

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.018

粘性土重塑方法分析与破碎性能比较*

丁启朔¹ 沈凤悦¹ 丁为民¹ 李毅念¹ 潘根兴² 姬长英¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要: 对揉搓法与非标准普氏击制样方法进行对比, 结果表明后者为土壤破碎机理研究提供了更多可控的土壤状态, 同时土样的力学行为更为稳定, 因此便于定量研究粘性土的密度、含水率、击实功、比冲击破碎能之间的关系。试验结果表明密度不能准确反映粘性土的粒间结合强度, 而比冲击破碎能可以反映土粒间的结合紧密程度, 这表明传统的以密度或者相对紧实度为参照的土壤耕作比阻预测方法需要改进。将非标准普氏击与冲击破碎测试相结合的试验结果表明, 土样的比冲击破碎能随击实时土壤含水率的增大呈指数增长趋势, 土壤破碎体的分形维数随含水率呈对数下降的规律。

关键词: 粘性土 破碎性能 普氏击制样 分形维数

中图分类号: S152.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0090-05

Comparison of Fragmentation Properties and Remolding Techniques for Clay Soil

Ding Qishuo¹ Shen Fengyue¹ Ding Weimin¹ Li Yinian¹ Pan Genxing² Ji Changying¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Non-standard Proctor compaction as a soil remolding technique was compared with hand-rolling method. Non-standard Proctor compaction modified soil physical states in a large, stable and controlled manner, allowing the investigation of the co-relationship among soil density, water content, compacting work and specific soil fragmentation energy possible. It was found that density alone did not reflect cohesive soil compaction precisely; in contrary the specific fragmentation energy was more sensitive to inter-aggregate cohesion force. Therefore there is a need to refine the habit of using soil density or relative compaction as a proxy for modeling the specific traction in soil tillage research. The combined procedure of non-standard Proctor compaction and fragmentation test provided an increased exponential trend of specific fragmentation energy with respect to soil water content, while the fractal dimension of soil fragments decreased.

Key words: Cohesive soil Fragmentation properties Proctor compaction Fractal dimension

引言

耕作机具对土壤的适应性及其在具体土壤条件下的动力学性能评价一直是耕作力学研究的基础, 国内对耕作机具性能测试的研究有很多^[1-6]。在进

行耕作机具性能测试及评价时首先需要对试验土壤基的物理状态进行评价, 获取其密度(容重)、抗剪强度、含水率等基础指标, 然后通过试验方法建立土壤基础物理参数与机具牵引阻力的关系, 进而实现耕作机具及其工作部件的优化设计^[7-9]。可见此类

收稿日期: 2011-12-22 修回日期: 2012-03-06

* 国家自然科学基金资助项目(50875031)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201161)和江苏省产学研联合创新项目(BY2011160)

作者简介: 丁启朔, 教授, 博士生导师, 主要从事机器-土壤-作物系统力学研究, E-mail: qsding@njau.edu.cn

通讯作者: 丁为民, 教授, 博士生导师, 主要从事农机现代设计理论与方法研究, E-mail: wmding@njau.edu.cn

工作的基础是结合土的密度或者紧实度预测耕作比阻,因此密度或者紧实度被认为是土的基础性状态指标。

鉴于耕作的最终目的是获取松碎状态的苗床以满足作物需求的疏松、透水透气的土壤环境,土壤耕作力学的一个任务是描述土壤在外加机械力作用下的破碎失效行为^[10-12]。在这方面冲击破碎已成为土壤破碎失效定量研究的规范性试验方法^[13-14],土壤冲击破碎分析不仅可以评价土壤的松碎性能,而且还有助于认识土壤的松碎机理^[14]。

我国南方农业多以水田农业为主,地面力学研究较受关注的问题是粘性土壤耕作的力学行为^[15]。粘性土在稻麦轮作过程经稻季的灌水、沉降、固结以及机器的压实后往往需要适当的机械耕作才能提供合适的苗床以利于后续作物的种植,这就要求土壤从致密的粘结态转变为破碎的疏松态^[16]。

粘性土的破碎表现与土的压实度、土壤含水率等因素间的关系,以及耕作机具的动力性能与土壤状态的关系等需要相应的标准试验方法予以定量,然而制作试验用土的方法多种多样,制备土壤基的参数也各不相同,从而不同测试结果之间的可比性较差。而统一性或可比性一直是地面力学研究重视的基础问题,以土的压实度为例,一个常规做法是用土壤压实度或相对密度指标来预测机具耕作阻力和能耗^[17]。Hakansson 提出了相对紧实度的概念以后^[18],因其在不同土壤之间有很好的可比性,该指标被广泛用于土壤理化性状和作物产量评价^[19-23]。因土壤密度、含水率、紧实度、比冲击破碎能等性质的相互关系仍然有待进一步的试验检验,本文针对粘性土,使用非标准普氏击及揉搓法制样,结合冲击破碎试验检验粘性土的破碎力学性质。

1 材料与方法

试验用土壤取自南京市浦口区坡耕地,为粘性黄棕壤。土壤液限、塑限分别为 38.3% 和 21.6%,将取回的土壤经过风干、破碎、过 4 mm 筛,测取土壤含水率,再根据击实试验要求采用喷雾法按 3% 级差调配不同的含水率,调配后土壤的含水率分别为 10%、13%、16%、19%、22%、25%。

1.1 非标准普氏击制样方法

参照汪攀峰等^[24]的试验,采用非标准击实法制备试样,样模为直径 70 mm、高 60 mm 的圆筒,选择 3 个击实行程 h 为:100、300、500 mm。制样前先行预击样确定装土量,令击后土表略高于样模上表面,取下样模后用取土刀切除上表面的不平击样面,得到形状规范的柱状击实土样。将制作的不同含水

率试样风干 1 周后置于温度为 105℃ 的干燥箱内干燥 24 h,取出备用。

1.2 揉搓法制样方法

将筛分出的土壤与水按质量比 1:3 的比例调配含水率,均质化 24 h,参照孟凤英^[10]等的试验采用揉搓法制作出直径为 64 mm 的球,各个球通过计算得出的质量为 237.2 g。而后让球自然风干,每日 3 次定时监控土球的含水率,达到预期含水率时取出球状样置于塑料袋密封均质化 24 h 供试。

1.3 冲击破碎试验

冲击破碎试验在自行设计的手动坠落重锤式冲击破碎装置^[25]上进行,落锤质量为 1.07 kg。将土样置于破碎工作台上,选择合适的冲击行程,将落锤拉起,记录起始位置,松手后落锤击落在土样上,然后记录落锤的终止位置。根据冲击过程中土壤的破碎状况及时筛分,进一步冲击筛分未过筛的土块,直至所有的土壤破碎体都通过 $\phi 32$ 的筛子。破碎过程结束后使用组合筛($\phi 16$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 4$ 、 $\phi 2$ 、 $\phi 1$)筛分土壤破碎体,对各级尺度的土壤破碎体称量并计数。

2 试验结果与分析

2.1 压实度与含水率的关系

相对紧实度^[18-19,22]定义为测试土壤的容重与参考容重的比率。其参考容重是在 200 kPa 的静压力以及自然排水的条件下测得的。参照相对紧实度的概念,将测试土壤的密度(P)与参考密度(P_r)的比率定义为相对击实密度(C),参考密度是在 400 mm (1 849.49 kJ/m³)最佳击实功下获得的最大干密度^[24],密度值为 2.134 g/cm³。相对击实密度的计算公式为

$$C = P/P_r \quad (1)$$

根据土工试验手册,测得不同击实功及含水率下土的密度数据,从而获得测试土壤的相对击实密度,其随含水率变化的曲线如图 1 所示。

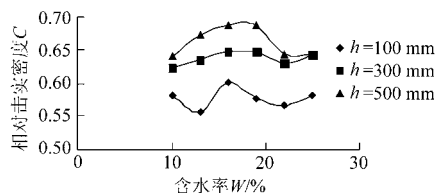


图1 相对击实密度与含水率的关系曲线

Fig. 1 Relationship between water content and relative compaction

从图中可以看出,在 100 mm (87.06 kJ/m³) 工况下的相对击实密度不符合土的击实曲线的一般规律,而在 500 mm (435.3 kJ/m³) 工况下土样的相对击实密度随含水率增大表现出单驼峰的正常变化规

律。由于驼峰体现了土在具体工况下的最大击实密度,本试验所用粘性土在最优含水率和最佳压实状态下所能达到的最大干密度列于表1。

表1 3种击实功下最优含水率和最大相对击实密度

Tab.1 The largest relative compaction and the optimal moisture in three compacting works

| 击实行程/ mm | 击实功/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ | 最优含 水率/% | 最大干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 最大相对击 实密度 |
|-------------|---------------------------------------|-------------|---|--------------|
| 100 | 87.06 | 16 | 1.283 | 0.601 |
| 300 | 261.18 | 19 | 1.383 | 0.648 |
| 500 | 435.30 | 16 | 1.468 | 0.688 |

2.2 比冲击破碎能与含水率的关系

破碎过程所需的总冲击能量 E 的计算公式为

$$E = mg \sum_i h_i \quad (2)$$

式中 m ——冲击锤的质量, kg

h_i ——第 i 次冲击的行程

破碎失效能是评价耕作机具作业性能表现的一个基础技术指标,是耕作机具造成土体出现一定程度破碎所需的能量值。衡量破碎失效能的指标是比冲击破碎能 e_b , 它的一个重要特征是它既与破碎前的土体尺度相联系又与破碎后的土体尺度相关联^[26]。其计算公式为

$$e_b = E/M_i \quad (3)$$

式中 M_i ——颗粒质量

通过冲击破碎试验得到不同击实功下比冲击破碎能与含水率的关系,如图2所示。

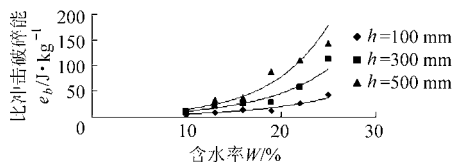


图2 比冲击破碎能与含水率的关系曲线

Fig.2 Relationship between water content and specific fragmentation energy

从图2可以看出,不同击实功下,比冲击破碎能都是以指数形式增长;不同含水率下,比冲击破碎能随着击实功的增大而增大。对其进行曲线拟合,发现其满足指数模型 $e_b = ae^{bW}$ (a, b 为系数), 拟合公式见表2。从表中可以看出, a, b 随着击实功的增大

表2 3种击实功下比冲击破碎能拟合曲线方程

Tab.2 Fitting curves equations of specific fragmentation energy in three compacting works

| 击实行程 h/mm | 拟合曲线方程 | R^2 |
|--------------------|---------------------------|--------|
| 100 | $e_b = 1.7535e^{12.258W}$ | 0.9147 |
| 300 | $e_b = 2.8338e^{13.96W}$ | 0.9405 |
| 500 | $e_b = 2.8811e^{16.502W}$ | 0.9252 |

而增大,且拟合精度较高。

2.3 平均土块径和分形维数与含水率的关系

耕后土壤结构的描述通常使用平均土块径,其计算公式^[27]为

$$D = \frac{\sum (m_i d_i)}{\sum m_i} \quad (4)$$

式中 D ——平均土块径

d_i ——相邻两粒级之间的平均粒径

m_i ——存在于 i 级筛面上土壤的质量

而近来常用于评价土壤破碎体的另一个重要指标是土壤破碎体分形维数^[10]。土壤破碎体的分形维数计算公式^[28]为

$$\frac{M(\delta < \bar{d}_j)}{M_0} = \left(\frac{\bar{d}_j}{\bar{d}_{\max}} \right)^{3-D_m} \quad (5)$$

其中 $\bar{d}_j = (d_j + d_{j+1})/2$

式中 \bar{d}_{\max} ——最大粒级的平均粒径

$M(\delta < \bar{d}_j)$ ——粒径小于 \bar{d}_j 的颗粒累积质量

M_0 ——各粒级颗粒质量之和

D_m ——土壤破碎体的质量分形维数

其计算步骤为:①以各分级区间上下限的算术平均值来表示平均粒径。②统计出大于各区间代表粒径的累积质量,然后将式(5)转化为对数形式。③获取拟合相关直线的斜率,即 $3 - D_m$,从而可以求出分形维数 D_m 。

2.3.1 击实试样

对图3进行曲线拟合,发现其满足对数模型 $D_m = c \ln W + d$ (c, d 为系数), 拟合精度较高。

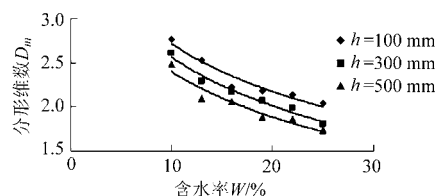


图3 分形维数与含水率的关系曲线

Fig.3 Relationship between fragments fractal dimensions and soil moisture content

高的土壤颗粒分形维数表明土壤具有较高的破碎度,即土壤的颗粒尺度分布较多地被小尺度的土壤团聚体占据。而较低的土壤颗粒分形维数表明较大尺度的土壤团聚体所占比重较大。从图3、4可知,分形维数随含水率和击实功的增大呈对数下降规律,平均土块径随含水率和击实功的增大呈对数增长趋势。但当含水率达到一定程度后,继续增大击实功不再造成土块结合强度的明显变化。这些关系表明含水率和击实功越大,土的粘结强度越高,不易破碎,不仅破碎时消耗的能量更大(图2),而且破

碎度也越低,大尺度土壤团聚体趋多(图4)。

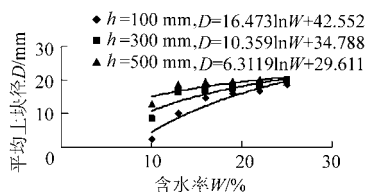


图4 平均土块径与含水率的关系曲线

Fig. 4 Relationship between clods' mean diameter and soil moisture content

2.3.2 揉搓试样

对揉搓法制作的样品进行冲击破碎后发现,试样在含水率为13%左右时开始破碎,具有明显的破碎表征,破碎尺度分布呈分形分布。从图5可以看出,分形维数随含水率变化的规律不明显。

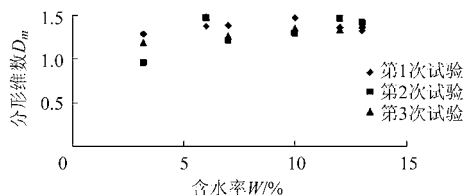


图5 揉搓试样的分形维数与含水率关系

Fig. 5 Relationship between fragments fractal dimensions and soil moisture content for hand-rolling soils

然而,比照图5和图6发现,击实试样的破碎分形维数的离散性较揉搓试样有所改善。分析原因,可能是因为每次揉搓对力度的控制不易把握,导致每个试样的密度不等,另外手的揉搓不能保证土球的圆球度,这些因素都会影响到结果的稳定性;与此相比击实法制样时击实行程和锤重都不变,可较好地控制击实功,同时也能较好地控制样模试样形状,所以采用非标准普式击制样法在试验操作规范上比揉

搓法有所改善。

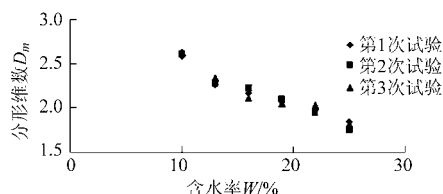


图6 击实行程为300 mm时击实试样的分形维数与含水率关系

Fig. 6 Relationship between soil fragments fractal dimensions and soil moisture content for non-standard Proctor compaction soils in 300 mm displacement

3 结论

(1)使用非标准普式击方法制作的试验用土样较之揉搓法具有丰富的物理状态,而且数据的离散性显著改善,因此非标准普氏击制样方法可以作为地面力学试验研究的基本实验室方法。

(2)密度或者相对密度并不能准确反映粘性土的压实结合强度,而比冲击破碎能随土的含水率增加而不断增强,因此该指标能够反映土粒之间的结合强度。

(3)比冲击破碎能随含水率呈指数增长的变化趋势,指数项的幂次项及指数项的系数都随击实功的增大而增大,说明击实功对粘性土压实的贡献较之含水率更为显著。

(4)分形维数随含水率增大呈对数下降规律,平均土块径随含水率的增大呈对数增长趋势,说明随着土的结合强度的增大,破碎所需的能量就增加,破碎度也就越低。

参 考 文 献

- 郭志军,杜干,周志立,等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47~52. Guo Zhijun, Du Gan, Zhou Zhili, et al. Actuality analysis of resistance properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47~52. (in Chinese)
- 张士国. 基于Pro/ENGINEER二次开发的犁体曲面计算机辅助设计研究[D]. 南京:南京农业大学, 2007.
- 丁为民,王耀华,彭嵩植. 反转旋耕刀正切面分析及参数选择[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 40~43. Ding Weimin, Wang Yaohua, Peng Songzhi. Analysis on sidelong portion of up-cut rotary blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 40~43. (in Chinese)
- 丁为民,王耀华,彭嵩植. 正、反转旋耕不同耕作性能的比较[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(3): 106~109. Ding Weimin, Wang Yaohua, Peng Songzhi. Comparison on performances of up-cut and down-cut rotary tillage [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2003, 26(3): 106~109. (in Chinese)
- 丁为民,王耀华,彭嵩植. 正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(1): 113~117. Ding Weimin, Wang Yaohua, Peng Songzhi. Comparison experiment and property analysis of up-cut and down-cut rotary blades [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24(1): 113~117. (in Chinese)
- 苏元升,高焕文,张晋国. 免耕播种开沟器工作性能的测试与分析[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(4): 28~30. Su Yuansheng, Gao Huanwen, Zhang Jinguo. Measurement and analysis on working performance of tine furrow openers on no-tillage soil [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(4): 28~30. (in Chinese)

- 7 贾洪雷,汲文峰,韩伟峰,等. 旋耕-碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):45~50.
Jia Honglei, Ji Wenfeng, Han Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 45~50. (in Chinese)
- 8 李考年. 轻型高速低阻犁的试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
- 9 张毅. 耕作机具部件仿生设计与研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2002.
- 10 孟凤英,丁启朔,鹿飞,等. 冲击作用下粘性土壤破碎体的分形维数与影响因素[J]. 农业机械学报,2009,40(3):108~111.
Meng Fengying, Ding Qishuo, Lu Fei, et al. Fragmentation fractal dimensions of cohesive soil under impact and its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 108~111. (in Chinese)
- 11 丁启朔,丁为民,潘根兴. 多尺度多分辨率破碎方法评价土壤结构的原理及其应用[J]. 农业工程学报,2008,24(12):132~136.
Ding Qishuo, Ding Weimin, Pan Genxing. Theory and application of multi-scale and multi-resolution fragmentation method for soil structure evaluation [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12): 132~136. (in Chinese)
- 12 孔令德,桑正中. 正转旋耕土壤破碎情况的研究[J]. 农业机械学报,2001,32(3):31~32,54.
Kong Lingde, Sang Zhengzhong. Evaluation of crushing soil form rotary tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(3): 31~32, 54. (in Chinese)
- 13 Johan Arvidsson, Thomas Keller, Karin Gustafsson. Specific draught for moldboard plough, chisel plough and disc harrow at different water contents [J]. Soil & Tillage Research, 2004, 79(2): 221~231.
- 14 Hoogmoed W B, Cadena-Zapata M, Perdok U D. Laboratory assessment of the workable range of soils in the tropical zone of Veracruz, Mexico [J]. Soil & Tillage Research, 2003, 74(2): 169~178.
- 15 翟力欣,姬长英,丁启朔. 流变态土壤切削试验用室内土槽与测试系统设计[J]. 农业机械学报,2010,41(7):45~49.
Zhai Lixin, Ji Changying, Ding Qishuo. Research on indoor soil bin and test system for rheological soil tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 45~49. (in Chinese)
- 16 丁启朔,潘根兴,丁为民. 稻田耕后土壤结构的描述方法与指标——以南京江浦农场为例[J]. 土壤通报,2011,42(1):1~6.
Ding Qishuo, Pan Genxing, Ding Weimin. Approaches and indices for post-tillage paddy soil structure modeling: a case study in Nanjing Jiangpu farm [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 1~6. (in Chinese)
- 17 李汝莘,史岩,迟淑筠,等. 机器轮胎引起的土壤压实及其耕作能量消耗[J]. 农业机械学报,1999,30(2):12~16.
Li Rushen, Shi Yan, Chi Shuyun, et al. Soil compaction and tillage energy consumption caused by tires of agricultural machines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(2): 12~16. (in Chinese)
- 18 Hakansson I, Lipiec J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction [J]. Soil and Tillage Research, 2000, 53(2): 71~85.
- 19 杨晓娟,李春俭. 机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J]. 中国农业科学,2008,41(7):2008~2015.
- 20 Reichert J M, Suzuki L E A S, Reinert D J, et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(2): 242~254.
- 21 Lipiec J, Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth [J]. Geoderma, 2003, 116(1~2): 107~136.
- 22 石彦琴,陈源泉,隋鹏,等. 农田土壤紧实的发生、影响及其改良[J]. 生态学杂志,2010,29(10):2057~2064.
Shi Yanqin, Chen Yuanquan, Sui Peng, et al. Cropland soil compaction: its causes, influences, and improvement [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 2057~2064. (in Chinese)
- 23 Hakansson I, Keller T. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content [J]. Geoderma, 2010, 154(3~4): 398~406.
- 24 汪攀峰,丁启朔. 黏土单层击实试验与制样因子研究[J]. 岩土力学,2010,31(6):1797~1802,1808.
Wang Panfeng, Ding Qishuo. Study of dynamic compaction of monolayer cohesive soil and factors for remolded soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(6):1797~1802,1808. (in Chinese)
- 25 Watts C W, Dexter A R, Dumitru E A. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilization during tillage. part 1. A laboratory test [J]. Soil & Tillage Research, 1996, 37(2~3):161~174.
- 26 丁启朔. 耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D]. 南京:南京农业大学,2006.
- 27 辜松,刘立意,小松崎将一,等. 覆盖物对土壤物理特性及旋耕作业的影响分析[J]. 农业机械学报,2005,36(5):41~44.
Gu Song, Liu Liyi, Komatsuzaki Masakazu, et al. Effect of crops on soil physical properties and rotary tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 41~44. (in Chinese)
- 28 杨金玲,李德成,张甘霖,等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. 土壤学报,2008,45(3):413~419.
Yang Jinling, Li Decheng, Zhang Ganlin, et al. Comparison of mass and volume fractal dimensions of soil particle size distributions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3): 413~419. (in Chinese)