沛县人, 教授, 主要从事运用数据库、3S 技术对自然资源 (土壤与土地资源为主) 与生态环境效应的分析与研究. E-mail: zxlzou@zsu.edu.cn

至今,经过20年的发展,这一研究专题已经获得各国相关领域学者的广泛关注和应用实践。这些研究报道从地域分布上可以宏观分为西班牙、美国、中国以及其他国家学者的研究,其中前三者具有比较明显的时间上的继承性和研究深度上循序渐进的发展特征。本文首先简要回顾并总结了土壤多样性在国外的发展历程,然后对该专题在中国的应用和发展历程进行深入分析,对中国土壤多样性研究的发展特点和趋势进行总结,以期为国内土壤多样性研究的进一步发展和自然资源的可持续合理利用提供理论及研究方法参考。

2 国外土壤多样性研究简述

2.1 西班牙土壤多样性研究特点

通过回顾土壤多样性在西班牙的研究发展历程,可以总结出以下3个特点:①研究学者以Ibáñez等为主导,研究思路和研究模式具有明显的继承性和系统性;②研究分为3个主要阶段,分别是20世纪末的探索期(土壤多样性方法论的创立^[2,3,5~7])、21世纪初的综合应用期(多研究区数据支持下的土壤多样性计算与评价^[8~11]以及跨学科的交叉性研究^[12,13])、近期的总结深化期(土壤多样性的科学内涵分析)^[14~18];③研究内容逐步深化,综合了数学结构^[12]、地形地貌学^[9]、分类学、人类自然遗产(natural heritage)^[19]等诸多要素,从更深层次挖掘土壤多样性的内涵以期进行更深入的相关探索。

2.2 美国土壤多样性研究特点

美国在该领域的研究处于国际领先水平,并具有自身特点^[20~23]。和西班牙研究相比,美国土壤多样性研究的时间分层性和内容递进性不明显,这和美国的广阔国土面积以及从事该领域研究学者较多有关。但美国具有更加严谨和科学的土壤诊断层分类系统^[24,25],因此其土壤多样性研究同土壤分类学和土地利用研究结合的更为紧密^[26,27]。通过对文献的回顾,可以发现美国学者进行土壤多样性相关研究的主要目的是进行原状土(undisturbed soil)、地方性土壤(endemic soil)和稀有土壤(rare soil)的保护工作,相关研究内容具有很强的针对性和目的性。

2.3 其他国家土壤多样性研究特点

除了西班牙和美国以外,澳大利亚^[28,29]、德国^[30]、意大利^[31~33]、日本^[34]和伊朗^[35]等国的学者都结合各自国家和地区的实际情况进行了相关研究实践,土壤多样性研究在国际上正逐渐受到更多土

壤、土地、环境等相关自然学科领域学者的重视。

2013年4月,由美国CRC出版的专著《土壤多样性(Pedodiversity)》^[19]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,西班牙学者Ibáñez,Caniego和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;意大利学者Feol和Dazzi介绍了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;美国学者Phillips和Bockheim介绍了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;伊朗学者Toomanian介绍了对土壤多样性与地形的研究;中国学者张学雷也介绍了中国土壤多样性的主要研究进展及其未来的机遇与挑战。根据该专著的有关章节并结合相关文献,关于国际间土壤多样性研究的现状与进展情况由另文专述。

3 土壤多样性在中国的发展

中国具有广阔经纬度跨度的国土面积,多种多样的地形地貌,复杂多变的气候,加之悠久的人为活动历史,造就了中国土壤类型组成极其复杂多样的格局;中国土壤系统分类以土壤发生学为指导,土壤属性为依据,创新性地建立了人为土纲,是继美国土壤系统分类和世界土壤信息参比基础之后在国际土壤分类学领域享有极高声望的土壤分类系统^[36],所有这些都使土壤多样性研究在中国具有了坚实的数据基础和广阔的发展前景。21世纪初,以张学雷等^[4,37]和孙燕瓷等^[38]为代表的土壤学家将土壤多样性研究引入中国,并通过分析该理论在欧美诸国的应用实践成果,对土壤多样性的概念和研究方法进行了解读,同时在后续研究中基于中国各地不同尺度的土壤相关数据源进行了若干具有独创性的探索工作。在此期间,张学雷等国内学者和土壤多样性研究的奠基人Ibáñez以及其他国外相关研究领域的学者保持了良好的学术交流关系,因此中国的土壤多样性研究借鉴了若干国外相关研究的先进思想和方法,与此同时,中国土壤多样性研究的若干创新和研究进展也获得了国外学术界的认可和关注,在最新的国际性专著《土壤多样性(Pedodiversity)》中对中国的相关研究进展进行了专题介绍^[19]。

通过回顾土壤多样性在中国的发展历程,发现

其研究进展特点和西班牙类似,这种相似性主要表现在以下3个方面:①具有代表性的研究学者(国内以张学雷等为代表),其研究思想和内容具有明显的系统性和层次性;②国内土壤多样性研究分为明显的引起与探索时期以及拓展应用时期;③研究领域不断扩宽,联系了诸如土地利用、生物分类系统对比、嵌套子集(nested subset)等多种元素进行综合性分析。

3.1 土壤多样性在中国的引起与探索

土壤多样性理论和研究方法在21世纪初期由张学雷等^[4,37]和孙燕瓷等^[38]引入中国,介绍了土壤多样性的几种测度方法:多度分布模型、丰富度-面积曲线(richness-area curves)、仙农指数(Shannon Index)、均匀度指数等,对“土壤多样性”这一仍处初级研究阶段的新专题在西班牙的产生过程进行了详细描述,同时也列举了国外相关学者对其理论和应用前景的不同观点和意见^[39],并对其在中国土壤学相关研究中的应用前景做出了初步展望,对相关指数的使用和研究模式进行了分析,而这为后来国内的土壤多样性研究提供了重要的理论和方法支持。

上述研究内容使土壤多样性这一新专题在国内初步做到了理论与方法的统一,在此基础上,檀满枝等^[40-43]、陈杰等^[44]和张学雷等^[45]基于中国山东省和海南省的土壤相关数据对土壤多样性研究进行了初步尝试。这些研究中,他们基于2个省份的土壤-地形体数字化数据库(SOTER数据库),对不同地形和母质上的土壤多样性进行了计算,并深入分析了地形、母岩、土壤分布及其多样性之间的内在联系,主要获得了以下结论:①土壤多样性在国内土壤学研究领域具有理论和技术上的可操作性,能为区域可持续发展提供理论和数据支持;②不同地形和成土母质上的土壤面积均不同程度地符合对数正态分布;③随着地形和母质的变化,土壤丰富度指数、多样性指数和均匀度指数的数值大小均呈现出一定的规律性变化特征。

在这一探索时期的末段,张学雷等^[46,47]基于土壤多样性理论和研究方法,对海南岛的地形和土壤化学性质进行了多样性分析,建立了不同成土母质上的地形类别多度分布模型和不同地形上的某些土壤化学性质类别多度分布模型,并实现了各自的数字化表达,以期为区域环境多样性保护和热带土壤的合理利用提供数据支持。这些研究是土壤多样性在中国的首次跨领域尝试,即将土壤多样性理论与研究方法引入和土壤相关的其他资源要素特征评价

的交叉性研究中。

土壤多样性在中国的探索时期大致由2001年持续至2005年,主要解决了土壤多样性的定义、研究方法、研究意义等基础和核心问题,并为后续的深入探索和交叉学科研究提供了宝贵的第一手资料,同时为国内土壤地理学、生态环境保护等相关研究领域提供了一个新的研究专题和研究思路。

3.2 土壤多样性在中国的拓展应用研究

2005年至今,结合国外最新研究进展,并基于中国土壤多样性研究成果,作为土壤地理学研究的新契机^[48],该专题在国内迎来了一个新的发展时期,通过结合城市化、土地利用变化、嵌套子集等多种要素,国内学者开展了大量和土壤多样性相关的交叉学科研究^[49-73],而这些研究报道也构成了土壤多样性在中国的拓展与应用研究时期。按照土壤多样性计量方法分类,这些研究报道可以分为前期的基于传统方法的土壤多样性研究^[49-64]和最新的基于离散性的土壤空间分布多样性研究^[65-73]。

3.2.1 传统土壤多样性研究方法

传统土壤多样性研究方法或称朴素的经典土壤多样性研究方法,即通过使用仙农指数、均匀度指数、丰富度指数这三大多样性相关指数,对区域土壤类别的数量组成和空间变异性进行数字化表达的过程,而这也是国内外使用最广泛的土壤多样性研究方法。该方法要求所有土壤分类单元的斑块数量或面积等数据同时参与计算,因此所获结果侧重于对研究区域内土壤构成的总体特征进行宏观描述。随着国内土壤多样性探索期的结束,相关理论和研究方法逐渐成熟,单纯的土壤多样性计算已经缺少新颖性和学术活力,与此同时,跨领域的交叉学科研究在国内外自然科学和环境科学研究中显现出日益广阔的应用前景。

檀满枝等^[49,50]对江苏省典型研究区的土地利用变化情况进行了深入分析,研究表明,近20年来江苏省典型研究区的土地利用发生了显著变化,相关城镇周边的大量农业基础设施好、生产力水平较高的土壤资源被侵占,城市化和土壤资源保护之间产生了激烈冲突。孙燕瓷等^[51,52]深入分析了城市化对土壤多样性造成的影响,研究发现,90%以上苏州平江区的“粘壤质普通筒育滞水潜育土”和太仓市“砂质石灰性斑纹湿润正常新成土”的土壤表面已经变为城镇用地而濒临消失,南京市各级行政区划中(市、县、镇、村)村庄的扩张对土壤多样性指数的影响最广。研究认为,城市化造成的土地利用

变化对区域土壤多样性的影响极其显著,是土壤多样性变化的首要驱动因子,在区域经济和农业结构调整中,应加强对土壤资源和土壤多样性进行保护的意识,从而降低对目前尚未知晓的自然环境保护领域(如自然遗产、环境基因)造成不可逆破坏的风险。王辉等^[53~55]首次将嵌套性理论和研究方法引入土地利用和土壤多样性研究中,研究表明,地学系统中普遍存在着嵌套性,1984—2003年南京市城镇用地面积不断扩大,填充度增加1倍多,并呈嵌套格局,且嵌套程度逐渐增加;南京市土壤集合在组成上呈现出不完全嵌套格局,土壤类型数和面积呈幂函数变化关系,嵌套格局和南京市的土种面积、地形以及地理位置密切相关;嵌套性、城市化和土壤多样性研究的结合在土壤资源保护工作中具有理论和现实意义。张学雷等^[57]将中国土壤系统分类和生物系统分类体系中的多样性特征进行了对比分析,研究通过计算2种系统分类的幂律和对数正态分布,分析了它们之间的相似性和差异性。研究表明,2种分类系统具有相似的数学结构和多样性特征,都是合理的信息系统,符合相同的分布模型。

郭慧等^[58]和毕如田等^[59]运用土壤多样性理论及其测度方法,对山西省永济市和涑水河流域不同地形单元和不同土地利用类型上的土壤多样性进行了分析,并对不同地形上的土壤多样性三大指数进行了排序。刘洪蓬等^[60]对罗布泊地区的土壤多样性进行了分析,研究认为该地区土壤类型单一,同时土壤多样性受到土壤分类精度、地块单元面积以及所包含各亚类面积等综合因素的影响。高凤君等^[61]对国内外的土壤多样性研究进展进行了初步总结,并按照这些报道所使用研究方法的不同将其划分为若干种类。彭月等^[62]以重庆市三峡库区为研究区域,通过计算多样性、均匀度、丰富度等景观多样性指数,探讨了研究区内不同土壤类型的土壤侵蚀景观异质性。王子芳等^[63]和邵景安等^[64]以重庆岩溶地区为例,探讨了该地区的土壤多样性、土地利用方式多样性等景观特征,研究认为该地区土壤景观的多样化和空间异质化程度不高,各类景观分布比例不均匀,人类活动对土壤景观变化具有明显影响。这些研究中出现的景观多样性概念和土壤多样性有密切联系,其中的景观多样性指数、景观均匀度指数和景观丰富度指数即仙农指数、均匀度指数和丰富度指数这三大土壤多样性经典指数。

3.2.2 基于离散性的土壤空间分布多样性研究方法

以往国内外土壤多样性研究中,常用的丰富度

指数、多样性指数和均匀度指数均将研究目的聚焦于区域内所有土壤类型集合的组成特征分析上,而缺乏对某类特定土壤类型的空间分布特征进行独立分析。借鉴日本学者 Yabuki 等^[34]的相关研究方法,段金龙等^[65~71]、屈永慧等^[72]和钟国敏等^[73]提出一种基于空间网格理念的改良土壤多样性评价方法,以中国中部河南省和东部江苏省的典型研究区数据为例,进行了基于土壤及其相关资源要素空间分布特征分析的系列性研究,取得了一定的研究成果,该组研究内容也为传统土壤多样性分析方法提供了重要的理论和数据补充。这些研究内容验证了改良土壤多样性计量方法的可行性,并成功地将其应用于土壤和土地利用之间的关联性研究中^[65~67,72,73],为土地利用变化研究和不同资源研究对象间的地理分布关联性分析提供了一种新的研究途径;探索并评价了相同或不同气候、经济和人文条件下区域地表水体、植被覆盖和热环境的空间分布离散性程度以及前两者对后者的影响^[68];首次提出了“水体空间分布多样性”的概念,并发现地表水体分布对土壤类别的空间构成产生重要影响,为土壤发生学中水要素在土壤形成中的作用评价提供了客观数据,还为区域水资源的分布特征评价提供了新的研究思路和方法^[70,71]。

在城市化不断推进的今天,地球表面各要素的空间分布特征变化不断加剧,上述使用改良土壤多样性计量方法的研究内容为土壤多样性研究的进一步发展提供了新的契机,为土地资源研究中广泛使用的景观多样性^[74,75]研究方法提供了数据参考,也为土壤和其他相关资源类型间的关联性分析提供了新的研究途径。

4 结语与展望

土壤多样性理论与研究方法日益受到国内外相关研究领域学者的关注,逐渐变得像生物多样性一样受到更多重视。在过去15年的国内发展历程中,历经了借鉴和继承、巩固和发扬两大阶段,研究报道不断出现,研究广度和深度不断推进,从事这一研究专题的国内学者也逐渐增多。

通过回顾土壤多样性在中国的发展历程,参考国外相关研究的最新进展,并结合中国自然环境和社会环境的实际发展现状及趋势,相信未来国内的土壤多样性研究将在以下几个方面做出更多尝试和探索:

(1) 目前国内外土壤多样性研究报道大多涉及

类别多样性、对功能多样性等土壤多样性其他内涵领域的研究鲜有出现,而这也是目前国内相关研究的不足和发展前景所在。

(2) 土壤资源的多样性保护工作是地球遗产保护工作的重要组成部分,未来数十年内,中国的城市化进程仍将高速推进,土地利用变化和土壤保护之间的关联性分析仍将是自然科学和环境科学相关研究领域的核心问题之一,土壤多样性的引入能为区域可持续发展提供重要的理论和数据支持,它和土地资源管理之间的交叉性研究仍具有实际的研究需求和广阔的应用前景,应该仍是未来国内土壤多样性研究的核心内容之一,但应注意到,该项研究内容亟需最新土壤普查工作的数据支持。

(3) 重金属污染是土壤科学研究领域的热点问题,土壤多样性和土壤重金属污染之间的交叉性研究(如重金属污染对土壤多样性所造成的破坏等)也是一个潜在的研究方向,国内外涉及此内容的报道鲜有出现。

(4) 土壤空间分布多样性的提出为评价资源研究对象的离散性分布特征提供了一种便捷有效的新途径,目前在水、土资源的地理分布关联性研究中已经体现出其相关特点和优势。中国具有海量的土壤及其他相关资源类型的数据基础,因此基于“新旧”2种土壤多样性理论和计量方法,并将其引入土壤和水、植被、土壤微生物、地形、气候、人类活动等多因子的关联性分析中,进行基于不同研究区的独立性或对比性研究,相信能够获得更多具有独创性的研究突破,而这也能五大成土因素在土壤形成中所起作用的数字化表达提供一定的借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] Fridland V M. Structure of the soil mantle [J]. *Geoderma*, 1974, 12: 35-41.
- [2] Ibáñez J J. The background of pedodiversity and pedogeomorphic diversity [J]. *Pedometron*, 1995, 4: 2-4.
- [3] Ibáñez J J, De-Alba S, Lobo A, et al. Pedodiversity and global soil patterns at coarse scales (with discussion) [J]. *Geoderma*, 1998, 83: 171-192.
- [4] Zhang Xuelei, Chen Jie, Tan Manzhi, et al. Some most recent research progress on pedodiversity [J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(3): 374-379. [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 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 374-379.]
- [5] Ibáñez J J, De-Alba S, Bermúdez F F, et al. Pedodiversity concepts and tools [J]. *Catena*, 1995, 24: 214-232.
- [6] Camargo J A. On the concept of pedodiversity and its measurement [J]. *Geoderma*, 1999, 93: 335-338.
- [7] Ibáñez J J, De-Alba S. On the concept of pedodiversity and its measurement: A reply [J]. *Geoderma*, 1999, 93: 339-344.
- [8] Ibáñez J J, De-Alba S. Pedodiversity and scaling laws: Sharing Martín and Rey's opinion on the role of the Shannon index as a measure of diversity [J]. *Geoderma*, 2000, 98: 5-9.
- [9] Saldaña A, Ibáñez J J. Pedodiversity analysis at large scales: An example of three fluvial terraces of the Henares River (central Spain) [J]. *Geomorphology*, 2004, 62: 123-138.
- [10] Ibáñez J J, Caniego J, San José F, et al. Pedodiversity-area relationships for island [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 257-269.
- [11] Caniego J, Ibáñez J J, San José F. Selfsimilarity of pedotaxa distributions at the planetary scale: A multifractal approach [J]. *Geoderma*, 2006, 134: 306-317.
- [12] Ibáñez J J, Caniego J, García-Álvarez. Nested subset analysis and taxa-range size distributions of pedological assemblages: Implications for biodiversity studies [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 239-256.
- [13] Ibáñez J J, Ruiz-Ramos M, Tarquis A M. Mathematical structures of biological and pedological taxonomies [J]. *Geoderma*, 2006, 134: 360-372.
- [14] Saldaña A, Ibáñez J J. Pedodiversity, connectance and spatial variability of soil properties, what is the relationship? [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208: 342-352.
- [15] Ibáñez J J, Arnold R W, Ahrens R J. The fractal mind of pedologists (soil taxonomists and soil surveyors) [J]. *Ecological Complexity*, 2009, 6: 286-293.
- [16] Ibáñez J J, Pérez-Gómez R, San José F. The spatial distribution of soils across Europe: A fractal approach [J]. *Ecological Complexity*, 2009, 6: 294-301.
- [17] Ibáñez J J, Krasilnikov P V, Saldaña A. Archive and refugia of soil organisms: Applying a pedodiversity framework for the conservation of biological and non-biological heritages [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2012, 49: 1 267-1 277.
- [18] Ibáñez J J, Zinck J A, Dazzi C. Soil geography and diversity of the European biogeographical regions [J]. *Geoderma*, 2013, 192: 142-153.
- [19] Ibáñez J J, Bockheim J G. Pedodiversity [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [20] Phillips J D. Divergent evolution and the spatial structure of soil landscape variability [J]. *Catena*, 2001, 43: 101-113.
- [21] Phillips J D. The relative importance of intrinsic and extrinsic factors in pedodiversity [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91: 609-621.
- [22] Phillips J D, Marion D A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas [J]. *Geoderma*, 2005, 124: 73-89.
- [23] Phillips J D, Marion D A. Soil geomorphic classification, soil taxonomy, and effects on soil richness assessments [J]. *Geoderma*, 2007, 141: 89-97.
- [24] Guo Y Y, Gong P, Amundson R. Pedodiversity in the United

- States of America [J]. *Geoderma*, 2003, 117: 99-115.
- [25] Guo Y Y, Amundson R, Gong P, *et al.* Taxonomic structure, distribution, and abundance of the soils in the USA [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67: 1 507-1 516.
- [26] Nizeyimana E L, Petersen G W, Imhoff M L, *et al.* Assessing the impact of land conversion to urban use on soils with different productivity levels in the USA [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 391-402.
- [27] Amundson R, Guo Y Y, Gong P. Soil diversity and land use in the United States [J]. *Ecosystems*, 2003, 6: 470-482.
- [28] McBratney A, Minasny B. On measuring pedodiversity [J]. *Geoderma*, 2007, 141: 149-154.
- [29] Minasny B, McBratney A B, Hartemink A E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base [J]. *Geoderma*, 2010, 155: 132-139.
- [30] Petersen A, Gröngroft A, Michlich G. Methods to quantify the pedodiversity of 1 km² areas—results from southern African drylands [J]. *Geoderma*, 2010, 155: 140-146.
- [31] Falcucci A, Maiorano L, Boitani L. Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation [J]. *Landscape Ecology*, 2007, 22: 617-631.
- [32] Costantini E A C, L' Abate G. The soil cultural heritage of Italy: Geodatabase, maps, and pedodiversity evaluation [J]. *Quaternary International*, 2009, 209: 142-153.
- [33] Giuseppe L P, Vanessa P, Carmelo D. Is land-use change a cause of loss of pedodiversity? The case of the Mazzarrone study area, Sicily [J]. *Geomorphology*, 2011, 135: 332-342.
- [34] Yabuki T, Matsumura Y, Nakatani Y. Evaluation of Pedodiversity and Land Use Diversity in Terms of the Shannon Entropy [EB/OL]. (2014.01.29) [2009-05-19]. <http://cdsweb.cern.ch/record/1178038>.
- [35] Toomanian N, Jalalian A, Khademi H, *et al.* Pedodiversity and pedogenesis in Zayandeh-rud Valley, Central Iran [J]. *Geomorphology*, 2006, 81: 376-393.
- [36] Gong Zitong, Zhang Ganlin. Chinese soil taxonomy: A milestone of soil classification in China [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2006, (5): 293-296. [龚子同, 张甘霖. 中国土壤系统分类: 我国土壤分类从定性向定量的跨越 [J]. 中国科学基金, 2006, (5): 293-296.]
- [37] Zhang Xuelei, Chen Jie, Gong Zitong. What to do in China after a review of researches practices on pedodiversity in Europe and America [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (5): 1 063-1 072. [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 [J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1 063-1 072.]
- [38] Sun Yanci, Zhang Xuelei, Chen Jie, *et al.* Pedodiversity: Its concept, methodology and research practice [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 954-958. [孙燕瓷, 张学雷, 陈杰, 等. 土壤多样性的概念、方法与研究进展 [J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 954-958.]
- [39] Chen Jie, Zhang Xuelei, Gong Zitong, *et al.* Pedodiversity: A controversial concept [J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16 (2): 189-193. [陈杰, 张学雷, 龚子同, 等. 土壤多样性的概念及其争议 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 189-193.]
- [40] Tan Manzhi, Zhang Xuelei, Chen Jie, *et al.* A measurement of pedodiversity by using 1: 1M SOTER database of Shandong Province [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 2002, 33(4): 422-427. [檀满枝, 张学雷, 陈杰, 等. 山东省 1: 100 万 SOTER 数据库支持下土壤多样性的初步测度 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2002, 33(4): 422-427.]
- [41] Tan Manzhi, Zhang Xuelei, Chen Jie, *et al.* Analysis of pedodiversity based upon a provincial SOTER database—A case study from Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2): 85-89. [檀满枝, 张学雷, 陈杰, 等. SOTER 数据库支持下以地形为基础的土壤多样性分析——以山东省为例 [J]. 土壤通报, 2003, 34(2): 85-89.]
- [42] Tan Manzhi, Yan Wujiu, Zhang Xuelei, *et al.* Study on spatial variability of the soils in Shandong Province based on pedodiversity approach [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2004, 27(2): 200-203. [檀满枝, 阎伍玖, 张学雷, 等. 基于多样性理论的山东省土壤空间可变性研究 [J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2004, 27(2): 200-203.]
- [43] Tan M Z, Zhang X L, Chen J, *et al.* Pedodiversity: A case study based on 1: 1 million scale SOTER of Shandong Province, China [J]. *Pedosphere*, 2003, 13(3): 219-226.
- [44] Chen Jie, Zhang Xuelei, Zhao Wenjun, *et al.* Pedodiversity and its measurement—A case study from Hainan Province focused on parent rock-dependent soil variability [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(2): 145-151. [陈杰, 张学雷, 赵文君, 等. 土壤多样性及其测度——以海南岛不同母岩上发育的土壤为例 [J]. 地理学报, 2001, 21(2): 145-151.]
- [45] Zhang Xuelei, Chen Jie, Zhang Ganlin. Landform based pedodiversity of some soil properties in Hainan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 839-844. [张学雷, 陈杰, 张甘霖. 海南岛不同地形上土壤性质的多样性分析 [J]. 地理学报, 2003, 58(6): 839-844.]
- [46] Zhang Xuelei, Chen Jie, Zhang Ganlin, *et al.* Soil parent material based geomorphic diversity in Hainan Island, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 170-175. [张学雷, 陈杰, 张甘霖, 等. 海南岛成土母质的地形多样性分析 [J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 170-175.]
- [47] Zhang Xuelei, Chen Jie, Zhang Ganlin. Landform-based pedodiversity of some soil chemical properties in Hainan Island, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1 368-1 372. [张学雷, 陈杰, 张甘霖. 海南岛不同地形上某些土壤化学性质的多样性分析 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1 368-1 372.]
- [48] Zhang Xuelei. Pedodiversity: An opportunity for soil geographic studies [J]. *Soils*, 2014, 46(1): 1-6. [张学雷. 土壤多样性: 土壤地理学研究的契机 [J]. 土壤, 2014, 46(1): 1-6.]
- [49] Tan Manzhi, Chen Jie, Zhang Xuelei, *et al.* Impacts of urban expansion on quantity and quality of soils in Nanjing in the past twenty years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 896-

903. [檀满枝, 陈杰, 张学雷, 等. 南京市近 20 年城镇用地扩展对土壤资源数量和质量的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 896-903.]
- [50] Tan Manzhi, Chen Jie, Zhang Xuelei. Monitoring of urban expanding of Nantong city by remote sensing in the last 20 years [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 32-35. [檀满枝, 陈杰, 张学雷. 近 20 年来南通市区域城镇用地扩展遥感监测[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 32-35.]
- [51] Sun Yanci, Zhang Xuelei, Chen Jie. Impact of urbanization on pedodiversity in Suzhou area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2 060-2 065. [孙燕瓷, 张学雷, 陈杰. 城市化对苏州地区土壤多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2 060-2 065.]
- [52] Sun Yanci, Zhang Xuelei, Cheng Xunqiang, et al. Gray correlative analysis of the impact from growing urbanization process on pedodiversity in Nanjing area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 311-318. [孙燕瓷, 张学雷, 程训强, 等. 城市化对南京地区土壤多样性影响的灰色关联分析[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 311-318.]
- [53] Wang Hui, Zhang Xuelei, Zhang Wei, et al. Composition and nested analysis of pedological assemblages in Nanjing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 220-227. [王辉, 张学雷, 张薇, 等. 南京市土壤集合组成极其嵌套性分析[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 220-227.]
- [54] Wang Hui, Zhang Xuelei, Chen Jie. Nested subset: Discussion on its possible use in pedodiversity analysis [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(4): 776-781. [王辉, 张学雷, 陈杰. 嵌套子集: 引入土壤多样性研究的讨论[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 776-781.]
- [55] Wang Hui, Zhang Xuelei, Zhang Wei, et al. Nested subset method-based analysis of spatial and temporal change in landuse in Nanjing city under its growing urbanization [J]. *Soils*, 2007, 39(3): 421-427. [王辉, 张学雷, 张薇, 等. 基于嵌套子集方法对南京市城镇化用地时空变化分析[J]. 土壤, 2007, 39(3): 421-427.]
- [56] 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 [J]. *Catena*, 2007, 69: 16-30.
- [57] Zhang Xuelei, Wang Hui, Zhang Wei, et al. Comparison of diversity characteristics between pedological and biological taxonomies [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 1-8. [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[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 1-8.]
- [58] Guo Hui, Bi Rutian. Soil diversity studies on based on the different land utilization—Taking Yongji City as an example [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition)*, 2009, 29(1): 77-80. [郭慧, 毕如田. 以土地利用为基础的土壤多样性研究——以永济市为例[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 77-80.]
- [59] Bi Rutian, Du Jiaying, Chai Yafei. A study on soil diversity in Sushui River based on the DEM [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(2): 266-270. [毕如田, 杜佳莹, 柴亚飞. 基于 DEM 的涑水河流域土壤多样性研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 266-270.]
- [60] Liu Hongpeng, Jiang Ping'an, Wu Hongqi, et al. Studies on soil diversity in Lop Nor Lake area [J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2011, 48(4): 707-711. [刘洪蓬, 蒋平安, 武红旗, 等. 罗布泊地区土壤多样性研究[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(4): 707-711.]
- [61] Gao Fengjun, Zhang Jiaen, Guo Zhixing. Research progress on theory and practice of pedodiversity [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012, (2): 1-7. [高凤君, 章家恩, 郭治兴. 土壤多样性研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2012, (2): 1-7.]
- [62] Peng Yue, Wang Jianli, Wei Hong. Research on the soil erosion landscape heterogeneity of different soil types in Three Gorges Reservoir (Chongqing) [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(5): 7-12. [彭月, 王建力, 魏虹. 三峡库区重庆段不同土壤类型土壤侵蚀景观异质性分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 7-12.]
- [63] Wang Zifang, Qu Shuangrong, Li Yangbing, et al. Research on land use pattern diversity of different soil types in Chongqing karst area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 154-156, 196. [王子芳, 屈双容, 李阳兵, 等. 重庆岩溶地区不同土壤类型的土地利用多样性分析[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 154-156, 196.]
- [64] Shao Jing'an, Li Yangbing, Meng Yueling, et al. Pedodiversity in karst area of Chongqing, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2 048-2 058. [邵景安, 李阳兵, 孟月玲, 等. 重庆岩溶区土壤景观多样性[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2 048-2 058.]
- [65] Duan Jinlong, Zhang Xuelei. Correlative evaluation of pedodiversity and land use diversity based on Shannon entropy [J]. *Acta Pedodiversity Sinica*, 2011, 48(5): 893-903. [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[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 893-903.]
- [66] Duan Jinlong, Zhang Xuelei. Comparison of pedodiversity and land use diversity correlative analysis between typical provincial capitals and counties in east and central China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(2): 195-202. [段金龙, 张学雷. 中国中、东部典型省会和县域土壤与土地利用多样性关联的对比研究[J]. 地理科学, 2013, 33(2): 195-202.]
- [67] Duan J L, Zhang X L. Correlative comparison of pedodiversity and land use diversity between case areas from the developed east and less developed central China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(6): 1 101-1 116.
- [68] Duan Jinlong, Zhang Xuelei. Correlative analysis of the diversity patterns of regional surface water, NDVI and thermal environment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2 812-2 820. [段金龙, 张学雷. 区域地表水体、归一化植被指数与热环境多样性格局的关联分析[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2 812-2 820.]
- [69] Duan Jinlong, Zhang Xuelei, Wu Qiang. Regional pedodiversity—its pattern, evaluation and significance—A case study of He'nan

- Province [C] // Soil Science Society of China. The Academic Seminar on Soil Science for the Future and the 9th Cross-Strait Symposium on Soil & Fertilizer (lower volumes) . Chengdu: Publishing House of Electronics Industry ,2012: 1 681-1 689. [段金龙, 张学雷, 吴强. 区域土壤多样性的格局、评价与意义——以河南省为例[C] //中国土壤学会. 中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集: 面向未来的土壤科学(下册). 成都: 电子科技出版社, 2012: 1 681-1 689.]
- [70] Duan Jinlong ,Zhang Xuelei. Correlative analysis of pedodiversity and spatial distribution of water body diversity at different scales in Central and East China[J]. *Advances in Water Science* ,2012 , 23(5) : 635-641. [段金龙, 张学雷. 中国中、东部典型样区土壤和水体多样性关联分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(5) : 635-641.]
- [71] Duan Jinlong , Qu Yonghui , Zhang Xuelei. Correlative analysis between surface water spatial distribution diversity and pedodiversity [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* ,2013 ,44(6) : 110-116. [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[J]. 农业机械学报, 2013 ,44(6) : 110-116.]
- [72] Qu Yonghui , Zhang Xuelei , Duan Jinlong. Spatial variation of land use diversity patterns and its correlative analysis for the case areas in the central He'nan Province [J]. *Journal of Anhui Agricultural University* ,2014 ,41(2) : 1-5. [屈永慧, 张学雷, 段金龙. 豫中典型样区土地利用多样性的空间分异及关联分析[J]. 安徽农业大学学报, 2014 ,41(2) : 1-5.]
- [73] Zhong Guomin , Zhang Xuelei , Duan Jinlong , *et al.* Evaluation and correlative analysis of pedodiversity and land use diversity in Zhengzhou [J]. *Chinese Journal of Soil Science* ,2013 ,44(3) : 513-521. [钟国敏, 张学雷, 段金龙, 等. 郑州市土壤多样性和土地利用多样性研究及关联分析[J]. 土壤通报, 2013 , 44(3) : 513-521.]
- [74] Fu Bojie , Xu Yanda , Lü Yihe. Scale characteristics and coupled research of landscape pattern and soil and water loss [J]. *Advances in Earth Science* ,2010 ,25(7) : 673-681. [傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法[J]. 地球科学进展, 2010 ,25(7) : 673-681.]
- [75] Wang Xiaoke , Ouyang Zhiyun , Ren Yufen , *et al.* The monitoring system for long-term urban ecosystem study in USA and China [J]. *Advances in Earth Science* ,2014 ,29(5) : 617-623. [王效科, 欧阳志云, 任玉芬, 等. 中美城市生态系统长期监测的内容和方法[J]. 地球科学进展, 2014 ,29(5) : 617-623.]

Application and Development of Studies on Pedodiversity Theory and Methodology in China

Duan Jinlong^{1 2} , Zhang Xuelei² , Li Weidong¹ , Li Bin¹

(1. College of Information Science and Engineering , He'nan University of Technology Zhengzhou 450001 , China;
2. Institute of Natural Resources and Eco-environment , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China)

Abstract: As one of the most recently developed research field in soil geography , pedodiversity theory with its methodology is widely spread and getting more attention at home and abroad due to its application in quantitatively describing the spatial variability and distribution pattern of regional soil resources. In this paper , after a brief review of the emergence and development process of pedodiversity in foreign countries , an intensive research has been made in analyzing the development process in the past 15 years of pedodiversity studies in China before summarizing the development characteristics and trends of Chinese pedodiversity research. In recent years , pedodiversity studies in China have combined pedodiversity with many different elements such as land use , nested analysis , urbanization process and water resources , making this research field more open and practical. It is believed that the Chinese pedodiversity research could be divided into a causation and exploration period and an extended application period due to their differences on research period , content and purpose which the first period is from 2001 to 2005 and second from 2005 to now. And besides the classic diversity measurement methods , such as richness index , Shannon entropy and Pielou index , the new proposed index of soil spatial distribution diversity could provide an important data supplement for the classic methodology. Therefore , the pedodiversity topic still has strong and broad application space and development prospects in the soil geography and other related subjects.

Key words: Shannon entropy; Land use; Spatial distribution; He'nan Province; Jiangsu Province.