

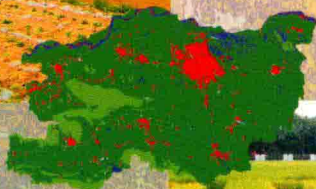
由河南省科技著作项目资助出版

Diversity
the Dist

Correlative Analysis for
r-Soil Resources

水土资源分布的多样性格局 与关联性分析

段金龙 张学雷 著



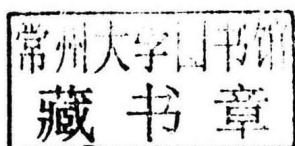
中原出版传媒集团
大地传媒

 河南科学技术出版社

由河南省科技著作项目资助出版

水土资源分布的多样性格局 与关联性分析

段金龙 张学雷 著



河南科学技术出版社

· 郑州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

水土资源分布的多样性格局与关联性分析/段金龙, 张学雷著. —郑州: 河南科学技术出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5349-8468-6

I. ①水… II. ①段… ②张… III. ①水资源-资源分布-研究②土地资源-资源分布-研究 IV. ①TV211②F301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 282858 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65737028 65788613

网址: www.hnstp.cn

责任编辑: 申卫娟

责任校对: 马晓灿

封面设计: 苏 真

版式设计: 栾亚平

责任印制: 张 巍

印 刷: 河南新华印刷集团有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 8.25 字数: 200 千字

版 次: 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

前言

水资源和土壤资源同为维持人类生产生活得以正常运行的基础物质资源类型，且两者之间具有密切联系。在当今城市化高速发展的大背景下，人类对水土资源的合理利用面临愈发严峻的挑战，水土资源的短缺和不均衡分布也成为制约人与自然和谐相处的根本因素之一。

为探索水土资源的空间分布特征及其内在联系，本书以中国中部河南省和东部江苏省的典型样区为例，基于土壤地理学研究领域前沿性的土壤多样性理论和方法，对一种最新的土壤多样性计量方法进行了改进，开创性地将其引入以水土资源为主的资源分布特征评价中，深入分析了不同资源类型的时空变化特征、多样性格局和它们在地理分布上的内在联系，以期为水土资源的可持续合理利用提供科学依据，并为资源研究对象空间分布特征的定量化表达提供一种崭新的思路和方法。本书还以若干实例，对资源环境遥感技术在水土保持评价工作中的应用，进行了分析并提出建议。

为探索水土资源发生关联的本质及内涵，首先对水资源、土壤资源、植被资源、土地利用、热环境分布等进行了概括和总结，对传统相关研究方法的局限性进行了初步分析并阐述了引入多样性研究的意义。通过对以河南省为例的土壤多样性分布格局进行深入分析，明确了水土资源关联性分析的理论和方法基础，研究证明土壤资源是一种非连续性分布的自然资源类型，河南省具有 8 类稀有土壤类型和 7 类代表性土壤类型，其中的稀有土壤类型处于实际损耗或消失的边缘，需要受到重点保护。为获取地表水资源分布信息，首先对研究区进行土地利用监督分类，然后基于互熵概念计算并评价了土地利用多样性和土壤多样性之间的交互关系。研究发现并验证了土壤多样性的研究方法和理论适用于其他资源类型的空间分布特征评价，土地利用构成组分多样性指数能够反映研究区的城市化程度，而土地利用空间分布多样性指数为传统的面积统计方法提供了重要的数据补充，土壤和土地利用之间具有明显联系。本书还以两个案例为实证，提出了水体空间分布多样性的定义并将其作为评价地表水体空间分布离散性的重要参数，通过土壤多样性和水体空间分布多样性的关联性分析，探索了水土资源在地理分布上的内在联系，为土壤形成中水要素所起的作用分析提供了数据支持。本书的重要发现之一是地表水资源的高离散性分布特征往往造成更加单一的区域土壤类型构成，研究认为造成这一现象的根本原因是水体的流动性特征所造成的不同土壤类型间物理化学性质的趋同性；水土资源的分布均具有一定程度的分形结构特征，且两者之间的内在联系在大尺度和纯自然状态下体现得更为明显。为验证本书所提出



的“水体空间分布多样性”这一概念的实用性和科学性，将其和地表水资源分布特征评价中广泛使用的河网密度分析法进行了比较。研究表明，在评价复杂水体类型时，水体空间分布多样性的表现明显优于河网密度；当研究区面积相等时，河网密度和水体空间分布多样性之间的联系视研究区内地表水资源分布性质而定，在湖泊稀缺地区，两者之间一般呈明显的正相关关系，而在湖泊富集地区，两者之间一般呈明显的负相关关系。研究还将土壤多样性引入到和水土资源有密切联系的植被资源和热环境分布特征评价中，作为本书内容的外延探索。研究发现，土壤多样性理论和方法在其他资源对象的空间分布离散性评价中具有广阔的应用前景，而多样性研究中体现出的“高水体或高植被分布离散性能够带来更佳的热环境分布格局”这一结论，也为传统的面积统计方法提供了重要的数据支持。本书最后还对资源空间分布多样性的数值影响因素进行了深入分析，并通过实例研究阐述了空间分布多样性评价中合理网格尺度的设置准则，以期空间分布多样性评价方法的后续应用提供理论和方法指导。研究认为，当资源对象分类单元数目很多时，所选网格面积应至少小于或接近资源对象分类中面积最小分类单元的面积，而当分类单元数目很少或当研究对象为水体时，应控制研究区内网格数在1 000个左右为宜。

在本书的撰写过程中，需要感谢郑州大学宋轩、张成才、周振红、郭同德、郭恒亮、陈杰、王宗敏、杨海波、田智慧、吴泽宁、李宗坤、刘泽明、王秀林、杜丽萍、关绍康、梁惠、刘素娟等多位老师和领导，感谢郑州大学已毕业和仍然在读的研究生郭王、张杰、邱帅、崔剑、邱海波、李梅、冯婉婉、钟国敏、齐少华、屈永慧、任圆圆、赵斐斐等多位同学，感谢河南工业大学信息科学与工程学院的张德贤老师，感谢河南省农业科学院的武继承老师，在诸位老师、领导、同学们的帮助和支持下，使本书的研究和撰写工作顺利实施。

本专著中涉及的研究方法、研究资料、研究成果等内容主要来自3项国家自然科学基金面上项目（项目编号40671012，项目名称“高强度人类活动背景下区域土壤多样性动态变化及其土壤资源空间格局演变指示”；项目编号41171177，项目名称“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”；项目编号41571208，项目名称“中国中、东部样区土壤多样性与地多样性格局的关联分析”）的支持与资助。在书稿的后续组织和整理阶段还得到1项“河南省教育厅自然科学项目”（项目编号15A416002，项目名称“区域地表水体空间分布对粮食生产的影响分析”）、1项“河南工业大学高层次人才科研基金项目”（项目编号2014BS017，项目名称“以水、土为代表的资源空间分布多样性研究”）以及1项横向课题（项目名称“河北省保定市、承德北区热电堆项目洪水分析研究”）的支持。

由于本书提出的涉及水土资源关联性的多样性评价方法等相关研究思路仍属起步阶段，作者还缺乏足够的经验，文中不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2016年6月

作者联系方式：段金龙 215385212@qq.com

张学雷 ZXLzzu@zzu.edu.cn

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景、目的和意义	1
1.2 研究综述	2
1.2.1 土壤多样性研究综述	3
1.2.1.1 西班牙研究进展	3
1.2.1.2 美国研究进展	5
1.2.1.3 其他国家研究进展	6
1.2.1.4 国内研究进展	7
1.2.2 水资源分布研究综述	10
1.2.3 其他研究要素研究综述	11
1.3 研究方法和内容	12
1.3.1 研究区概况	12
1.3.2 研究方法	13
1.3.2.1 研究工作环境、使用软件和数据来源	13
1.3.2.2 土壤多样性计算	14
1.3.2.3 土地利用分类	16
1.3.2.4 归一化植被指数提取	17
1.3.2.5 陆面温度反演	18
1.3.2.6 水资源、植被和热环境空间分布多样性计算	18
1.3.2.7 资源分布关联性分析	19
1.3.3 研究内容、技术路线和章节安排	20
1.3.3.1 研究内容	20
1.3.3.2 研究技术路线	20
第 2 章 水土资源和环境相互关系的基本架构与联系	22
2.1 中、东部几种主要资源对象分布格局对比	23
2.1.1 地表水资源	23
2.1.2 土壤资源	23
2.1.3 土地利用、植被和热环境	24



2.2	不同资源对象关联性分析	26
2.2.1	水资源和土壤	26
2.2.2	水资源和植被	28
2.2.3	水资源和热环境	28
2.2.4	土壤和植被	29
2.2.5	土壤和土地利用	29
2.2.6	植被和热环境	30
2.2.7	土地利用和热环境	30
2.3	研究中存在的问题和解决方法	32
2.3.1	存在的问题	32
2.3.2	引入多样性的意义	33
第3章	水土资源关联分析的理论基础——土壤多样性格局分析	34
3.1	土壤资源保护	34
3.1.1	土壤资源保护的内涵	34
3.1.2	修复土壤资源的途径	34
3.2	土壤多样性在土壤资源保护中的应用实例	35
3.2.1	材料和方法	36
3.2.2	初步结果和分析	37
3.2.3	稀有土壤和代表性土壤评价	42
3.2.4	土壤组成的分区域评价	43
第4章	水土资源关联分析的外在表征——土地利用多样性格局分析	46
4.1	中国中、东部典型样区土地利用分析	46
4.1.1	土地利用分类过程	46
4.1.1.1	研究区概况	46
4.1.1.2	数据来源	47
4.1.1.3	土地利用分类体系的构建和研究方法	47
4.1.2	土地利用多样性分析	47
4.1.2.1	土地利用构成组分多样性	47
4.1.2.2	土地利用空间分布多样性	50
4.2	中国中、东部典型样区土壤多样性分析	51
4.2.1	土壤构成组分多样性	51
4.2.2	土壤空间分布多样性	51
4.3	土壤和土地利用多样性的关联性分析	54
第5章	水土资源关联分析的内涵探索——地表水和土壤多样性关联分析	57
5.1	材料和方法	57
5.1.1	研究区概况和数据来源	57
5.1.2	研究方法	59
5.2	结果和分析	66



5.2.1	案例 5-1 结果和分析	66
5.2.1.1	水体空间分布多样性和土壤构成组分多样性	66
5.2.1.2	分区域水体空间分布多样性和土壤构成组分多样性	68
5.2.2	案例 5-2 结果和分析	71
5.2.2.1	水体空间分布多样性和土壤构成组分多样性	71
5.2.2.2	分区域水体空间分布多样性和土壤构成组分多样性	73
第 6 章	水体空间分布多样性的实用性与科学性验证	76
6.1	材料和方法	76
6.1.1	研究区概况和数据来源	76
6.1.2	研究方法	78
6.2	结果和分析	78
6.2.1	案例 6-1 结果和分析	78
6.2.1.1	水体空间分布多样性和河网密度	78
6.2.1.2	分区域水体空间分布多样性和河网密度	80
6.2.2	案例 6-2 结果和分析	82
6.2.2.1	水体周长及总面积、河流密度和水体空间分布多样性的 关系	84
6.2.2.2	去除特殊分区后水体周长及总面积、河流密度和水体空间 分布多样性的关系	85
第 7 章	水土资源关联分析的外延探索——地表水、植被和热环境多样性关联 分析	90
7.1	材料和方法	90
7.1.1	研究区概况和数据来源	90
7.1.2	研究方法	90
7.2	结果和分析	91
7.2.1	郑州市地表水体分布	91
7.2.2	郑州市归一化植被指数分布及其分级	92
7.2.3	郑州市陆面温度分布及其分级	92
7.2.4	郑州市地表水体、归一化植被指数分级和陆面温度分级的 面积关联性分析	94
7.2.5	郑州市地表水体、归一化植被指数分级和陆面温度分级的空间 分布多样性分析	94
第 8 章	资源空间分布多样性的影响因素分析	96
8.1	资源空间分布多样性的影响因素	96
8.1.1	资源对象的实际分布特征影响	96
8.1.2	资源斑块的空间位置影响	97
8.1.3	异网格尺度下的资源对象空间分布多样性	98
8.2	异网格尺度下的资源分布多样性——研究实例	99



8.2.1	案例 8-1	99
8.2.1.1	材料和方法	99
8.2.1.2	结果和分析	101
8.2.2	案例 8-2	103
8.2.2.1	材料和方法	103
8.2.2.2	结果和分析	107
第 9 章	结论和展望	109
9.1	主要结论	109
9.2	研究特色和创新点	110
9.3	研究中存在的问题和展望	111
参考文献		112

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景、目的和意义

水是生命之源，土是万物之本，两者同为维持地球生物圈层正常运行的物质基础，且两者之间具有密切联系。在人类社会的发展过程中，水土资源的开发程度不断加深，随着第二次世界大战后世界人口的爆炸性增长^[1]和各个国家及地区城市化进程的不断推进，人类对水土资源的合理利用面临愈发严峻的挑战，水土资源的短缺和不均衡分布也严重制约了社会经济的发展。

水是人类赖以生存和发展的不可或缺的物质资源之一，人类的生产生活、工业、农业、服务业等都直接或间接和水发生关系。地球表面超过 70% 的面积为海洋所覆盖，但是其中的淡水资源十分有限，而且在空间上分布不均。当今世界水资源现状堪忧，水资源持续短缺、水污染严重、水环境恶化等一系列问题正愈发凸显；需求日益增长，快速城市化和气候变化对全球水资源供应造成越来越大的压力^[2]。中国的人均水资源量只有 $2\ 100\text{m}^3$ ，仅为世界人均水平的 28%，比人均耕地占比还要低 12 个百分点^[3]。当前中国的水资源危机还重点体现在水资源的不均衡分布上，分为空间上的不均衡分布和时间上的不均衡分布，总体上呈现出“南多、北少，东多、西少，夏秋多、冬春少”的分布特点。

土壤资源是一种重要的固定性自然资源，是陆地生态系统中最根本的构成要素。中国是世界上人口最多的农业大国，人地矛盾突出，全国有 14 个土纲、39 个亚纲、138 个土类和 588 个亚类^[4]，目前中国人均耕地面积少、土壤资源空间分布不平衡、后备土壤资源匮乏、土壤退化现象严重，这都严重制约了当前社会和经济的发展，并加剧了粮食安全问题的严峻性。中国的西北和西南地区地广人稀，东部地区经济发达、人口密集，人均耕地占有量逐年降低；旱地中的水浇地只占耕地总面积的 17.2%，而地力贫瘠的坡耕地却占耕地总面积的 35.1%，这些现象均为中国土壤资源空间分布不平衡的具体表现^[5]。同时，目前大量的优质土壤资源被新兴城镇、工业区占据，很多地方性土壤类型（endemic soil）都处于实质性损耗或灭绝的危险边缘，对土壤多样性（pedodiversity）进行保护迫在眉睫^[6, 7]。



对水资源和土壤资源之间的关系进行研究具有重要意义,以往研究中涉及了诸如土壤墒情^[8]、土壤水运动^[9]、土壤水资源^[10]、土壤溶液^[11]、土壤退化、水土污染、水土流失^[12]等内容,而这些研究也从不同角度阐述了水土资源间的复杂联系。在城市化进程不断推进的大背景下,人类施加于某一种自然资源要素的影响往往会造成其他资源要素的改变,为了探索此类变化模式,本书选取中国中部河南省和东部江苏省的典型区域作为主研究区,通过对土壤多样性的深入分析,并将其理论和研究方法引入不同土地利用类型的分布特征评价中,进而推广到对地表水资源、植被覆盖、热环境等诸多资源要素的空间分布离散性评价中,探索并评价这些要素在数量组成上和空间分布上的时空变化特征,深入分析不同区域、不同政策导向和不同城市化发展程度背景下上述要素间的关联程度,以期为水土资源的可持续利用和生态环境保护提供科学依据。

1.2 研究综述

本书以土壤多样性最新研究方法为主要理论基础,并将其引入水土资源的管理和评价中,以空间分布多样性指数作为研究对象空间分布离散性的主要评价指标。多样性的概念和分析方法起源于信息论领域,最先用于计算生物的物种分布和遗传变异特征。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量化研究深度,早在 20 世纪 70 年代,苏联学者 Fridland^[13]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^[14-16]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。土壤多样性作为 20 世纪 90 年代以后土壤科学研究的重要课题,日益受到国际间各方面的重视。进入 21 世纪后,土壤多样性的概念和研究方法逐渐为人所知并被各国的土壤学家所使用。在不同尺度下,各国学者基于各地数据进行了土壤多样性相关研究,在研究中结合了诸如土地利用方式、嵌套性分析、河流阶地、土壤发育等不同要素,从而使土壤多样性这一研究领域变得更为广阔。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,土壤多样性可以量化地描述土壤的空间变异性 (spatial variation) 和不同土壤类型的分布格局问题,为土壤 (土地) 资源的保护和合理利用提供了理论及数据支持。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,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^[14]提出土壤多样性的概念至今,经过 20 多年的发展,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。本章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,对土壤多样性研究、水资源分布研究、植被覆盖分布研究、区域热环境分布研究等内容的发展特点和趋势进行总结,以期为国内土壤多样性的进一步研究、不同资源类型的分布特征评价及其关联性分析、自然资源的可持续合理利用,提供一整套理论及研究方法。

1.2.1 土壤多样性研究综述

1.2.1.1 西班牙研究进展

土壤多样性研究始于西班牙, Ibáñez 等在该领域的研究一直处于国际领先水平。20 世纪末至 21 世纪初, Ibáñez 等^[17, 18]不断完善土壤多样性的相关研究方法并逐步将之应用于实践,进行了一系列的开创性研究^[19, 20],他们就土壤多样性的概念及其测定方式进行了讨论,还分析了土壤多样性和生物多样性之间的联系,并认为多样性概念在其他学科中同样可作为群体连续体(continuum)变异性(variability)分析的有效方法;他们还还对土壤分类的方法进行了创新性研究,认为土壤是一个复杂的开放式系统,是关于生物圈、岩石圈、大气圈和水圈的集合自然体,而作为自然景观体,土壤学的研究内容涵盖了完整的和量化的分类学、形态学、起源发生学等相关学科。为了应对现实研究中出现的一系列问题, Ibáñez 等^[20]认为必须改变土壤的概念,同时进行更加科学和实用的土壤分类,并获取更多更精确的土壤调查信息。所有自然界的分类系统都将连续体分为若干种类,并且所有自然资源的分类问题在概念上都具有或多或少的相似性。在对比了美国农业部的土壤分类系统和生物分类系统以后, Ibáñez 等^[20]发现两者依照最大熵(MaxEnt)原则都具有相同的数学结构,研究还提出应当更加明确进行土壤分类的目的,并以此提高分类的实用性。研究发现,在很久以前人类就在不停地改变土壤,所以,现在的土壤景观跟纯粹的自然土壤相比,已经改变得太太多。这个过程被称为“土壤变异发生作用”(metapedogenesis),而正是它影响了土壤分类。

随着土壤多样性研究方法的逐步成熟,以 Ibáñez 等为首的西班牙学者在实践研究中不断拓宽多样性理论方法在土壤及其他相关学科中的研究领域,加入了诸如河流阶地^[21]、嵌套性分析^[22]、生态研究^[23]等多种研究要素进行综合分析,取得了一系列科研成果。如 Saldaña 等^[21]基于西班牙中部埃纳雷斯河河成阶地的土壤数据进行了相关研究,为了分析第四纪河谷的土被演化和丰富度-面积关系,将丰富度、多样性指数和拟合概率分布模型综合应用于土壤年代序列研究中,并基于不同的分类级别(类、亚类和土族)和诊断层分类计算了土壤多样性指数。研究发现:类和亚类的丰富度随阶地的增高而增加;分类分级越详细,土壤多样性的数值越大;土壤多样性随研究区面积的增加而增加;遗传土壤丰富度和遗传土壤多样性在该研究区中随地形表面景观年龄的增长而增加;土壤丰富度与面积之间的连接系数在中低阶地上符合对数函数曲线,在高阶地符合幂函数曲线,这与生态学中的物种丰富度与面积的连接性相似。Ibáñez 等^[22]在生物多样性相关研究的基础上对土壤集合和分类单元范围的规模分布进行了嵌套性分析。他们介绍了生态学中嵌套子集的概念并开创性地将其应用于土壤分类学研究中,使用 Atmar 和 Patterson 嵌套性计算程序在不同的尺度下对土壤数据集中的数据进行了分析。研究发现,基于土壤数据所得的诸如嵌套性(nestedness)、分类单元-范围规模分



布 (taxa-range size distribution) 和物种-面积关系 (species-area relationships) 等都具有尺度不变性, 这也与一些生态学家的结论相一致, 由此推论嵌套性分析对土壤分类研究同样适用。

近些年, Ibáñez 等逐步确立了土壤多样性的研究方法思路, 结合已经掌握的大量实验数据, Ibáñez 等分析了土壤多样性和生物多样性研究之间的异同^[24], 并开始分析土壤多样性研究中所体现出的一般性规律及其数学内涵^[25-29]。如 Ibáñez 等^[24]研究了生物分类学和土壤分类学的数学结构, 以实际数据驳斥了一些土壤学家的观念: 生物分类学是自然界的固有存在, 而土壤分类学是人工构造的。研究使用统计分布模型表明生物分类学和土壤分类学都符合指数定律 (power laws) 和维伯尔分布 (Weibull distribution), 它们的统计学表现很相似, 并且它们都遵循相同的数学模型, 同时两种分类学都表现出了多重分形 (multifractal) 结构。Caniego 等^[26]使用多重分形方法对全球尺度下土壤分类单元分布的自相似性 (selfsimilarity) 进行了研究, 基于联合国粮农组织土壤数据库中五大洲和全球数据, 计算了土壤分类单元丰富度分布的自相似性和 Rényi 频谱 (Rényi spectra)。研究认为, 自相似性应为土壤丰富度空间分布的共有性质, 分析表明全球尺度下土壤多样性分布的复杂特征符合明确的多重分形特征。多重分形参数可以用来作为土壤多样性的指标, 并在分析和表征多标度尺度下土壤发育的复杂性上具有应用前景。Ibáñez 等^[28, 29]着重分析了分形 (fractal) 在土壤分类和土壤空间分布中的应用, 他们认为分形思想广泛存在于不同分类学中, 各种分类系统具有相似的特征。研究引用了美国农业部土壤系统分类 (USDA soil taxonomy) 中存在的相同分形结构, 并指出多组数据间的关系都符合指数分布定律, 同时认为分形对象和指数定律具有数学结构上的尺度不变性。研究还认为, 很多自然资源分布图和土壤分类图一样, 都具有分形相似结构, 这种数学结构广泛存在于分类学家的脑海中。Ibáñez 等基于欧洲土壤数据库 (European Soil Database) 和土壤分类世界参考基准 (World Reference Base for Soil Resources) 中的土壤分类方法, 对欧洲大陆复杂的地表土壤系统中蕴含的分形结构进行了研究。研究观测了土壤分类单元分布的指数定律式样和土壤丰富度-面积关系。研究认为 45 类丰富度最高的土壤覆盖了欧洲陆地面积的 92%, 并使用三种数量级估算了每个土壤类型所处区域的计盒分形维数 (box-counting fractal dimension)。研究发现, 土壤的分布具有显著的标度行为 (scaling behavior), 同时欧洲大陆的土壤分布具有明显的分形结构。

在最近的报道中, Ibáñez 等^[30, 31]通过分析土壤多样性和生物多样性的交互关系, 强调了对两种多样性进行保护具有内在联系, 土壤多样性作为人类自然遗产 (natural heritage) 的重要组成部分, 应受到更加广泛的关注和保护。

通过对土壤多样性在西班牙的研究进展回顾总结出以下三个特点: 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研究分为三个主要阶段, 分别是 20 世纪末的探索期 (土壤多样性方法论的创立)、21 世纪初的应用期 (多研究区数据支持下的土壤多样性计算与评价以及跨学科的交叉性研究) 和近期的总结深化期 (土壤多样性的科学内涵分析); ③研究内容逐步深化, 综合了数学结构、地形地貌学、分类学等诸多要素, 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。

1.2.1.2 美国研究进展

美国在该领域的研究也处于国际领先水平,并具有自身特点。如 Phillips 等^[32-35]深入研究了土壤发生和土壤多样性的形成原因以及相关样区的土壤多样性现状,他们研究了土壤多样性产生的内外在因素,认为环境因素的变异性是影响成土作用的主要外因,土壤发生和土壤景观演化中的确定性混沌 (deterministic chaos)、动态不稳定性 (dynamical instability) 和自组织发散性 (divergent self-organization) 则是内因,而在大多数土壤景观中,内外因是互相联系的。研究基于土壤丰富度-面积连接关系提出了一个评估内外因相关性的方法,并基于北卡罗来纳州东部研究区的样本数目和土壤类型之间的幂函数关系,很好地表述了丰富度-面积关系。研究表明与可测差异性(地形差异、母质差异和植被、土地利用差异)的外在变异因素相比,相似景观单元内的内在变异因素对总体土壤多样性更具有决定性意义。Nizeyimana 等^[36]对美国的可生产土地和城市化进程之间的关系进行了研究,他们认为美国的可生产土地(耕地和经济作物用地等)正受到城市化进程的不断侵蚀与影响,这不断加重了粮食安全问题,这一研究反映了美国土壤多样性被人为影响的现状。该研究利用 GIS(地理信息系统)分析方法比较了美国单位面积下不同土壤生产力级别的土地转换为城市用地的比例。研究表明,目前美国的城市土地利用覆盖约占其国土面积的 3%,且主要由原先的中低等土壤生产力地区组成,只有 6%的城市化土地由高生产力土壤组成。然而,约占美国总面积的 3%的高生产力土壤土地,却比其他所有的土壤生产力分类具有更高的城市化水平(5%)。Guo 等^[37, 38]对美国的土壤分类体系和土壤多样性现状进行了分析,他们基于美国土壤地理数据库(STATSGO)对美国的土壤多样性进行了研究。评估了美国国内的土壤多样性指数,比较了美国农业部(USDA)自然资源保护服务(NRCS)地理区域之间的土壤多样性异同,探索了从土壤分类单元观测到的相对丰度背后可能存在的机制。结果表明,随着分类范畴从土纲降到土系,仙农熵多样性指数由于丰富度的大幅增加而增加。分类单元数目(S)与面积(A)之间的关系遵循公式 $S = cA^z$, 其中指数 z 表示土壤群落的分类丰富度值,并且随分类范畴由土纲到土系的改变而不断变化。他们还发现在更低的土壤分类级别上(特别是土系级),土壤分类单元数目随研究区面积的增加而不断增加,这表明美国的(很可能全球的)地方性土壤应当被重点保护。Amundson 等^[39]对美国的土壤多样性和土地利用方式进行了相关研究,他们认为土壤是陆地生态系统的动态组成部分,美国大范围的农业用地正不断转换为城市用地,而土壤对于全球的生物地球化学(biogeochemistry)和生态学具有重要作用,因此需要对城郊剩余的原状土(undisturbed soil)分布进行评估。他们利用 GIS 方法对美国的原状土和非原状土进行了定量分析,并发现美国的土壤类型有很大比例(4.5%)处于实质性损耗或灭绝的危险边缘,造成这一现象的原因是农业和城市化的综合影响。在国家农业带里,八成以上的土壤是低丰富度的自然形态,它们现在正受到严重影响(其中一半以上正由农业利用转变为城市利用)。他们认为,原状土给生态系统提供了服务,从而保证其得以运行,这还包括了与稀有或者濒临灭绝植物之间的复杂关系。原状土具有很多重要的已知和未知属性特征,为了保存完整的生物地理多样性(biogeodiversity),原状土应当受到更多的



保护。Bockheim^[40]对土壤的地方特殊性 (soil endemism) 和土壤发生学之间的关系进行了研究, 为了证实一种土壤是地方性的, 他们使用美国土壤调查特征描述数据 (NSS-CD), 对存在于不同州却拥有相似成土因素组合的土地进行了比较。研究发现, 在一个给定的气候类别 (Köppen-Trewartha 系统) 和植被型 (Bailey's 生态区域划分) 下出现了相似土族。通过使用美国土壤地理数据库中随机选择的基准土系 (benchmark soil series), 比较了同一土族中众土系的异同, 并且评价了按照成土因素贡献大小而造成的地方性特征。这些分析表明地方性土壤受局部母质 (例如火山灰、黏土、二氧化硅) 和地形 (例如封闭盆地) 的影响, 即隐域土 (intrazonal soil)。研究认为造成土壤缺乏发育完全剖面的原因, 是母质的年轻或母质的特殊情况。所以区域地带性土壤和隐域土一般都是地方特有的, 同时泛域土 (azonal soil) 趋于非特有。他们认为地方性这一概念对于测定稀有、独特和濒临灭绝的土壤具有重要作用。

与西班牙研究相比, 美国的土壤多样性研究层次性不明显, 不过这也和美国的广阔国土面积及从事该领域研究学者较多有关, 同时西班牙土壤多样性研究中新兴的分形理念, 目前在美国只在生态学研究中有使用^[41], 并未涉及土壤研究领域。但美国的土壤分类系统更为严谨和科学, 关于土壤分类学的研究更为深入, 土壤多样性研究也和土壤分类学和土地利用结合得更为紧密, 土壤多样性研究在美国具有更强的针对性、应用性和目的性。在文献的回顾中发现美国学者进行土壤多样性研究的一个很重要目的是保护原状土、地方性土壤、稀有土壤等, 这说明美国具有更强烈的土壤多样性保护意识。

1.2.1.3 其他国家研究进展

除了西班牙和美国以外, 土壤多样性在其他各国的应用近年来也时有报道。如澳大利亚学者 Minasny 等^[42]讨论了土壤多样性的分类方法。他们为了讨论分类学距离和土壤多样性的关系, 讨论了土壤资源世界参考基准 (WRB) 的分类学距离, 计算了 1:2500 万比例尺下世界土壤图的土壤多样性指数, 比较了传统的基于土壤个体丰富度的多样性与基于分类学距离的多样性。基于 WRB 土壤群中的优势种辨别, 获取了土壤群的分类学距离并绘制在特征空间中。利用这个信息, 世界土壤的平均分类学距离被计算出来。研究发现分类学距离平均值与气候或土壤分类之间的相关性很好, 而具有极端温度和降水条件下的区域土壤多样性最低。德国学者 Petersen 等^[43]分析比较了土壤多样性的不同量化方法, 他们基于南部非洲 16 个干旱地区 (每个地区 1 km²) 的田地和土壤实验室数据集, 分析比较了土壤多样性的不同量化方法。这三种量化方法为: 使用 WRB 土壤单元进行的分类学分类, 使用土壤生态型 (soil eco-types) 的参量分类和利用凸包算法 (convex hull algorithm) 进行“环境封装” (environmental envelopes) 变量值计算的分类方法。研究认为可变空间方法为多样性测量提供了一个有力的工具, 它不受类别大小和极限的影响, 也不受自相关模型的影响。意大利学者 Falcucci 等^[44]研究了意大利土地利用和土地覆盖式样的变化情况及它们和生物多样性保护之间的联系。研究认为土地利用和土地覆盖变化是造成生物多样性损失的最重要因素, 而地中海地区受人为干扰影响很严重。他们使用了 3 幅覆盖意大利半岛的土地利用和土地覆盖图, 以此来分析土地利用和土地覆盖的变化模式。研究发现集中的耕地区域土壤多样性减少较少, 而分散的广阔耕地区域减少显著。在同一时期里, 哺乳动物和鸟类符合同一相似模式,



森林鸟类、有蹄类和肉食动物增加,同时地中海区域的代表性物种增加。研究认为应该对地中海地区特有的森林和灌木加大自然保护力度,就像传统的耕作方法一样。在以后的自然保护努力中,应该考虑到在热点区域(特别是海岸地带)以后很可能会发生的社会政治过程和生态过程。Costantini 等^[45]基于地理数据库、地图和土壤多样性对意大利的土壤文化遗产进行了评价研究。研究认为土壤遗产类似于地质遗产,土壤具有遗传特性并且可以按照它们的“文化价值”进行分类。他们对意大利的土壤遗产进行了评价和分组,并开发出了相应软件收集管理这些信息,建立了独特的地理数据库,这些都可以应用于其他国家。研究认为土壤遗产包括:人为景观;决定全景舒适度的土壤景观;环境平衡破碎下的土壤景观;有利于特殊生态系统延续的土壤景观。多样性中的土壤遗产指数突出了意大利地中海地区的土壤具有更大的土壤遗产变异性。Giuseppe 等^[46]以西西里 Mazzarrone 研究区为例讨论了土地利用变化对土壤多样性的影响。日本学者 Yabuki 等^[47]对日本北海道 10 个城市的土壤多样性和土地利用多样性进行了相关研究,并建议利用信息论中的互熵(mutual entropy)概念来评价两者之间的关系。研究中使用的多样性评价公式经过了重新定义,可以更好地评价不同土壤分类单元及土地利用的空间离散性。伊朗学者 Toomanian 等^[48]对伊朗中部扎因代河谷的土壤多样性和成土作用进行了研究,评价了该地区的土壤异质性程度,发现用仙农熵评价土壤和土壤景观演化具有良好效果。研究使用地貌缩减规模分级法(geomorphic hierarchical down-scaling method),分解了以扎因代河谷为主要研究区的景观和景观分区的形成过程和形式。研究在土壤多样性评价中选取土族为基本分类单元,使用土壤多样性指数追踪了土壤和景观的演化趋势。分析了仙农熵和土壤丰富度随面积增加的变化函数之间的关系,以此来寻找基于不同地貌表面下复杂土壤特征上的土壤和景观演化作用。

除西班牙和美国外,土壤多样性研究在国外的发展规模有限,但都结合各自国家和地区实际情况进行了实践研究。通过回顾这些研究报告及成果,可以发现土壤多样性研究在国际上逐渐受到更多土壤、土地、环境等相关自然学科领域学者的重视,其研究规模不断扩大,研究内容不断丰富,研究层次不断加深。2013 年 4 月,由美国 CRC 出版的专著《土壤多样性 Pedodiversity》^[49],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 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 Feol、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 Phillips、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 Toomanian 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。

1.2.1.4 国内研究进展

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;中国的土壤分类系统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成为在国际土壤分类学领域享有极高声望的土壤分类系统^[50]，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^[51-53]为代表的土壤学家将土壤多样性研究引入中国，通过回顾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就进行了专题介绍^[49]。

21 世纪初期，以张学雷等为主的土壤学家基于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的尝试^[54-58]，而这些研究作为土壤多样性在中国的首批实践尝试，已被学界所认可并在土壤学研究中开创出一个新的研究专题。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。这些研究中，他们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）、仙农熵指数（Shannon Index）、均匀度指数等，对“土壤多样性”这一仍处于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，同时也列举了国外学术界相关学者对其理论 and 应用前景的不同观点和意见，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，而这也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。土壤多样性在中国的这一探索时期大致由 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。

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。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，结合国外最新研究进展，并基于中国土壤多样性研究基础，作为土壤地理学研究的新契机，该专题在国内迎来了一个新的发展时期，张学雷等学者将土地利用变化^[59]、城市化^[7]、嵌套子集^[60-63]等概念引入土壤多样性研究中，将单纯的土壤多样性研究和城市土地利用变化这一当今学术界热点问题相结合，在土壤多样性研究的基础上加入嵌套性理论的相关分析，这都拓宽了土壤多样性的研究领域和内容^[64]，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。比如该时期孙燕瓷等^[7, 59]深入分析了城市化对土壤多样性造成的影响，