

基于分形理论的设施土壤水分特征曲线研究*

郑子成 李卫 李廷轩 余海英 曾礼

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

【摘要】 采用现场调查取样与室内分析相结合的方法,研究了设施栽培条件下原状土壤和扰动土壤分形维数及其与水分特征曲线的关系,结果表明:在相同质地的情况下,分形维数随土壤容重的增大而增大;设施土壤水分特性曲线原状土分形维数与扰动土分形维数具有良好的线性关系;通过原状土与扰动土分形维数的关系来预测的原状土水分特征曲线在整个含水率范围内预测结果与实测值一致性较好,表明根据土壤扰动土分形维数来预测原状土水分特征曲线是可行的。

关键词: 设施土壤 水分特征曲线 分形理论 扰动土壤 原状土壤

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0049-06

Soil Water Retention Curve Based on Fractal Theory in Greenhouse Soil

Zheng Zicheng Li Wei Li Tingxuan Yu Haiying Zeng Li

(College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract

The relationship between the fractal dimension for soil water retention curve of the disturbed and undisturbed soil was studied in greenhouse soil. It was showed that on the condition of the same soil texture, fractal dimensions increased with the increasing of soil bulk density. There was significant linear relationship between the fractal dimension of the disturbed soil and that of the undisturbed soil. Based on the fractal dimension of soil weight distribution and soil water retention curve of Brook - Corey model, water retention curves of the disturbed and undisturbed soil were predicted. The results show that the predicted values of soil water retention curves fit the measured data. So, it is feasible to estimate soil water retention curve of the undisturbed soil based on the fractal dimension of the disturbed soil in the greenhouse soil.

Key words Greenhouse soil, Soil water retention curve, Fractal theory, Disturbed soil, Undisturbed soil

引言

室内扰动土柱模拟试验得出的结果能否反映大田原状土壤实际情况已成为研究热点之一。有研究表明,土壤水力特征参数与土壤物理特性参数存在相关关系^[1-3],因此可以通过土壤水力特征参数的变化来表征扰动土与原状土结构特征的差异。其中土壤水分特征曲线是定量模拟土壤水分流动和溶质

运移的最重要的水力特征参数^[4]。而对这些参数直接测定比较困难,试验方法复杂、所需试验仪器设备精密、价格昂贵、测试耗时长,并且受土壤质地空间结构变异性的影响,测定存在较大的误差等。由于物理特性参数是极易测定的,因此,通过这些易于测定的参数表征土壤水分特征曲线已引起广泛关注,尤其是分形理论的应用为土壤水分特征曲线等水动力学参数的确定开辟了新的途径。

收稿日期: 2011-11-18 修回日期: 2012-01-31

* 国家自然科学基金资助项目(40901138)、“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAD98B03)和四川省科技厅应用基础项目(2008JY0022)

作者简介: 郑子成,副教授,主要从事土壤物理与水土保持研究,E-mail: zichengzheng@yahoo.com.cn

通讯作者: 李廷轩,教授,博士生导师,主要从事土壤质量与植物营养研究,E-mail: litinx@263.net

自 Mandelbrot^[5] 提出分形几何的概念后, Tyler 和 Wheatcraft^[6] 建议用分形方法估计土壤水分特征曲线, 其后, 不少学者在此基础上相继做了大量的研究^[7-11]。目前分形理论的具体运用主要集中在对同一类型和不同质地土壤水动力学参数的预测, 而对土壤经过破坏后的扰动土壤与原状土壤水分特征曲线的关系报道较少。因此, 本文运用 Brook - Corey 提出的水分特征曲线公式, 推导原状土与扰动土水分特征曲线的分形模型。通过所采集的不同层次土样, 利用压力薄膜仪实测的水分特征曲线反求得到相应的分形维数, 分析原状土壤和扰动土壤分形维数以及水分特征曲线的关系, 以期为土壤水盐运移室内扰动土柱模拟试验的深入研究提供依据。

1 基本理论

1.1 根据土壤粒径的重量分布表征土壤分形特征

Turcotte^[12] 提出土壤分形可用颗粒粒径与数量的关系来定义, 即

$$N(\xi > d_i) d_i^{D_1} = C \quad (1)$$

式中 d_i ——第 i 粒径

$N(\xi > d_i)$ ——粒径大于 d_i 的颗粒总数

C ——与土壤性质有关的常量

D_1 ——土壤粒径数量分布分形维数

由于 N 值不能直接通过试验得到, 其值受到假设与实际符合程度的影响, 也影响了 D_1 值的准确计算。在通常的土壤分析中, 得到的均为土壤粒径的重量分布值。Tyler 和 Wheatcraft^[13]、杨培岭^[9] 等提出改进的粒径分布方法, 采用粒径重量分布表征土壤结构分形, 即

$$\frac{W(\xi < d_i)}{W_0} = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D_2} \quad (2)$$

式中 d_{\max} ——最大粒级土粒的平均直径

$W(\xi < d_i)$ ——粒径小于 d_i 的累积土粒重量

W_0 ——土壤各粒级重量的总和

D_2 ——土壤粒径重量分布分形维数

1.2 土壤水分特征曲线的分形模型

Tyler 和 Wheatcraft^[14] 采用 Sierpinski Carpet 地毯结构理论分形推导出土壤水分特征曲线的分形模型

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{h}{h_d} \right)^{D-2} \quad (3)$$

式中 θ ——体积含水率

θ_s ——饱和含水率

h ——人为土壤吸力

h_d ——人为土壤进气吸力

D ——土壤孔隙体积分形维数

将模型推广到三维欧氏空间, 即

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{h}{h_d} \right)^{D-3} \quad (4)$$

Brook - Corey 经验模型为

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \left(\frac{h_d}{h} \right)^\lambda \quad (5)$$

式中 λ ——拟合参数

式(3)或式(4)与式(5)形式是完全一致的。比较式(4)和式(5)可知, $\lambda = 3 - D$, 式(4)从孔隙介质的结构上说明了孔隙介质的含水率与基质吸力的关系, 为式(5)赋予了物理意义。

2 材料与方法

2.1 土样的采集与制备

采样地点选择在设施栽培分布较为集中的四川省双流县永安镇牧马坪。该地区设施蔬菜种植以茄子、辣椒和番茄为主。每年每个温室有机肥年施用量高达 19.5 t/hm², 其中施用化肥主要以尿素、过磷酸钙和硫酸钾为主。地下水位为 60 cm。采集土样按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层采集, 同时取相邻的露地土壤作为对照。大棚种植始于 2001 年, 土样采集于 2009 年。土样分为两部分: 一部分风干备用; 另一部分用于土壤基本理化性质的测定(表 1)。

表 1 供试土壤粒径分析

Tab. 1 Particle size distribution of soil

土壤类型	土层深度 /cm	容重 /g·cm ⁻³	不同粒径的土壤颗粒质量分数/%					
			1~2 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.50 mm	0.18~0.25 mm	0.15~0.18 mm	0~0.15 mm
设施土壤	0~20	1.28 ± 0.03 ^c	12.48 ± 0.14 ^b	14.24 ± 0.11 ^a	0.82 ± 0.07 ^{ab}	12.11 ± 0.11 ^a	29.70 ± 0.03 ^d	30.65 ± 0.19 ^d
	20~40	1.42 ± 0.04 ^b	11.82 ± 0.10 ^c	9.15 ± 0.28 ^c	0.70 ± 0.21 ^b	12.10 ± 0.38 ^a	31.57 ± 0.32 ^c	34.66 ± 0.45 ^b
	40~60	1.51 ± 0.01 ^a	11.82 ± 0.51 ^c	9.15 ± 0.13 ^c	0.70 ± 0.16 ^b	12.10 ± 0.48 ^a	31.57 ± 0.11 ^c	34.66 ± 0.15 ^b
露地土壤	0~20	1.09 ± 0.01 ^d	13.72 ± 0.19 ^a	8.86 ± 0.27 ^c	1.02 ± 0.01 ^a	12.55 ± 0.29 ^a	28.26 ± 0.13 ^c	35.59 ± 0.06 ^a
	20~40	1.32 ± 0.03 ^c	11.41 ± 0.12 ^c	8.79 ± 0.17 ^c	0.98 ± 0.04 ^{ab}	10.60 ± 0.08 ^b	33.86 ± 0.16 ^a	34.36 ± 0.33 ^b
	40~60	1.30 ± 0.01 ^c	10.63 ± 0.10 ^d	10.30 ± 0.10 ^b	0.87 ± 0.11 ^{ab}	11.91 ± 0.11 ^a	32.63 ± 0.07 ^b	33.67 ± 0.28 ^c

注: 不同小写字母表示 5% 水平上差异显著。

2.2 水分特征曲线的测定与分析

土壤水分特征曲线采用压力膜法测定。将风干后过 2 mm 筛按照实测容重和装有原状土壤的环刀经 24 h 水分饱和后放入压力室,向压力室分别施加 0.01、0.03、0.06、0.1、0.3、0.6、1.5 MPa 压力,在试验过程中保持恒温((20 ± 1)℃),求得相应条件下对应的土壤含水率,得到土壤水分特征曲线。

以均方根误差作为衡量模拟或预测方法准确性的标准,均方根误差计算公式为

$$R_e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X)^2} \quad (6)$$

式中 X ——实测值 X_i ——模拟值或预测值
 n ——样本数

3 结果与分析

3.1 分形维数影响因素分析

对压力膜法实测数据进行整理分析后,得到各土壤在不同土壤水吸力条件下的含水率。选用式(5)对上述 6 种土壤的水分特征曲线值进行最小二乘拟合,结果如表 2(表中 D_3 、 D_4 分别为原状土分形维数、扰动土分形维数)所示。拟合曲线中所得的幂即为 $3 - D$,由此即可计算出分形维数 D ,由表 2 看

出,不论设施土壤还是露地土壤,分形维数都随着土层的加深而增加。这表明在相近质地的供试土样下分形维数的大小与土壤容重密切相关,表现出随着土壤容重的增大,分形维数逐渐增大的趋势。这是由于容重越大,土壤孔隙度越小,相同质地的土壤持水性就越强,施加相同压力其土壤释放出的水分就越少,土壤水分特征曲线越陡峭即式(5)中 λ 越小,那么土壤分形维数就越大。由表 2 可知,无论原状土还是扰动土,设施土壤拟合分形维数均小于同层次的露地土壤,可能是设施土壤容重均大于同层次露地土壤(表 1),表明其设施土壤颗粒比表面积要小于露地土壤,土壤分形维数就越小。由表 2 还可以看出无论设施土壤还是露地土壤,原状土拟合分形维数均大于扰动土。出现以上变化的原因主要是土体经过风干磨细后,改变了土壤本身大小孔隙的组成比例,使得扰动土的孔隙比例组成更加均一化。在相同的容重条件下,原状土的大孔隙比例远大于扰动土,使得在低吸力范围内原状土壤水分更易以优势流的形式释放出来,在高吸力范围内原状土壤含水率也相对较高,土壤水分特征曲线越陡峭,即式(5)中 λ 越小,那么土壤分形维数就越大。以上分析表明,土壤分形维数能够表征土壤物理结构的变化。

表 2 水分特征曲线模型拟合分形维数

Tab.2 Fractal dimension of soil water retention curve

土壤类型	土层深度 /cm	原状土				扰动土			
		D_3	θ_s	h_d	R^2	D_4	θ_s	h_d	R^2
设施土壤	0 ~ 20	2.765	0.420 8	0.003 8	0.995 8	2.716	0.329 5	0.205 4	0.991 1
	20 ~ 40	2.801	0.415 7	0.004 8	0.995 7	2.750	0.380 7	0.256 1	0.990 3
	40 ~ 60	2.805	0.313 0	0.020 4	0.992 5	2.768	0.348 4	0.354 9	0.990 8
露地土壤	0 ~ 20	2.829	0.420 1	0.010 8	0.986 6	2.777	0.362 9	0.243 9	0.986 7
	20 ~ 40	2.834	0.371 5	0.022 3	0.985 8	2.772	0.395 7	0.192 1	0.991 0
	40 ~ 60	2.845	0.380 0	0.021 6	0.980 6	2.798	0.381 3	0.254 6	0.992 4

3.2 原状土、扰动土分形维数与土壤粒径重量分布分形维数的关系

由表 3 看出,分形维数由大到小依次为:原状土分形维数、扰动土分形维数、土壤粒径重量分布分形维数。 D_3 与 D_2 相对误差的绝对值最大值为 5.7%,最小值为 3.8%,平均值为 4.6%; D_4 与 D_2 相对误差的绝对值最大值为 4.0%,最小值为 2.0%,平均值为 2.8%。经拟合分析,得到 D_3 与 D_2 以及 D_4 与 D_2 的关系为

$$D_2 = -19.007D_3^2 + 107.16D_3 - 148.34 \quad (R^2 = 0.9894) \quad (7)$$

$$D_2 = -17.71D_4^2 + 98.139D_4 - 133.25 \quad (R^2 = 0.9821) \quad (8)$$

以上分析表明,基于土壤粒径重量分布推求的分形维数对扰动土拟合精度比原状土要高。主要是土壤颗粒组成分析采用的是风干过 2 mm 筛的扰动土,其土壤物理结构与扰动土壤更接近。原状土分形维数 D_3 与扰动土分形维数 D_4 相对误差的绝对值最大值为 2.21%,最小值为 1.33%,平均值为 1.78%,两者之间的线性关系为

$$D_3 = 1.0003D_4 + 0.049 \quad (R^2 = 0.9227) \quad (9)$$

表3 土壤粒径重量分布分形维数与土壤水分特征曲线拟合分形维数的比较

Tab.3 Comparison between fitted fractal dimension of soil water retention curve and that of soil weight distribution

土壤类型	土层深度/cm	D_3	D_4	D_2
设施土壤	0~20	2.765	2.716	2.645
	20~40	2.801	2.750	2.696
	40~60	2.805	2.768	2.696
露地土壤	0~20	2.829	2.777	2.695
	20~40	2.834	2.772	2.699
	40~60	2.845	2.798	2.687

3.3 原状土与扰动土水分特征曲线模拟与预测

根据式(7)~(9)分别对土壤水分特征曲线进行预测,并计算均方根误差。其中拟合值通过式(5)拟合而得,预测值1是指直接代入 D_2 ,并代入式(4)计算而得。原状土预测值2是指根据式(7)计算 D_2 ,并代入式(4)计算而得,扰动土预测值2是指根据式(8)计算 D_2 ,并代入式(4)而得,预

测值3是指根据式(9)计算 D_3 ,并代入式(4)而得,结果见图1、表4。

从图1和表4可看出,对于扰动土和原状土拟合值,与实测值均基本重合,土壤含水率拟合均方根误差最大值为0.0129,说明式(4)可以用于该地区设施土壤的水分特征曲线预测;对于预测值1,采用重量分布分形维数直接预测水分特征曲线,无论是原状土还是扰动土,在低吸力段的范围内预测效果均较好,随吸力增大,预测值均小于实测值。从土壤含水率拟合误差来看,首先预测值1的土壤含水率预测均方根误差最小值为0.0253,因此采用重量分布分形维数直接预测水分特征曲线是不精确的,其次扰动土预测值1拟合误差均小于原状土。主要是土壤颗粒组成分析采用的是风干过2 mm筛的扰动土,其土壤物理结构与扰动土壤更接近。对于预测值2和预测值3,扰动土和原状土与实测值均具有良好的一致性,均表现出设施土壤预测精度要高于露地土壤的趋势,设施原状土预测值2的土壤含水率预测误差小于0.0083,预测值3的土壤含水率预测均方根误差最大值为0.0063,尤其在低吸力段

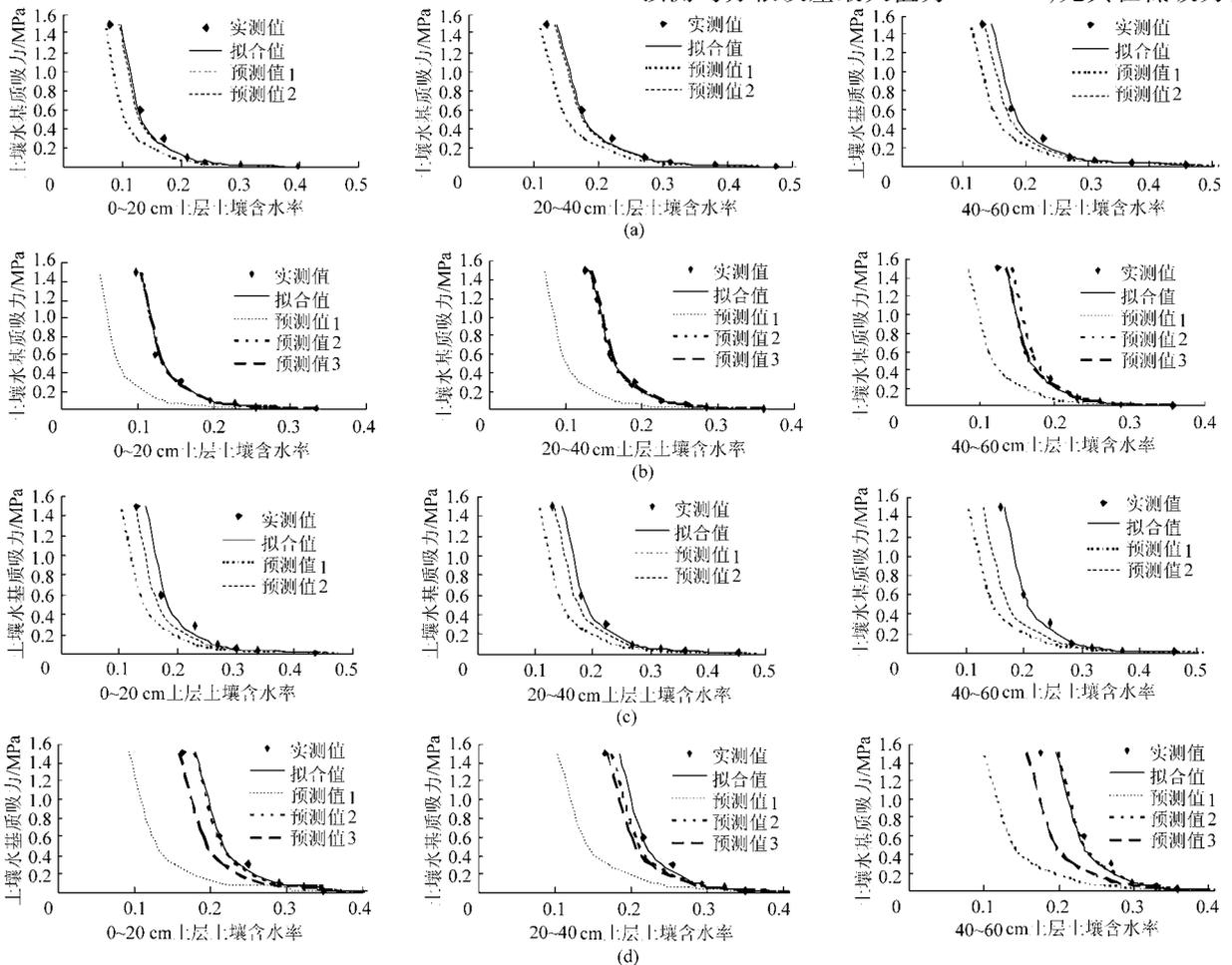


图1 扰动土与原状土水分特征曲线的实测值、拟合值与预测值比较

Fig.1 Measured, fitted and predicted values of the disturbed and undisturbed soil water retention curve

(a) 设施扰动土壤 (b) 设施原状土壤 (c) 露地扰动土壤 (d) 露地原状土壤

表4 土壤含水率预测均方根误差

Tab. 4 RMSE between fitted and predicted values of soil water content

土壤类型	土层深度 /cm	扰动土			原状土			
		拟合值	预测值 1	预测值 2	拟合值	预测值 1	预测值 2	预测值 3
设施土壤	0~20	0.009 7	0.025 3	0.010 0	0.004 9	0.056 7	0.005 0	0.004 9
	20~40	0.010 9	0.025 7	0.011 5	0.004 8	0.056 7	0.004 9	0.005 2
	40~60	0.010 2	0.031 1	0.014 2	0.006 3	0.039 4	0.008 3	0.006 3
露地土壤	0~20	0.011 5	0.035 9	0.019 0	0.012 9	0.066 1	0.012 7	0.017 8
	20~40	0.009 2	0.032 7	0.014 2	0.009 4	0.060 5	0.011 3	0.014 4
	40~60	0.006 6	0.047 2	0.028 2	0.010 6	0.072 4	0.010 7	0.029 1

的范围内,预测效果更佳,随吸力增大,预测值与实测值稍有偏差。这说明对该地区土壤而言,在低含水率范围内式(4)对分形维数的取值较为敏感。

总体而言,预测值 2、预测值 3 优于预测值 1,如果是粗略的田间水分管理,可以选择预测值 1 作为近似值,简单方便。如果需要较为精确的土壤水分特征,选择预测值 2、预测值 3 均可,然而考虑到预测值 3 较预测值 2 更加简便实用,宜优先选择预测值 3。预测值 3 也为室内扰动土壤预测原状土壤水分特征曲线提供了依据。

4 讨论

刘建立^[7]、杨培岭^[9]、管孝艳^[15]等在土壤分形维数影响因素研究中指出,土壤分形维数与土壤质地密切相关,土壤质地越细,分形维数越高。本研究中不同层次设施土壤水分特征曲线(图 1)表明,在相同质地情况下,分形维数的大小与土壤容重密切相关,土壤容重增大,分形维数也逐渐增大。随着分形维数的增大土壤水分特征曲线逐渐变陡,主要是容重的变化会改变土壤孔隙度,从而影响土壤持水能力;而土壤质地是通过改变土壤颗粒的比表面积来影响分形维数的,粘粒含量越高的土壤,土壤颗粒比表面积越大,土壤持水性就越强。对于土壤粒径重量分布分形维数对土壤水分特征曲线分形维数影响的研究,黄冠华^[1]、程冬兵^[2]等基于土壤粒径分形对不同地区不同质地的水分特征曲线表明,两者存在显著的线性相关关系。本研究表明,两者存在二次函数的相关关系,即在水分特征曲线分形维数较高时,土壤粒径重量分布分形维数会逐步降低。可能是在进行重量粒径分析时,粒径小于 0.15 mm 的颗粒没有进行更进一步细分,在土壤分形维数较高时,细颗粒对分形维数的影响较大,导致土壤粒径重量分布分形维数偏低。

本研究表明,扰动土与原状土分形维数之间存在显著的线性相关关系,这可能是扰动土只是破坏

了粒径大于 2 mm 大颗粒,而对粒径小于 2 mm 的颗粒分布破坏较小,因此原状土与扰动土在 0~2 mm 土壤粒径的分布相近,使得两者分形维数存在一定的关系。而原状土分形维数均大于扰动土的分形维数,可能是原状土分析时忽略了大颗粒(粒径大于 2 mm)的影响和土壤的团聚作用。从预测效果来看,通过扰动土分形维数预测原状土水分特征曲线在整个含水率阶段都吻合较好(图 1),其预测精度在各种方法中均是最高(表 4)。因此,根据扰动土壤分形维数预测原状土水分特征曲线是可行的,在实际应用时,只需测定饱和含水率 θ_s 和进气吸力 h_a 及原状土分形维数 D_3 就可比较容易地确定含水率 θ 与吸力 h 之间的关系,扰动土分形维数 D_4 的确定也只需要根据土壤重量分布获取土壤粒径重量分布分形维数 D_2 ,再通过已经建立的原状土分形维数 D_3 与扰动土分形维数 D_4 的关系式以及扰动土壤水分特征曲线模型分形维数 D_4 与土壤粒径重量分布分形维数 D_2 关系式简单转化即可。该方法根据分形理论推出,具有一定的物理意义,为扰动土壤预测原状土壤水分特征曲线提供了依据。

5 结论

(1)根据设施土壤扰动土与原状土的实测水分特征曲线资料推求模型中的分形维数表明,分形维数的大小与土壤容重密切相关,且分形维数随土壤容重的增大而增大;设施土壤拟合分形维数均小于同层次的露地土壤;原状土拟合分形维数均大于扰动土。

(2)比较分析了基于设施土壤水分特性曲线原状土的分形维数与扰动土分形维数的关系,结果表明两者具有良好的线性关系。这为通过室内扰动土柱模拟试验结果来反映大田实际情况提供了依据。

(3)利用基于土壤粒径重量分布的分形维数结合 Brook-Corey 的土壤水分特征曲线模型,对设施土壤原状与扰动土的水分特性曲线进行预测,其中

用土壤粒径重量分布分形维数预测,除低含水率范围的设施土壤外,其预测结果与实测值一致性较好。而通过原状土与扰动土分形维数的关系来预测原状

土的水分特征曲线其预测效果在整个含水率范围内均较好。这为设施扰动土来预测原状土的水分特性曲线提供了一种简便实用的方法。

参 考 文 献

- 黄冠华,詹卫华. 土壤水分特征曲线的分形模拟[J]. 水科学进展,2002,13(1):55~60.
Huang Guanhua,Zhan Weihua. Modeling soil water retention curve with fractal theory[J]. Advances in Water Science,2002,13(1):55~60. (in Chinese)
- 程冬兵,蔡崇法,彭艳平,等. 根据土壤粒径分形估计紫色土水分特征曲线[J]. 土壤学报,2009,46(1):30~36.
Cheng Dongbing,Cai Chongfa,Peng Yanping,et al. Estimating soil water retention curve based on fractal dimension of soil particle size distribution of purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica,2009,46(1):30~36. (in Chinese)
- 郭丽俊,李毅,李敏,等. 壤土土壤水力特性空间变异的多重分形分析[J]. 农业机械学报,2011,42(9):50~58.
Guo Lijun,Li Yi,Li Min,et al. Multifractal study on spatial variability of soil hydraulic properties of lou soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(9):50~58. (in Chinese)
- 苏里坦,张展羽,古丽美拉. 塔里木河干流两岸土壤水分特征曲线的分形模拟[J]. 干旱区地理,2004,27(4):530~534.
Su Litan,Zhang Zhanyu,Gu Limeila. Fractal model for predicting the curves of unsaturated soil water retention along the mainstream of the Tarim River[J]. Arid Land Geography,2004,27(4):530~534. (in Chinese)
- Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco:W H Freeman and Company,1983.
- Tyler S W,Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal,1989,53(4):987~996.
- 刘建立,徐绍辉. 根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线:分形模型的应用[J]. 土壤学报,2003,40(1):46~52.
Liu Jianli,Xu Shaohui. Figuring soil water characteristic curve based on particle size distribution data: application of fractal models[J]. Acta Pedologica Sinica,2003,40(1):46~52. (in Chinese)
- 苏里坦,宋郁东,张展羽. 沙漠非饱和风沙土壤水分特征曲线预测的分形模型[J]. 水土保持学报,2005,19(4):115~118.
Su Litan,Song Yudong,Zhang Zhanyu. Fractal models for predicting unsaturated sandy soil water retention curve in desert [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(4):115~118. (in Chinese)
- 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896~1899.
Yang Peiling,Luo Yuanpei,Shi Yuanchun. Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin,1993,38(20):1896~1899. (in Chinese)
- 徐绍辉,刘建立. 估计不同质地土壤水分特征曲线的分形方法[J]. 水利学报,2003,34(1):78~82.
Xu Shaohui,Liu Jianli. Fractal approach for estimating soil water retention curves of various textures[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(1):78~82. (in Chinese)
- 王康,张仁铎,王富庆. 基于不完全分形理论的土壤水分特征曲线模型[J]. 水利学报,2004,35(5):1~6.
Wang Kang,Zhang Renduo,Wang Fuqing. Model for estimating soil water retention based on incomplete fractal theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,35(5):1~6. (in Chinese)
- Turcotte D L. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research,1986,91(B2):1921~1926.
- Tyler S W,Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(2):362~369.
- Tyler S W,Wheatcraft S W. Fractal processes in soil water retention[J]. Water Resources Research,1990,26(5):1047~1056.
- 管孝艳,杨培岭,吕焯. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. 农业机械学报,2011,42(3):44~50.
Guan Xiaoyan,Yang Peiling,Lü Ye. Relationships between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3):44~50. (in Chinese)