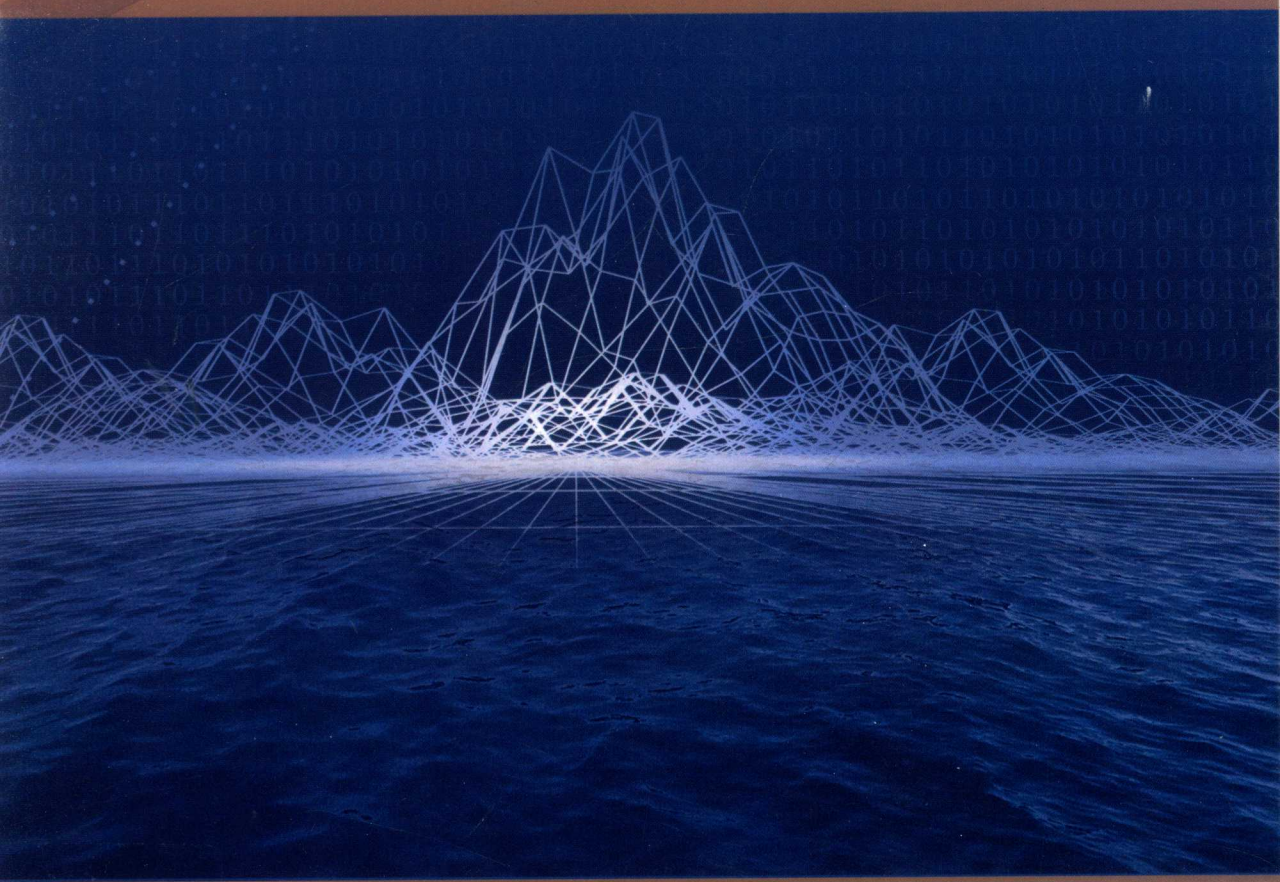


The Application and Research
of Mathematical Model
in Ecology

28

数学模型在生态学 的应用及研究

杨东方 王凤友 编著



 海洋出版社

数学模型在生态学的应用及研究(28)

The Application and Research of Mathematical Model in Ecology(28)

杨东方 王凤友 编著

海洋出版社

2014年·北京

内 容 提 要

通过阐述数学模型在生态学的应用和研究,量化地展示生态系统中环境因子和生物因子的变化过程,揭示生态系统的规律和机制,以及其稳定性、连续性的变化,使生态数学模型在生态系统中发挥巨大作用。在科学技术迅猛发展的今天,通过该书的学习,可以帮助读者了解生态数学模型的应用、发展和研究的过程;分析不同领域、不同学科的各种各样生态数学模型;探索采取何种数学模型应用于何种生态领域的研究;掌握建立数学模型的方法和技巧。此外,该书还有助于加深对生态系统的量理解,培养量化研究生态系统的思维。

本书主要内容为:介绍各种各样的数学模型在生态学不同领域的应用,如在地理、地貌、水文和水动力以及环境变化、生物变化和生态变化等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及其数学模型应用的意义。

本书适合气象学、地质学、海洋学、环境学、生物学、生物地球化学、生态学、陆地生态学、海洋生态学和海湾生态学等有关领域的科学工作者和相关学科的专家参阅,也适合高等院校师生作为教学和科研的参考。

图书在版编目(CIP)数据

数学模型在生态学的应用及研究. 28/杨东方,王凤友编著. —北京:海洋出版社, 2014. 10

ISBN 978-7-5027-8875-9

I. ①数… II. ①杨… ②王… III. ①数学模型-应用-生态学-研究 IV. ①Q14

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第102508号

责任编辑:鹿 源

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京华正印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2014年10月第1版 2014年10月第1次印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:20.25

字数:480千字 定价:60.00元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《数学模型在生态学的应用及研究(28)》编委会

主 编 杨东方 王凤友

副主编 朱四喜 苗振清 贺华中 陈 豫 吴有富

编 委 (按姓氏笔画为序)

王 林 邓 婕 冯志纲 孙静亚 吴兴玲

李铁军 杨丹枫 杨佩华 周 燕 徐焕志

索洪敏 常彦祥 童 红 黄 宏 蒋 红

数学是结果量化的工具

数学是思维方法的应用

数学是研究创新的钥匙

数学是科学发展的基础

杨东方

要想了解动态的生态系统的基本过程和动力学机制,尽可从建立数学模型为出发点,以数学为工具,以生物为基础,以物理、化学、地质为辅助,对生态现象、生态环境、生态过程进行探讨。

生态数学模型体现了在定性描述与定量处理之间的关系,使研究展现了许多妙不可言的启示,使研究进入更深的层次,开创了新的领域。

杨东方

摘自《生态数学模型及其在海洋生态学应用》

海洋科学(2000), 24(6):21-24.

前 言

细大尽力,莫敢怠荒,远迎辟隐,专务肃庄,端直敦忠,事业有常。

——《史记·秦始皇本纪》

数学模型研究可以分为两大方面:定性和定量的,要定性地研究,提出的问题是“发生了什么”,或者“发生了没有”,要定量地研究,提出的问题是“发生了多少”,或者“它如何发生的”。前者是对问题的动态周期、特征和趋势进行了定性的描述,而后者是对问题的机制、原理、起因进行了定量化的解释。然而,生物学中有许多实验问题与建立模型并不是直接有关的。于是,通过分析、比较、计算和应用各种数学方法,建立反映实际的且具有意义的仿真模型。

生态数学模型的特点为:(1)综合考虑各种生态因子的影响。(2)量化描述生态过程,阐明生态机制和规律。(3)能够动态地模拟和预测自然发展状况。

生态数学模型的功能为:(1)建造模型的尝试常有助于精确判定所缺乏的知识和数据,对于生物和环境有进一步定量了解。(2)模型的建立过程能产生新的想法和实验方法,并缩减实验的数量,对选择假设有所取舍,完善实验设计。(3)与传统的方法相比,模型常能更好地使用越来越精确的数据,从生态的不同方面所取得材料集中在一起,得出统一的概念。

模型研究要特别注意:(1)模型的适用范围:时间尺度、空间距离、海域大小、参数范围。例如,不能用每月的个别发生的生态现象来检测1年跨度的调查数据所做的模型。又如用不常发生的赤潮的赤潮模型来解释经常发生的一般生态现象。因此,模型的适用范围一定要清楚。(2)模型的形式是非常重要的,它揭示内在的性质、本质的规律,来解释生态现象的机制、生态环境的内在联系。因此,重要的是要研究模型的形式,而不是参数,参数只是说明尺度、大小、范围而已。(3)模型的可靠性,由于模型的参数一般是从实测数据得到的,它的可靠性非常重要,这是通过统计学来检测。只有可靠性得到保证,才能用模型说明实际的生态问题。(4)解决生态问题时,所提出的观点,不仅从数学模型支持这一观点,还要从生态现象、生态环境等各方面的事实来支持这

一观点。

本书以生态数学模型的应用和发展为研究主题,介绍数学模型在生态学不同领域的应用,如在地理、地貌、气象、水文和水动力以及环境变化、生物变化和生态变化等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及其数学模型应用的意义。认真掌握生态数学模型的特点和功能以及注意事项。生态数学模型展示了生态系统的演化过程和生态数学模型预测了自然资源可持续利用。通过本书的学习和研究,促进自然资源、环境的开发与保护,推进生态经济的健康发展,加强生态保护和环境恢复。

本书获得贵州民族大学出版基金、“贵州喀斯特湿地资源及特征研究”(TZJF-2011年-44号)项目、“喀斯特湿地生态监测研究重点实验室”(黔教全KY字[2012]003号)项目、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0659)项目、“西南喀斯特地区人工湿地植物形态与生理的响应机制研究”(黔省专合字[2012]71号)项目、“复合垂直流人工湿地处理医药工业废水的关键技术研究”(筑科合同[2012205]号)项目、水库水面漂浮物智能监控系统开发(黔教科[2011]039号)项目、基于场景知识的交通目标行为智能描述(黔科合字[2011]2206号)项目、水面污染智能监控系统的研发(TZJF-2011年-46号)项目、基于视觉的贵阳市智能交通管理系统研究项目、水面污染智能监控系统的研发项目、贵阳市水面污染智能监控系统的研发项目、基于信息融合的贵州水资源质量智能监控平台研究项目以及浙江海洋学院出版基金、浙江海洋学院承担的“舟山渔场渔业生态环境研究与污染控制技术开发”、海洋渔业科学与技术(浙江省“重中之重”建设学科)和“近海水域预防环境污染养殖模型”项目、海洋公益性行业科研专项——浙江近岸海域海洋生态环境动态监测与服务平台技术研究及应用示范(201305012)项目、国家海洋局北海环境监测中心主任科研基金——长江口、胶州湾、莱州湾及其附近海域的生态变化过程(05EMC16)的共同资助下完成。

此书得以完成应该感谢北海环境监测中心崔文林主任、上海海洋大学的李家乐院长、浙江海洋学院校长吴常文和贵州民族大学校长张学立;还要感谢刘瑞玉院士、冯士筭院士、胡敦欣院士、唐启升院士、汪品先院士、丁德文院士和张经院士。诸位专家和领导给予的大力支持,提供的良好的研究环境,成为我们科研事业发展的动力引擎。在此书付梓之际,我们诚挚感谢给予许多热心指点和有益传授的其他老师和同仁。

前 言

本书内容新颖丰富,层次分明,由浅入深,结构清晰,布局合理,语言简练,实用性和指导性强。由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,望广大读者批评指正。

沧海桑田,日月穿梭。抬眼望,千里尽收,祖国在心间。

杨东方 王凤友

2014年6月22日

目次

叶蜂的多样性模型	(1)
土壤颗粒的分形模型	(3)
生态系统的恢复模型	(7)
水污染的负荷估算	(13)
生态足迹的耕地模型	(16)
灌木生物量的估算模型	(19)
花角蚜小蜂的寄生模型	(22)
作物生长的生态模型	(26)
臭氧胁迫下冬小麦的生长模型	(29)
植被冠层降水截留特征模型	(34)
饮用水源地的评价模型	(37)
上游景观对土壤侵蚀的影响模型	(40)
太湖水色的空间分布模型	(43)
植被释放温室气体的估算模型	(46)
区域生态安全评价模型	(48)
森林火灾面积的预测模型	(51)
土壤大孔隙的特征模型	(54)
岷江上游的景观评价模型	(57)
干物质的积累与分配模型	(59)
区域生态足迹的供需模型	(62)
农业干旱风险的评估模型	(65)
旱涝灾害的评价公式	(71)
畦灌的水动力模型	(74)
播种机的驱动圆盘防堵公式	(82)
甘蔗夹持输送的功率模型	(85)
蔬菜中酶的失活模型	(91)
作物估产的遥感公式	(94)
温室钢结构的框架稳定公式	(99)

水产品的烘房设计公式	(108)
土壤养分的评价公式	(112)
土壤水分的电导公式	(116)
冬小麦估产的生产力模型	(119)
异性纤维的检测波段公式	(124)
降雨侵蚀力的计算公式	(128)
农作物的灌溉需水量公式	(131)
储粮害虫的图像函数	(134)
灌溉用水量的混沌预报模型	(138)
切片莲藕的呼吸模型	(142)
作物的腾发量模型	(146)
种蛋的蛋形识别公式	(150)
甜椒生长与产量的预测模型	(154)
太湖流域农业多目标优化模型	(160)
沙漠化土地信息的提取模型	(164)
还田机刀轴的可靠度函数	(166)
执行器末端的抓握模型	(170)
农用地的遥感角提取算法	(176)
坡沟侵蚀的示踪公式	(180)
农网送电线路的路径模型	(182)
果品振动的损伤模型	(185)
土壤入渗的运动方程	(188)
毛管水力的要素模型	(192)
渠道冻胀的变形方程	(196)
沼气池的温室气体减排量估算	(199)
汽油机的扫气优化公式	(203)
流域水资源的配置模型	(206)
旋流自吸泵的大涡模型	(210)
土壤的入渗性能模型	(213)
隧洞正常水深计算	(217)
土壤溶质来到地表的迁移公式	(222)
水解稻秆的木糖收率公式	(225)

流域景观格局的水质模型	(228)
森林郁闭度的估测模型	(231)
草地退化的评价模型	(235)
树干液流与冠层蒸腾的时滞模型	(239)
切花菊的杆数模型	(243)
土地利用的动态变化模型	(249)
湿地的空气动力学模型	(252)
城市生态质量的评价模型	(255)
牡蛎的积累与释放模型	(259)
叶片和冠层的交换模型	(263)
植被遥感的大气校正模型	(267)
植被净初级生产力估算模型	(272)
农田扩张的多层线性模型	(275)
土壤含水量的遥感反演模型	(277)
植被下土壤的入渗模型	(282)
坡面流与壤中流的耦合模型	(285)
间套作的产量模型	(289)
树干的呼吸速率模型	(292)
植被覆盖度的估算模型	(296)
油松龄级的格局模型	(299)
城市生态的安全评价模型	(303)
植被覆盖的亚像元模型	(307)

叶蜂的多样性模型

1 背景

昆虫作为生物多样性的一个重要组成部分,在生物多样性保护中具有重要的地位。昆虫多样性可以用来估计全球物种丰富度,其变化可以用来衡量工业污染的程度^[1]。叶蜂是膜翅目植食性原始类群,很多种类是农林牧业和园艺害虫,有些种类大发生时能导致森林大面积枯死,损失很大。游群和聂海燕^[2]通过实地调查广西猫儿山不同海拔梯度的叶蜂多样性,探讨了海拔梯度对叶蜂多样性分布特征的影响。

2 公式

2.1 相对多度

$$R_0 = N_i/N \times 100\%$$

式中, N_i 为种 i 的个体数; N 为所有种的个体总数。

2.2 McNaughton 优势度指数

$$D_{Mc} = (N_1 + N_2)/N$$

式中, N_1 、 N_2 为样品中数量居第 1、2 位的优势种的个体数; N 为所有种的个体总数。

2.3 Margalef 丰富度指数

$$D_{Ma} = (S - 1)/\ln N$$

式中, S 为物种总数; N 为所有种的个体总数。

2.4 Simpson 指数

$$D = 1 - \sum [N_i(N_i - 1)/N(N - 1)]$$

式中, N_i 为种 i 的个体数; N 为所有种的个体总数。

2.5 Shannon - Wiener 指数

$$H' = - \sum P_i \ln P_i$$

式中, P_i 为种 i 的个体数占群落个体总数的比例。

2.6 Pielou 均匀度指数

$$J' = H'/\ln S$$

式中, H' 为 Shannon - Wiener 指数; S 为群落中物种总数。

2.7 Sørensen 指数

$$C_s = 2j/(a + b)$$

式中, a 和 b 分别为两群落各自物种数; j 为两群落共有物种数。

根据公式, 调查共获得叶蜂标本 803 头, 隶属 3 科 58 属 121 种。其中, 中间海拔叶蜂属数、物种数和个体数均最多(表 1)。

表 1 猫儿山不同海拔梯度叶蜂群落的种类组成及其多样性

项目	低海拔		中低海拔	中间海拔	中高海拔	高海拔	
	同仁	高寨	观景台	九牛塘	红军亭	铁杉林	八角田
科数	2	2	2	3	3	2	1
属数	23	22	13	37	15	9	7
物种数	38	27	20	70	20	10	7
个体数	123	84	33	274	32	119	138
优势度(D_{Me})	0.325	0.333	0.273	0.157	0.281	0.916	0.957
丰富度(D_{Ma})	7.689	5.868	5.434	12.293	5.482	1.883	1.218
Simpson 指数(D)	0.926	0.921	0.955	0.971	0.956	0.290	0.451
Shannon - Wiener 指数(H')	3.020	2.800	2.800	3.830	2.810	0.720	0.810
均匀度(J')	0.830	0.850	0.935	0.901	0.938	0.313	0.416

3 意义

游群和聂海燕^[2] 总结概括了物种多样性研究模型, 在猫儿山自然保护区沿海拔梯度设置 7 个样地进行叶蜂调查。共采获叶蜂 803 头, 隶属 3 科 58 属 121 种。统计分析表明, 不同海拔叶蜂群落的物种丰富度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon - Wiener 多样性指数均以中间海拔(1 000 ~ 1 500 m)最高, 分别为 12.293、0.971 和 3.830; 优势度指数则以高海拔最高。聚类分析显示, 7 个样地的叶蜂物种可以分为高海拔组(> 2 000 m)和其他海拔组(< 2 000 m)。相关分析表明, 降水量和植被种类是影响叶蜂多样性的主要因素。模型明确了叶蜂多样性随海拔梯度的变化规律, 为有效控制叶蜂危害提供科学依据。

参考文献

[1] Jana G, Misra KK, Bhattacharya T. Diversity of some insect fauna in industrial and non - industrial areas of West Bengal. India. Journal of Insect Conservation. 2006,10(3): 249 - 260.

[2] 游群, 聂海燕. 广西猫儿山沿海拔梯度的叶蜂多样性. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2001 - 2005.

土壤颗粒的分形模型

1 背景

黑土地处我国温带草原土壤经向带的东部,是由平原向山区过渡的一种过渡地形。黑土区作为国内主要粮食产区^[1],近年来由于土壤侵蚀严重而越来越受到重视,缪驰远等^[2]在借鉴以往分形模型在土壤研究应用的基础上,通过第二次全国土壤普查结果对黑土土类下不同土种的土壤分形特征进行分析,计算其分形值,并探讨其与土壤质地、粒径、养分等的关系,利用土壤分形维数客观反映土壤的结构性状。

2 公式

本研究采用 Yang 等^[3]提出的用土壤颗粒重量分布代替土壤颗粒数量分布来计算粒径分布的分形维数的方法。

具有自相似结构的多孔介质土壤由大于某一粒径 d_i ($d_i > d_{i+1}, i = 1, 2, \dots$) 的土粒构成的体积 $V(\delta > d_i)$ 可由下列公式表示:

$$V(\delta > d_i) = A[1 - (d_i/k)^{3-D}] \quad (1)$$

式中, δ 为尺码; A, k 是描述形状、尺度的常数; D 为分形维数。

通常粒径分析资料由一定粒径间隔的粒径重量分布来表示。以 $\bar{d}_i$ 表示两筛分粒径 d_i 与 d_{i+1} 间的粒径平均值,忽略各粒径间土粒密度 $\rho_i = \rho (i = 1, 2, \dots)$ 的差异,则有:

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i)\rho = \rho A[1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式中, $W(\delta > \bar{d}_i)$ 表示粒径大于 $\bar{d}_i$ 的累计土粒重量。以 W_0 表示土壤各粒级质量的总和,同时由定义有:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \bar{d}_i = 0$$

则由式(2)得:

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > \bar{d}_i) = \rho A \quad (3)$$

由式(2)、式(3)导出:

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{k}\right)^{3-D} \quad (4)$$

设 $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径,则:

$$W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$$

代入式(4)有:

$$k = \bar{d}_{\max}$$

由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式:

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} \tag{5}$$

或

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} \tag{6}$$

分别以 $\lg(W_i/W_0)$ 为纵坐标、 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 为横坐标,不难看出 $3 - D$ 是 $\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})$ 和 $\lg(W_i/W_0)$ 的实验直线斜率,因此 D 可用回归分析方法进行求解。

根据上述土壤颗粒分形维数的求解方法,得出黑土 36 个土种典型剖面表层土壤颗粒的分形维数值(表 1)。

表 1 黑土表层土壤颗粒分形维数

亚类	编号	土种	质地	机械组成				分形维数 (D)	决定系数 (R ²)
				2~0.2mm	2~0.2mm	0.02~0.002mm	<0.002mm		
黑土亚类	1	黄黑土	CL	1.78	50.99	25.86	21.38	2.680 5	0.942 0
	2	暗黄黑土	CL	1.98	52.47	26.73	18.82	2.662 0	0.941 7
	3	黏砾黑土	LC	7.53	43.73	22.27	26.47	2.717 0	0.945 5
	4	肥黑土	LC	0.77	44.89	26.05	28.29	2.721 5	0.931 8
	5	油黑土	CL	2.56	42.11	30.99	24.34	2.701 9	0.922 3
	6	破皮黄土	LC	6.23	37.52	26.76	29.49	2.733 0	0.925 5
	7	大黑土	CL	2.04	36.65	43.08	18.23	2.662 2	0.891 4
	8	砾黑土	CL	9.57	29.64	36.05	24.74	2.712 0	0.901 6
	9	棕砾黑土	LC	7.45	26.48	28.10	37.97	2.772 2	0.896 6
	10	泥砂土	LC	30.82	9.65	31.85	27.67	2.749 4	0.895 1
	11	棕泥砂土	CL	9.89	32.86	33.3	23.95	2.707 0	0.912 6
	12	油黄黑土	LC	4.48	26.37	37.91	31.24	2.741 8	0.882 5
	13	水岗黑土	LC	2.20	31.67	33.14	32.99	2.747 1	0.896 5
	14	油黄土	LC	0.13	23.36	35.56	41.08	2.778 1	0.863 2
	15	讷河破皮黄土	LC	2.14	26.04	31.86	39.96	2.775 4	0.879 7
	16	红松洼暗黑土	SL	42.59	33.57	11.40	12.44	2.638 5	0.990 1
	17	大杨树黄黑土	SCL	1.23	33.00	45.20	20.57	2.679 3	0.882 1
	18	岷县大黑土	L	4.00	50.80	32.10	13.10	2.612 9	0.927 5
	19	破皮大黑土	LC	2.90	37.09	34.49	26.52	2.714 7	0.907 1

续表

亚类	编号	土种	质地	机械组成				分形维数 (D)
				2~0.2mm	2~0.2mm	0.02~0.002mm	<0.002mm	
	20	大黑土	SCL	1.60	34.32	45.00	19.08	2.668 8
草甸黑土	21	二洼黑土	LC	8.70	22.68	40.58	28.04	2.730 3
亚类	22	二洼瘦黑土	C	2.67	12.98	29.49	54.86	2.823 0
	23	平西二洼黑土	CL	6.38	46.25	22.62	24.75	2.705 9
	24	二洼油黑土	LC	0.55	42.19	27.12	30.14	2.731 0
	25	黑油砂土	SCL	65.05	0.08	17.17	17.71	2.725 9
	26	锈黄黑土	LC	7.38	31.28	33.73	27.61	2.725 6
	27	粘锈黄黑土	LC	5.26	27.38	33.12	34.24	2.755 4
	28	双城油黑土	LC	4.91	28.48	35.64	30.97	2.740 6
	29	甸黑土	SC	10.55	11.21	50.32	27.82	2.732 4
	30	黄甸黑土	CL	8.53	37.93	30.36	23.18	2.700 2
	31	宜里黄甸黑土	SL	8.02	18.80	63.57	9.61	2.583 1
	32	泥砂甸黑土	SL	19.47	0.45	70.60	9.48	2.593 7
	33	锈黑土	L	12.01	40.7	36.60	10.69	2.593 5
白浆化黑	34	白馅黄黑土	CL	0.03	38.88	42.77	18.32	2.661
土亚类	35	油白馅黄黑土	CL	7.89	29.06	39.87	23.18	2.753 6
	36	粘白馅黄黑土	LC	0.88	25.92	38.65	34.55	2.701 7

CL:粘壤土;LC:壤质黏土;SL:砂质壤土;SCL:粉砂质黏壤土;L:壤土;C:黏土;SCL:砂质黏壤土;SC:粉砂质黏土;SL:粉砂质壤土。

3 意义

通过土壤颗粒的分形特征模型,缪驰远等^[2]应用土壤颗粒的质量分布计算了36个典型剖面表层土壤颗粒的分形维数值。土壤颗粒分形维数值D在2.583 1~2.823 0,其变异性极弱,且分形维数值随质地变细而增大;土壤机械组成中,砂粒(2~0.02 mm)含量、粉粒(0.02~0.002 mm)含量与分形维数值均呈显著负相关(P<0.05);黏粒(<0.002 mm)含量与土壤分形维数值呈极显著正相关(P<0.01);分形维数值D与土壤中的有机质、全N、全P、全K含量及pH值相关性均不显著。土壤分布的分形维数可以作为反映黑土退化程度的一个综合性定量指标,为黑土土壤侵蚀退化过程研究提供参考。