

土壤特性的时空变异性 及其应用研究

刘继龙 马孝义 汪可欣 张振华 著

武汉工业学院图书馆



01382324



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

土壤特性的时空变异性 及其应用研究

刘继龙 马孝义 汪可欣 张振华 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书针对土壤特性具有时空变异性,以陕西杨凌和山东烟台为研究平台,利用传统统计学、地统计学、分形理论和土壤传递函数等方法,对土壤特性的时空变异性及其应用进行了研究。全书共分为八章,其内容分别是:土壤特性时空变异性的研究进展;土壤水盐的时空变异性研究;土壤基本物理特性的分形特征研究;土壤水分的垂直变化规律与转换研究;土壤粒径分布分形维数的分形特征及其应用研究;土壤水分特征曲线的分形特征及其应用研究;Green-Ampt入渗模型累积入渗量显函数的适用性研究;土壤入渗特性的分形特征与土壤传递函数研究。

本书可供从事农业水土工程、土壤物理学、精准农业及其他相关专业教学和科研等工作的读者借鉴与参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤特性的时空变异性及其应用研究 / 刘继龙等著
— 北京:中国水利水电出版社,2012.8
ISBN 978-7-5170-0129-4

I. ①土… II. ①刘… III. ①土壤学—研究 IV.
①S15

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第207225号

书 名	土壤特性的时空变异性及其应用研究
作 者	刘继龙 马孝义 汪可欣 张振华 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9印张 213千字
版 次	2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

作者简介

刘继龙，男，1981年4月生，汉族，山东省五莲县人，中共党员，博士，讲师。分别于2004年和2007年在鲁东大学获学士和硕士学位，2010年在西北农林科技大学获博士学位，2010年7月进入东北农业大学工作，2011年11月进入东北农业大学农业工程博士后科研流动站从事博士后研究工作。目前主要从事农业水土资源系统分析与优化利用方面的研究。先后主持和参加了各级各类科研项目7项，发表学术论文37篇（EI收录9篇），获科研奖励4项，申请实用新型专利3项，获得软件著作权2项。

马孝义，男，1965年1月生，汉族，陕西省凤翔人，教授，博士，博士生导师，享受国家政府津贴。1984年毕业于陕西机械学院水利系，1994年毕业于西北农业大学，获博士学位，同年留校。2010年任水利与建筑工程学院院长。目前主要从事高新技术在农业水土工程中的应用与灌区信息化技术等方面研究。主持和参与国家及省部级科研项目20余项，获国家科技进步二等奖2项、陕西省科技进步一等奖和三等奖各1项，国家优秀教学成果二等奖1项。获10余项国家专利、10余项计算机软件著作权。主编和参编著作、教材10部。发表论文共140余篇，其中SCI、EI收录25篇。

汪可欣，女，1980年2月生，汉族，辽宁开原人，博士，讲师。2004年毕业于沈阳农业大学，获工学学士学位，同年就读该校农业水土工程专业攻读硕士学位，2006年免试保送攻读该校农业水土工程专业博士学位，2009年获工学博士学位，同年进入东北农业大学工作，2010年5月进入东北农业大学农业工程博士后科研流动站从事博士后研究工作。目前主要从事农业水土资源开发利用与管理方面的研究。先后主持和参加了各级各类科研项目8项，发表学术论文16篇（EI收录1篇），获得软件著作权2项。

张振华，男，1971年9月生，河北省莱城人，教授，博士，硕士生导师。分别于1996年和1999年在西北农业大学获学士和硕士学位；2002年在西北农林科技大学获博士学位；同年进入鲁东大学工作。目前主要从事区域水土资源高效利用方面的研究。先后主持和参加了多项国家及省部级科研项目，目前主持鲁东大学中青年自然科学基金1项。获甘肃省科技进步一等奖1项、山东省高等学校优秀科研成果奖2项。申请专利7项，出版专著1部。在《农业工程学报》和《土壤学报》等期刊发表学术论文30余篇。

前 言

土壤是生物、气候、母质、地形、时间和人类活动等因素综合作用下的产物。受这些因素的影响,土壤的各种特性随取样位置和取样时间的变化呈现出非均一性,这种非均一性称为土壤特性的时空变异性。土壤是一种复杂的自然空间实体,其空间分布常常不是单纯的一种,而是多种或多层次结构的叠加,这使得土壤特性的空间变异性随尺度变化呈现出明显的尺度效应。土壤特性具有时空变异性,给灌溉科学、土壤学和水土资源管理等水土学科的研究应用带来很多困难,研究土壤特性的时空变异性可以解决一系列相关问题。如研究结果能够为研究区域土壤过程的预测和模拟更接近田间土壤实际情况、取样方案的设计、田间试验精度的提高、土地利用规划的制定、土壤资源的利用、精准农业的实施和生态环境的修复等提供有效途径和指导,将进一步深化和丰富水土学科的理论 with 知识,有力推动这些学科的发展,并使其研究能更好地服务于实践。

基于上述研究背景,本书以陕西省杨凌和山东省烟台为研究平台,利用传统统计学、地统计学、分形理论和土壤传递函数等方法对土壤含水率、土壤电导率、土壤颗粒组成、土壤水分特征曲线、土壤入渗特性和有机质含量等土壤特性的时空变异性及其应用进行了研究,以期为研究区域水土资源的科学管理、高效可持续利用提供指导,并为国内外学者的相关研究提供参考。

全书共分为八章。第一章介绍土壤特性时空变异性的研究进展、研究方法与研究区概况。第二章研究土壤水盐的时空变异性以及取样尺度与取样时间对土壤水盐合理取样数目的影响等。第三章研究土壤基本物理特性的分形特征以及不同土层土壤基本物理特性之间的相互关系。第四章研究土壤水分在垂直方向上的变化规律以及表层土壤水分与深层土壤水分的转换关系。第五章研究土壤粒径分布分形维数的分形特征以及土壤粒径分布分形维数与土壤颗粒组成之间的函数关系。第六章研究土壤水分特征曲线与影响因素在多尺度上的相关性,在此基础上建立田间尺度和区域尺度上土壤水分特征曲线的土壤传递函数。第七章基于 Green-Ampt 入渗模型与 Philip 入渗模型之间的关系,建立 Green-Ampt 入渗模型累积入渗量的显函数,并对其在不同条件

下的适用性进行研究。第八章研究土壤入渗特性与影响因素在多尺度上的相关性,建立考虑尺度效应的土壤入渗特性的土壤传递函数。

在本书编写过程中,参阅、借鉴和引用了许多关于土壤特性时空变异性的论文、专著、教材和其他相关资料,在此向各位作者表示衷心的感谢。此外,在编写过程中,西北农林科技大学马孝义教授、东北农业大学付强教授、鲁东大学张振华教授、中国科学院水利部水土保持研究所王海江博士、西北农林科技大学姚付启博士和哈尔滨工业大学张玲玲博士给予了大量指导与帮助,在此谨致以诚挚的谢意。

本书的出版得到了黑龙江省教育厅科学技术研究项目(No.12511046)、黑龙江省博士后资助项目(No.LBH-Z11226)、节水农业黑龙江省高校重点实验室开放基金(2011KFJ02)、国家自然科学基金项目(No.50879072)和西北农林科技大学人才专项资金项目(No.BJRC-2009-001)的联合资助。在此,对国家、黑龙江省和学校给予的支持表示衷心的感谢。

土壤特性的时空变异性研究涉及农业、土壤和水科学等学科,研究内容和研究方法众多。本书只对土壤特性在不同空间尺度上的时空变异性进行了初步探讨,加之编者水平有限,书中难免存在缺点和不足,恳请读者批评指正。

作者

2012年4月于哈尔滨

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 土壤特性时空变异性的研究进展	1
第二节 研究方法	3
第三节 研究区概况	8
参考文献	9
第二章 土壤水盐的时空变异性研究	14
第一节 土壤水盐的多重分形分析	14
第二节 不同土层土壤水盐的联合多重分形分析	22
第三节 基于地统计学土壤水盐的时空变异性分析	24
第四节 取样尺度与取样时间对土壤水盐合理取样数目的影响	29
参考文献	37
第三章 土壤基本物理特性的分形特征研究	39
第一节 土壤基本物理特性的多重分形分析	39
第二节 不同土层土壤基本物理特性的联合多重分形分析	46
参考文献	49
第四章 土壤水分的垂直变化规律与转换研究	50
第一节 土壤水分的垂直变化规律	50
第二节 表层土壤水分与深层土壤水分的转换关系	54
第三节 土壤水分 BP 神经网络估算模型	58
参考文献	62
第五章 土壤粒径分布分形维数的分形特征及其应用研究	64
第一节 土壤粒径分布分形维数的多重分形分析	64
第二节 土壤粒径分布分形维数与土壤颗粒组成的联合多重分形分析	67
第三节 土壤粒径分布分形维数的土壤传递函数	71
参考文献	74
第六章 土壤水分特征曲线的分形特征及其应用研究	76
第一节 VG 模型参数的多重分形分析	76
第二节 VG 模型参数与影响因素的联合多重分形分析	80
第三节 基于联合多重分形 VG 模型参数的土壤传递函数	92

第四节 基于主成分分析 VG 模型参数的估算模型	99
参考文献	107
第七章 Green-Ampt 入渗模型累积入渗量显函数的适用性研究	109
第一节 土壤水分入渗模型	109
第二节 Green - Ampt 入渗模型累积入渗量显函数的建立与验证	110
参考文献	120
第八章 土壤入渗特性的分形特征与土壤传递函数研究	121
第一节 土壤入渗特性的多重分形分析	121
第二节 土壤入渗特性与影响因素的联合多重分形分析	124
第三节 土壤入渗特性的土壤传递函数	130
参考文献	132

第一章 绪 论

第一节 土壤特性时空变异性的研究进展

国外学者对土壤特性时空变异性的研究早于国内学者。20 世纪 70 年代开始, 北美和西欧出现了研究土壤特性空间变异性的热潮, 20 世纪 70 年代后期, 国外学者对土壤特性的空间变异性进行了大量研究。进入 20 世纪 80 年代以后, 我国学者逐渐意识到研究土壤特性空间变异性的理论意义和实际意义, 随后国内学者利用传统统计学方法、地统计学方法、标定理论、土壤传递函数和分形理论等方法对土壤特性的空间变异性进行了大量研究。在研究土壤特性空间变异性的过程中, 国内外学者发现土壤特性的空间变异性存在尺度效应, 在时间上也存在变异, 因而人们不断丰富空间变异性的研究内容, 将空间尺度与时间因素考虑进来。

土壤特性包括土壤物理特性、土壤化学特性和土壤生物特性, 涉及内容很多。本书以陕西杨凌和山东烟台为研究平台, 主要研究分析了土壤含水率、土壤电导率、土壤颗粒组成、土壤水分特征曲线、土壤入渗特性和有机质含量等土壤特性的时空变异性, 因此主要从上述涉及的土壤物理特性和土壤化学特性指标方面阐述分析这一领域的研究进展。

一、单一尺度土壤特性空间变异性的研究进展

目前国内外学者从不同角度和不同方面对土壤特性的时空变异性进行了研究, 其中许多研究没有涉及空间尺度和时间变化对土壤特性变异性的影响, 只是对土壤特性在某一采样尺度和某一采样时期上的时空变异性进行了研究^[1-27]。如 Ersahin 等^[1] 研究分析了不同土壤水压力下土壤含水量的空间变异性, 结果表明其空间依赖性较强, 其变异性随土壤水压力的降低而增加; Jung 等^[2] 研究分析了农田土壤特性的空间变异性, 发现不同土层砂粒、粉粒和黏粒含量的空间分布特征变化较大; 姚荣江等^[3] 研究分析了黄河三角洲地区不同土层土壤容重的空间变异性, 发现不同土层土壤容重的空间依赖性小; 蒋勇军等^[4] 对典型岩溶流域土壤有机质的空间变异性进行了研究, 结果发现流域土壤有机质含量的空间变异具有各向异性, 由空间自相关部分引起的空间变异性的程度较大, 其空间分布与流域地质、地貌及土地利用表现出明显的一致性; Huang 等^[5] 研究分析了耕作对有机质和全氮时空变异性的影响, 结果发现适当的土地管理措施可大大提高农业生态系统积聚有机碳的能力; R  th 等^[6] 研究分析了红壤土砂粒、粉粒和黏粒含量的空间变异性, 结果发现它们的空间变异性主要由内在因素造成; Wang 等^[7] 对中国西北部农业绿洲土壤盐分的空间变异性进行了研究, 结果表明土壤盐分具有强烈的空间相关性, 主要由结构性因素造成; Wang 等^[8] 对不同土地利用方式下土壤全氮和全磷的空间变异性进行了研究, 结果发现土地利用方式对全氮和全磷的空间变异性具有显著影响, 模拟、预测土壤养分状态和运移时

须考虑其影响；刘璐等^[9]研究分析了喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征，结果发现研究区土壤 pH 值表现为弱变异，其他各养分指标均为中等程度变异，植被、地形和高异质性的微生境是造成研究区域土壤养分格局差异的主要因素；张世文等^[10]对县域尺度表层土壤质地空间变异及其影响因素进行了研究，发现土壤质地各颗粒表现出极强的空间自相关性，空间变异主要由结构性因素引起，研究区土壤质地空间格局主要受地形和母质等自然因素影响。

二、不同尺度土壤特性空间变异性的研究进展

在研究土壤特性空间变异性的过程中，人们发现土壤是一种复杂的自然空间实体，其空间分布常常不是单纯的一种，而是多种或多层次结构的叠加，其空间变异性随尺度变化呈现出明显的尺度效应，于是多尺度分析逐渐成为研究土壤特性空间变异性的一个重点和热点^[28-47]。如徐英等^[28]研究分析了黄河河套平原土壤水盐在不同尺度上的空间变异性，结果发现土壤水盐随着采样尺度变化表现出不同的结构性，采样尺度的划分和选取与土壤水盐的空间变异性大小有密切关系；Zelege 等^[29]研究分析了饱和导水率的空间变异性及其与土壤基本物理特性的尺度相关性，结果表明造成观测尺度和多尺度上饱和导水率空间变异性的主要因素并不相同；冯娜娜等^[30]研究分析了茶园土壤颗粒组成的空间变异性，发现不同尺度下土壤颗粒组成的空间变异特征不完全相同；Zelege 等^[31]研究分析了水势为 0kPa、-30kPa 和 -1500kPa 时土壤含水量 (WS_0 、 WS_{30} 和 WS_{1500}) 的空间变异性及其与土壤基本物理特性的尺度相关性，结果表明多尺度上引起 WS_0 和 WS_{30} 空间变异性的因素不同，引起 WS_{1500} 空间变异性的因素一致；王红等^[32]对不同空间尺度和不同土层土壤盐分的空间变异性进行了研究，结果发现随着采样间隔的增加和区域的扩大，土壤盐分的空间相关性增强，且下层比上层具有更高的空间相关性；张继光等^[33]对喀斯特洼地土壤水分的空间变异性及尺度效应进行了研究，结果发现土壤水分的半方差参数随观测尺度呈现明显的尺度效应，且尺度效应不随平均含水量而变化，仅与采样设计相联系；王淑英等^[34]研究分析了两个尺度下有机质和全氮的空间变异特征，结果发现两个尺度下有机质和全氮含量受地形、土壤类型、土地利用方式以及施肥等因素的影响，均表现出明显不同的分布规律；于婧等^[35]对江汉平原典型区农田土壤全氮空间变异的多尺度套合进行了研究，发现土壤全氮空间变异性的尺度效应明显，400m 和 100m 采样间距上影响氮素空间变异的因子显著不同；刘继龙等^[36]对不同土层 VG 模型参数的空间变异性及其主要影响因素进行了研究，结果发现引起不同尺度上和不同土层 VG 模型参数空间变异性的显著因素都有所差异；杨奇勇等^[37]研究分析了禹城市耕地土壤速效磷和速效钾在县级和镇级采样尺度下的空间变异特征，发现随尺度变化两者呈现出不同的分布规律，随着采样尺度的缩小，两者变异系数都增大，县级采样尺度下两者的空间自相关距离较大，镇级采样尺度下两者的空间自相关距离明显变小。

三、土壤特性时空变异性的研究进展

土壤特性具有时间上的连续性，随着时间的变化，土壤特性会呈现出某种变异特征，于是人们将时间因素考虑进来，逐步开展了时间变化对土壤特性变异的影响研究^[48-66]，

如 Qiu 等^[48]对黄土高原土壤水分的时空变异性进行了研究,结果表明土壤平均含水量较高时,土壤水分的空间变异性通常较弱,土地利用方式和地形等环境因子对土壤水分的空间变异性具有显著影响,但不同土层这些环境因子对其影响程度不同;朱静等^[49]研究分析了长江三角洲典型地区农田土壤有机质的时空变异特征及其影响因素,结果发现 20 年来研究区域土壤有机质总体上呈增长趋势,但其增长速度在不同土系间有所差别,这种时空演变现象的出现与秸秆还田面积的减少、农业产业结构、种植结构的调整、土壤质地等因素有关;罗勇等^[50]对红壤丘岗区土壤水分时空变异性进行了研究,结果发现研究区域土壤水分表现出明显的各向异性且季节性变化明显,在冬季,土地利用和微地形共同影响土壤水分变异特征,在春季,土地利用是土壤水分变异的主导因素;Zheng 等^[51]研究分析了滴灌条件下土壤盐分的时空变异性,发现地形和气候变化对其影响非常显著;Alletto 等^[52]对两种耕作状态下土壤容重的时空变异性进行了研究,发现时间变化对其变异性具有显著影响;Penna 等^[53]研究分析了不同土层土壤水分的时空变异性,发现引起不同土层土壤水分时空变异性的主要物理过程有所差异;刘继龙等^[54]研究土壤水分的时空变异性时发现其变异性随土壤含水量的增加呈减小趋势;舒彦军等^[55]对陕西省陈仓区土壤养分的时空变异性进行了研究,发现在时间特征上,研究区有机质整体呈下降趋势,碱解氮整体呈上升趋势,地形、气候和过度垦殖等自然原因和人为因素对其影响比较显著;朱乐天等^[56]对黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分的时空变异性进行了研究,结果发现从总体趋势上来看,土壤水分的时空格局与降雨季节变化、植物蒸腾作用以及土地耕作利用方式密切相关;余世鹏等^[57]研究分析了我国不同水热梯度带农田土壤速效钾含量的时空变异特征,结果发现影响不同水热梯度带农田土壤钾素含量水平和近 20 多年来变化程度的主要因素是成土母质和耕作管理水平。

四、有待于进一步研究的问题

纵观目前国内外研究现状,可以发现这一领域已进行了大量研究,也取得了很多成果。从发展的视角审视已有的研究成果,还有许多方面需进一步研究,如土壤特性的空间变异性是尺度的函数^[67],各种因素和过程对土壤特性空间变异性的影响强度在不同空间尺度上不一定完全相同,研究不同空间尺度上对土壤特性空间变异性都具有显著影响的因素的研究相对较少;针对土壤特性在不同空间尺度上时空变异性的研究较多,关于如何应用和处理尺度效应的研究较少;土壤特性在水平方向和垂直方向上都存在空间变异性,针对土壤特性在水平方向和垂直方向上的空间变异性的研究较多,针对垂直方向上不同土层土壤特性空间变异性相互关系的研究相对较少,针对土壤特性在三维空间上变异的研究也较少^[68,69]。

第二节 研究方法

研究土壤特性时空变异性的方法众多,如经典统计学方法、随机模拟方法、标定理论、地统计学方法、土壤传递函数和分形理论等。每种方法都有各自的优缺点,受一定的约束条件限制,研究目的也不完全相同。具体应用中应根据数据的结构和研究目的选择合

适的研究方法。本书中涉及的研究方法为经典统计学方法、地统计学方法土壤传递函数和分形理论。

一、经典统计学方法

经典统计学方法假设研究的空间变量为随机变量，而且是相互独立的，通过计算研究变量的均值、标准差、方差和变异系数来分析研究变量的空间变异特征。变异系数的计算公式为：

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1-1)$$

式中：CV为变异系数； σ 为标准差； μ 为均值。

变异系数的大小反映了随机变量的离散程度，即表示研究变量空间变异性的强弱，变异系数 $CV \leq 0.1$ 表示研究变量具有弱变异， $0.1 < CV < 1$ 表示研究变量具有中等变异， $CV \geq 1$ 表示研究变量具有强变异^[70]。土壤特性在空间上不能看做是完全独立的，在一定范围内土壤特性具有一定的相关性。因而，经典统计学方法不能全面的揭示出土壤特性的空间变异特征，应用范围受到限制。

二、地统计学方法^[71]

地统计学是在法国著名统计学家 G. Matheron 大量理论研究的基础上逐渐形成的一门新的统计学分支。地统计学的理论基础是区域化变量理论，主要研究那些分布于空间并显示出一定结构性和随机性的自然现象。传统统计学认为研究变量的观测值与空间位置无关，弄清研究变量的空间结构，对于最优采样网格设计和内插方法的选择是非常重要的，地统计学方法描述研究变量空间结构的函数是变异函数。

(一) 变异函数

1. 变异函数的计算公式

变异函数是地统计分析所特有的基本工具，地统计学方法主要采用半方差函数来定量研究和分析变量的空间变异，变异函数 $\gamma(h)$ 的计算公式为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1-2)$$

式中： $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为区域化变量在点 x_i 和 $x_i + h$ 处的值； $N(h)$ 是间距为 h 的数值对数。

变异函数具有块金值 (C_0)、变程 (a) 和基台值 ($C_0 + C$) 三个主要参数。其中块金值代表了一种由非采样间隔所造成的变异；当变异函数随着间隔距离 h 的增大，从非零值达到一个相对稳定的常数时，该常数称为基台值；基台值是系统或系统属性中最大的变异，变异函数达到基台值时的间隔距离称为变程，在变程以外，区域化变量空间相关性消失。块金值与基台值之比表示系统变量的空间相关性的程度，比值小于 25% 表示系统具有强烈的空间相关性；比值大于 75% 表示系统具有弱空间相关性；介于两者之间表示系统具有中等空间相关性^[72]。

2. 变异函数理论模型

(1) 纯块金效应模型。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 & h>0 \end{cases} \quad (1-3)$$

纯块金效应模型表示区域化变量为随机分布, 变量的空间相关不存在。

(2) 球状模型。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C\left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}\right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (1-4)$$

(3) 指数模型。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}) & h>0 \end{cases} \quad (1-5)$$

式(1-5)中的 a 不是变程, 指数模型的变程等于 $3a$ 。

(4) 高斯模型。

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) & h>0 \end{cases} \quad (1-6)$$

式(1-6)中的 a 不是变程, 高斯模型的变程等于 $\sqrt{3}a$ 。

(5) 线性有基台值模型。

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & h=0 \\ Ah & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (1-7)$$

线性有基台值模型的基台值为 $C_0 + C$, 变程为 a 。

(6) 线性无基台值模型。

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & h=0 \\ Ah & h>0 \end{cases} \quad (1-8)$$

线性无基台值模型没有基台值, 也没有变程。

(二) 克立格法

1. 克立格法简介

克立格法, 又称空间局部估计或空间局部插值法, 是地统计学的主要内容之一。克立格法是建立在变异函数理论及结构分析基础之上的。它是在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计的一种方法。克立格法适用的条件是, 如果变异函数和相关分析的结果表明区域化变量存在空间相关性, 则可以运用克立格法对空间未抽样点或未抽样区域进行估计。其实质是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点, 对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏、最优估计。从数学上看, 这是对空间分布的数据求线性最优无偏内插估计的一种方法。

具体而言, 克立格法是根据待估样本点(或块段)有限邻域内若干已测定的样本点数

据,在考虑了样本点的形状、大小和空间相互位置关系,与待估样本点的相互空间位置关系,以及变异函数提供的结构信息之后,对待估样本点值进行线性无偏最优估计。

2. 克立格估计量

克立格法是将任一个点的估计值通过该点影响范围内的 n 个有效样本值 $Z(x_i)$ 的线性组合得到,即:

$$Z_V^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1-9)$$

式中: Z_V^* 为待估点的估计值; $Z(x_i)$ 为已知样本值; λ_i 为权重系数,表示各个样本值 $Z(x_i)$ 对估计值 Z_V^* 的贡献大小,估计值 Z_V^* 的好坏主要取决于怎样计算或选择权重系数 λ_i 。

三、土壤传递函数

快速准确地获取土壤水分运动参数对于确定灌水技术参数、水文产流计算与研究土壤侵蚀等都具有十分重要的意义。因此,研究尺度较大时,如何快速准确地获取土壤水分运动参数一直是灌溉科学、土壤学和水土资源管理等学科的研究热点。研究尺度较大和精度要求不高时,可以通过建立土壤水分运动参数的土壤传递函数来快速和较为准确地获取土壤水分运动参数,即建立土壤水分运动参数与土壤颗粒组成、土壤容重和有机质含量等土壤基本物理特性之间的函数关系。

由于土壤水分运动参数本质上是由土壤质地决定的,因此土壤传递函数估算土壤水分运动参数具有一定的合理性,此外,进行大尺度研究时,应用土壤传递函数估算土壤水分运动参数解决了实测数据不足的问题,还节省了大量的人力、物力和财力。但土壤传递函数方法本身也存在一些不足,如土壤传递函数多为经验公式,物理意义不是很明确,在某一地区建立的土壤传递函数在其他地区不一定能适用^[73,74]。

四、分形理论

分形理论是 Mandebrot 于 1975 年提出的。利用分形理论研究分形体的特征时,分形体特征用分形维数表征,分形维数不同,物体的复杂程度不同^[36]。土壤可以近似看作是一种分形体,因此分形理论已被广泛用来研究土壤特性的复杂程度和估算土壤水力特性参数^[75-78]。利用多重分形理论分析研究对象的空间变异性时,主要确定 4 个多重分形参数:质量指数 $\tau(q)$ 、广义维数 $D(q)$ 、奇异指数 $\alpha(q)$ 及其维数分布函数 $f(q)$ 。上述多重分形参数的计算公式为^[29,79-83]:

(一) 多重分形方法

描述多重分形的参量有两套,一套为 $D(q)$ 和 q ,另一套为 $\alpha(q)$ 和 $f(q)$,计算公式如下。

1. 质量概率

利用多重分形理论分析研究对象的空间变异性时,关键是要定义一个质量概率 $P_i(\delta)$,用 $P_i(\delta)$ 来表征研究对象 μ 分布的局部特征^[82]。当研究尺度为 δ 时,研究对象 μ 的质量概率 $P_i(\delta)$ 可以用下式表示:

$$P_i(\delta) = \mu_i / \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (1-10)$$

式中: n 为研究尺度为 δ 时划分的区间个数; μ_i 为研究尺度为 δ 时第 i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 个区间上研究对象的值。

对研究对象的质量概率 $P_i(\delta)$ 用 q 次方进行加权求和, 构建分配函数 $\chi_q(\delta)$:

$$\chi_q(\delta) = \sum_{i=1}^n P_i^q(\delta) \quad (1-11)$$

式中: q 为质量概率 $P_i(\delta)$ 的统计矩的阶, $q \in R$; 当 $q > 1$ 时, 研究对象 μ 的高值信息被放大; 当 $q < -1$ 时, 研究对象 μ 的低值信息被放大。

2. 质量指数

若研究对象 μ 具有多重分形特征, 则对于任意的质量概率 $P_i(\delta)$ 的统计矩的阶 q , 分配函数 $\chi_q(\delta)$ 与研究尺度 δ 之间存在以下关系:

$$\chi_q(\delta) \propto \delta^{\tau(q)} \quad (1-12)$$

结合式 (1-11) 和式 (1-12), 可得到质量指数 $\tau(q)$ 的计算公式:

$$\tau(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^n P_i^q(\delta)}{\log \delta} \quad (1-13)$$

3. 广义维数

广义维数 $D(q)$ 与质量指数 $\tau(q)$ 之间的转换关系为^[80]:

$$D(q) = \tau(q) / (q-1) \quad (1-14)$$

结合式 (1-13) 和式 (1-14) 可将广义维数 $D(q)$ 的计算公式表示为:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^n P_i^q(\delta)}{\log \delta} \quad (1-15)$$

式 (1-15) 中, $q \neq 1$ 。为了保证 $D(q)$ 的连续性, 当 $q = 1$ 时, 令 $D_1 =$

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n P_i(\delta) \log P_i(\delta)}{\log \delta}。$$

根据式 (1-14) 和式 (1-15), 令 $q=0$, 可得到容量维数 D_0 ; 令 $q=1$, 可得到信息维 D_1 ; 令 $q=2$, 可得到关联维数 D_2 。

当研究对象质量概率 $P_i(\delta)$ 的统计矩的阶 $q \geq 0$ 时, 随 q 的增加, 如果研究对象的广义维数 $D(q)$ 的减小趋势比较明显, 则可判定研究对象具有多重分形特征^[29,80]。

4. $\alpha(q)$ 和 $f(q)$ 的计算公式

$$\alpha(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \log P_i(\delta)}{\log \delta} \quad (1-16)$$

$$f(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(q, \delta) \log \mu_i(q, \delta)}{\log \delta} \quad (1-17)$$

其中

$$\mu_i(q, \delta) = P_i^q(\delta) / \sum_{i=1}^n P_i^q(\delta)$$

式中： $\alpha(q)$ 为研究对象 μ 的奇异指数； $f(q)$ 为研究对象奇异指数 $\alpha(q)$ 的维数分布函数。

(二) 联合多重分形方法

多重分形方法主要用于研究分析单一变量的空间变异性，联合多重分形方法定量分析和确定同一几何支撑上不同研究对象在多尺度上的相互关系。例如，利用联合多重分形方法研究和确定同一几何支撑上的研究对象 1 和研究对象 2 之间的相互关系时，需要确定的联合多重分形参数为 $\alpha^1(q^1, q^2)$ 、 $\alpha^2(q^1, q^2)$ 和 $f(\alpha^1, \alpha^2)$ ，其计算公式为^[29,79]：

$$\alpha^1(q^1, q^2) = - \{ \log[N(\delta)] \}^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} \{ \mu_i(q^1, q^2, \delta) \log[p_i^1(\delta)] \} \quad (1-18)$$

$$\alpha^2(q^1, q^2) = - \{ \log[N(\delta)] \}^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} \{ \mu_i(q^1, q^2, \delta) \log[p_i^2(\delta)] \} \quad (1-19)$$

$$f(\alpha^1, \alpha^2) = - \{ \log[N(\delta)] \}^{-1} \sum_{i=1}^{N(\delta)} \{ \mu_i(q^1, q^2, \delta) \log[\mu_i(q^1, q^2, \delta)] \} \quad (1-20)$$

其中

$$\mu_i(q^1, q^2, \delta) = p_i^1(\delta)^{q^1} p_i^2(\delta)^{q^2} / \sum_{i=1}^{N(\delta)} p_i^1(\delta)^{q^1} p_i^2(\delta)^{q^2}$$

式中： $p_i^1(\delta)$ 为研究对象 1 的质量概率； $p_i^2(\delta)$ 为研究对象 2 的质量概率； $\alpha^1(q^1, q^2)$ 为研究对象 1 的联合奇异指数； $\alpha^2(q^1, q^2)$ 为研究对象 2 的联合奇异指数； $N(\delta)$ 为研究尺度为 δ 时划分的区间个数。

第三节 研究区概况

本书以陕西杨凌（研究区 I）和山东烟台（研究区 II）为研究平台，研究区 I 和研究区 II 的自然地理概况如下所述。

一、研究区 I 概况

杨凌地处关中平原腹地，位于东经 $107^\circ 55' 50'' \sim 108^\circ 07' 50''$ 、北纬 $34^\circ 14' 30'' \sim 34^\circ 19' 00''$ 。东以漆水河与武功县为界，南以渭河与周至县相望，北以河与扶风县毗邻，西与扶风县接壤。区内三面环水，宝鸡峡二支渠、渭惠渠、渭高干渠等人工渠系越境而过，水资源丰富、水利条件优越。区内地势南低北高，依次形成三道塬坡，海拔 $435.00 \sim 563.00\text{m}$ 。境内塬、坡、滩地交错，土壤肥沃，适宜多种农作物生长。年降水量 $635.10 \sim 663.90\text{mm}$ ，年均气温 12.9°C ，属暖温带季风半湿润气候区。

二、研究区 II 概况

烟台地处山东半岛中部，位于东经 $119^\circ 34' \sim 121^\circ 57'$ ，北纬 $36^\circ 16' \sim 38^\circ 23'$ 。东连威海，西接潍坊，西南与青岛毗邻，北、南濒渤海、黄海。烟台地形属起伏缓和、谷宽坡缓的波状丘陵区，西部与胶莱平原相接，低山连绵，丘陵起伏，沟壑纵横，平原、洼地分布

于河谷两岸及滨海地带。烟台地处中纬度,属于暖温带大陆性季风气候,由于受海洋调节作用的影响,与同纬度内陆地区相比,具有雨水丰富、空气湿润、气候温和等特点,全市年平均降水量为765.4mm,年平均气温12.7℃。烟台市河流多属半岛边沿水系,主要河流有6条,这些河流多为砂石河,河床比降大,源短流急,涨落急剧,径流量受季节影响非常明显,枯水季节河床暴露,汛期季节山洪流量突增至二三千倍,雨过洪水速落,属季风区雨源型河流。全市土壤分7个土类,18个亚类,其中棕壤占总土壤面积的77.9%,分布在地、丘陵的坡面上,或以洪冲积物状态分布在山麓和山前倾斜平原上,其次是潮土和褐土,分别占土壤总面积的13.1%和7.2%,盐土、砂姜黑土、风砂土和水稻土比例较小,分别占土壤总面积的0.8%、0.9%、0.06%和0.03%^[84]。

参 考 文 献

- [1] Ersahin S, Brohi A R. Spatial variation of soil water content in topsoil and subsoil of a typical ustifluent [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83 (1-2): 79-86.
- [2] Jung W K, Kitchen N R, Sudduth K A, et al. Spatial characteristics of claypan soil properties in an agricultural field [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, 70: 1387-1397.
- [3] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 黄河三角洲地区土壤容重空间变异性分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25 (4): 11-15.
- [4] 蒋勇军, 袁道先, 谢世友, 等. 典型岩溶流域土壤有机质空间变异——以云南小江流域为例 [J]. *生态学报*, 2007, 27 (5): 2040-2047.
- [5] Huang B, Sun W X, Zhao Y C, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices [J]. *Geoderma*, 2007, 139 (3-4): 336-345.
- [6] R  th B, Lennartz B. Spatial variability of soil properties and rice yield along two catenas in southeast China [J]. *Pedosphere*, 2008, 18 (4): 409-420.
- [7] Wang Y G, Li Y, Xiao D N. Catchment scale spatial variability of soil salt content in agricultural oasis, Northwest China [J]. *Environ Geol*, 2008, 56 (2): 439-446.
- [8] Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2009, 150 (1-2): 141-149.
- [9] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (7): 1667-1673.
- [10] 张世文, 黄元仿, 苑小勇, 等. 县域尺度表层土壤质地空间变异与因素分析 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44 (6): 1154-1164.
- [11] 肖波, 王庆海, 尧水红, 等. 黄土高原东北缘退耕坡地土壤养分和容重空间变异特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23 (3): 92-96.
- [12] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤容重及水分空间变异特征 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (3): 647-654.
- [13] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18 (3): 53-56.
- [14] 姚月锋, 蔡体久. 丘间低地不同年龄沙柳表层土壤水分与容重的空间变异 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21 (5): 114-117.