DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.008

# 农田土壤表层粗糙度信息解析\*

# 张慧娟 孙宇瑞

(中国农业大学精细农业研究中心,北京 100083)

【摘要】 耕作后农田土壤地貌属于具有趋向性的随机表面。由随机过程角度看,它随时间的变异满足各态遍 历性质。揭示它的时空变异特征对于客观评价农田耕作质量、探讨表层土壤水运移规律、优化农田管理具有较高 的实用价值。因此,基于各种粗糙指数的信息解析是精细农业技术体系研究热点之一。本文从不同尺度数学模型、时空变异多因素分析、直接与潜在应用价值等方面作了系统性分析。

关键词: 土壤 粗糙度 耕作 时空变异 信息解析
 中图分类号: S126 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)03-0033-07

# Soil Surface Roughness Indices, Interpretation and Application

Zhang Huijuan Sun Yurui

(Research Center for Precision Farming, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

#### Abstract

The surface elevation of a tilled field shows both oriented and random morphologies. Based on stochastic process theory, the temporal variability of the tilled surface roughness over time fulfills the ergodic property. Characterizing the temporal/spatial variability of the tilled surface by using different indices is beneficial in assessing the tilled quality, studying soil water movement, and for optimal management of agricultural field. Therefore, interpretation of various roughness indices has become a focus in precision agriculture worldwide. In this general review, a broad discussion of soil surface roughness that contains multi-scale models, multi-factor analysis on temporal/spatial variability, and direct or potential utilities in agricultural activity was provided.

Key words Soil, Surface roughness, Tillage, Temporal/spatial variability, Interpretation

## 引言

农田土壤表层轮廓的凹凸形成既有人为耕作 (耕具与耕作方式)的主导成因,又受制于土壤团聚 结构,以及各种自然界外力(降雨、风蚀、重力沉降) 的"打磨"作用。另一方面,农田地表水的径流与人 渗、土壤呼吸状况和土壤抗风蚀强度,都与土壤粗糙 度存在着不同程度的相关性。

根据前人的研究结果<sup>[1]</sup>,土壤表面轮廓在大尺度上表现为周期性变异特征,例如耕作后形成的沟 垄分布,它被视为一种定向粗糙度。在小尺度上表 现为不同颗粒团聚体的非定向空间分布,称作随机 粗糙度,地貌粗糙度泛指二者的迭加。可以想象它 在 3-D 空间分布上表现为定向、周期结构与不确定 随机变化的组合。目前提出的各种数字高程模型多 是基于离散枚举方式,即以有限的规则分布样本点 高度来刻画微地形复杂程度。由傅里叶级数理论 知,2-D 平面上任意非周期的复杂函数可以看作无 穷多个周期函数的叠加。对于土壤表层轮廓分析同 样如此,无论地貌形态如何,它均可视为 3-D 空间上 无限多个轮廓所组成,而每个轮廓线则对应于一个 函数。

收稿日期: 2009-05-15 修回日期: 2009-08-05

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(30871454)、国家 "863" 高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z205)和中德科研合作项目 (PPP20043067)

作者简介:张慧娟,博士生,主要从事信号处理与应用数学建模研究,E-mail: shuiyincy123@163.com

通讯作者:孙宇瑞,教授,博士生导师,主要从事精细农业传感器及控制技术研究,E-mail: pal@ cau. edu. cn

早期,土壤粗糙度测量常用的手段是链条 法<sup>[2-3]</sup>或梳篦法<sup>[4-5]</sup>。这两种机械式测量装置不仅 工作效率低,更主要的弊端是它们均属于接触式测 量方法,测量探针在与土壤接触过程中直接扰动采 样点,因此无法满足土壤粗糙度测量的高精度要求。 近年来随着微电子技术的迅速发展,人们试将 3-D 图像采集技术<sup>[1,6-8]</sup>与激光扫描技术<sup>[9-14]</sup>分别应用 于测量土壤表面粗糙度,它们在测量过程中不直接 触及样本,测量分辩力可以达到 1 mm 甚至更高。 这不仅保证了能够进行高精度的实时测量,更重要 的是它为土壤粗糙信息的尺度分解提供了可能性。 由本文的模型与粗糙指数分析可以看到,这种尺度 分解类似于频域分解的傅里叶变换,它可对土壤耕 作轮廓的周期特征与随机特征分别进行提取并深入 研究。

本文从时空变异多因素定性分析、多尺度数学 建模、直接与潜在应用价值等3个方面给出系统性 概括与归纳。

## 1 农田地貌时空变异多因素分析

大量研究表明,农田地貌的成因是多方面的 (图1),其中既有人为耕作的主观效果,又取决于土 壤自身质地结构,此外,各种外界扰动因素也必须加 以考虑。





### 1.1 耕作方式与机具

从农田管理角度看,耕作方式与机具选择取决 于农业生产的客观需要,从耕作后直观效果看耕作 方式与机具选用决定了表层土壤的外轮廓分布形 式。耕作方式与机具的影响既有大尺度的外表轮廓 变化,又有小尺度粗糙程度的改变,前者具有明显周 期特征,而后者则服从某种随机分布。因此,直观定 性地说人为耕作后农田地貌具有定向性的随机特 征。 迄今为止,部分学者针对耕作对地貌粗糙度的 影响进行了一些研究,但结论差异较大。这主要是 由于耕作过程包括诸多因素,例如耕作器具的组合 个数、耕作深度、速度、耕作次数,残茬种类、轮作历 史、土壤类型和土壤含水率等<sup>[15-16]</sup>。文献[17]认 为耕作器具与耕作方式会影响团聚体和土壤颗粒的 数量,从而影响地表粗糙程度。文献[11,18~19] 等认为耕作深度越深则地貌起伏差异越大。但随着 复耕次数的增加,地貌粗糙度减小。

#### 1.2 土壤质地

实际上,土壤的各种物理性质几乎都不同程度 地受到土壤质地的影响,土壤表面粗糙度也不例外。 研究表明,影响土壤基质特征最具决定作用的是土 壤粘粒,因它具有巨大的表面比,在物理与化学过程 中最为活跃,已具有胶体的性质,在团粒的形成过程 中起着关键作用<sup>[20-21]</sup>。虽然土壤质地被视为一种 不可控因素,但是它几乎不随时间的变化而改变。 也就是说,对于确定机械组成的农田,其质地影响是 稳定的。

## 1.3 土壤水分

土壤水分的影响主要表现为土壤在湿润和干燥 中的膨胀与收缩,它与土壤质地构成有关,也是一种 不可控因素。有一点可以肯定,它对地貌轮廓的影 响主要反映在小尺度上。但是需要特别指出的是, 耕作时刻土壤含水率对于农田地貌的影响既表现在 大尺度上,也反映在小尺度上。耕作时土壤含水率 过高往往造成土壤粘聚和塑出农具形态,过干耕作 则易粉碎土壤成松散颗粒。因此,只有选择在适度 的土壤含水率下耕作才能形成较理想的团聚状态, 尤其有利于1~10 mm 粒径团聚体的构成<sup>[20]</sup>。

#### 1.4 土壤有机质

土壤有机质含量能够不同程度地改变土壤团聚 粒结构,因此,它必然也在一定程度上影响着农田地 貌形态。文献[21]指出,尽管关于有机质对土壤结 构形成作用机制与改善土壤物理性质等方面的机理 尚不十分清楚,还有待深入研究,但其改善土壤结构 和物理性状的功效不容置疑。

### 1.5 气象因素

文献[22]认为,在影响土壤粗糙程度的诸多气象因素中,降雨的影响最为显著。这是因为在降雨过程中,雨点携带巨大的动能冲击地表,使得团粒快速湿润并解体,从而改变土壤粗糙度。为此一些学者通过在自然降雨或人工模拟降雨条件下记录的降雨量或降雨动能,研究地貌粗糙当量指数在降雨前后的变化,并给出一些经验模型<sup>[22-29]</sup>。文献[30]认为基于多重分形理论的粗糙表征指数更能表征地

表高程由于气象因素的影响在空间结构上所产生的 微小变化。此外,风对地貌的剪切作用<sup>[31]</sup>,冻土与 解冻过程<sup>[32]</sup>,都会导致地貌粗糙度的改变。

#### 1.6 蚯蚓活动

在蚯蚓数量较大时,它对农田表层土壤的扰动 是不可忽视的。文献[20]指出,蚯蚓的活动不仅可 促进土粒与有机质的结合,并穿留穴道使得土壤疏 松。此外,蚯蚓的分泌物和排泄物有利于土粒的聚 合,进而改变土壤的某些物理化学性质。文献[33] 也研究了土壤中弹尾目昆虫和线蚓科动物数量对土 壤表面粗糙度的影响。

## 1.7 重力下沉

文献[34]注意到了耕作翻松后的土壤随时间 推移受重力作用逐渐下沉的事实。显然,土壤结构、 土壤水分与容重分布,都会不同程度影响重力下沉, 这种因素也会导致粗糙度在一定程度的改变。

## 2 基于农田地貌粗糙度的多尺度模型分析

为了定量解析以上诸因素对农田地表粗糙度的 影响,试图应用各种不同的数学方法去揭示其差异 分布与随时间的渐变规律。尤其是面对农田中定向 粗糙度与随机粗糙度叠加的复杂现实,定义不同尺 度的粗糙指数对其时空变异进行研究。

## 2.1 随机粗糙度指数

文献[19,35~36]将测量农田区域内的地貌起 伏平均高度 z 作为参考点,应用统计学中的标准方 差 R 作为刻画地貌不平程度的当量指数。对于平 面 2-D 测量为

$$R_{2D} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m} (z_i - \bar{z})^2}$$
(1)  
$$\bar{z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} z_i$$

式中 m——剖面上的测量点数

z;——在点处的高度值

该式提供的是任意行或列采样点的高度差异统 计信息。同理,对于空间 3-D 测量为

$$R_{3D} = \sqrt{\frac{1}{mn - 1} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} (z_{ij} - \bar{z})^2}$$
(2)  
$$\bar{z} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} z_{ij}$$

## 2.2 微变程指数与大变程指数

显然,以上所定义的当量指数 R 无法描述耕作 农田的沟垄分布特征和不同颗粒团聚体的随机高度 差异。即无法提供尺度分离的农田表层粗糙信息。 为此文献[37]提出定义微变程指数 L<sub>p</sub> 和大变程指 数 L<sub>s</sub>

$$L_D = \frac{1}{a} \tag{3}$$

$$L_s = \frac{1}{b} \tag{4}$$

式中参数 a、b 的计算过程为

$$\Delta z_h = \frac{\sum_{i=1}^m |z_i - z_{i+h}|}{m}$$

式中 z<sub>i</sub>, z<sub>i+h</sub> ——间隔为 h 的两点处的高程 进一步将 h 视为参变量,上式改写为

$$\Delta z_h = \frac{h}{ah+b}$$

因此,当h取得足够小时候,L<sub>D</sub>数值主要反映 了小尺度的高程变异信息,即高频分量信息。反之, 当变程h取得足够大,L<sub>s</sub>则主要提供了大尺度下表 层轮廓变异的低频信息。

## 2.3 自相关函数和自相关长度

考虑到地貌轮廓线变化与耕作机具密切相关, 文献[38~39]提出借助于自相关函数 A<sub>F</sub> 提取地貌 轮廓起伏的周期特征,即自相关长度 h<sub>AF</sub>。

$$A_{CF} = \frac{C(h_{AF})}{C(0)}$$

$$C(h_{AF}) = \text{cov}(z(x), z(x + h_{AF}))$$
(5)

由自相关函数基本定义知,它属于一类低通滤 波器,所以,它的滤波结果实质上提供了关于耕作后 农田表层土壤的低频特征信息,即沟垄的周期性特 征。

## 2.4 微地貌指数

文献[10,40]针对应用链条法或梳篦法获得的 2-D 测量值提出一种经验指数

$$M_{IF} = M_I F \tag{6}$$

式中 *M*<sub>1</sub>——单位长度上地形曲线和整个斜面的 回归曲线之间的面积

F——单位长度上出现峰值的个数

这个指数与采样间隔的选取有关,采样间隔选 得越小,单位长度上出现峰值的个数可能越多,且不 同地貌的采样区间可能有相同的 *M*<sub>IF</sub>值。

#### 2.5 坡度与弯曲度指数

其中

坡度是描述地貌形态特征的常用参数。对于空间曲面上任意给定点,坡度定义为该曲面该点法线 方向与垂直方向之间的夹角

$$\theta_{i,j} = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_{i,j}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{i,j}}{\partial y}\right)^2}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial z_{i,j}}{\partial x} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2\delta_x} \quad \frac{\partial z_{i,j}}{\partial y} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2\delta_y}$$

弯曲度指数 *T<sub>B-3D</sub>*是基于坡度概念提出的,它定 义为若干点处的弯曲度的统计平均<sup>[41]</sup>,即

$$T_{B-3D} = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_{i,j}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_{i,j}}{\partial y}\right)^2}$$
(8)

从几何意义上看, $T_B$ 表示为空间曲面的实际面积 $S_1$ 与影面积 $S_0$ 之比,显然 $0 < T_B \leq 1$ 。特别应当指出的是式(7)和式(8)表明 $\theta$ 与 $T_B$ 是定义在差分尺度下的当量指数。因此,可以用来刻画地貌轮廓起伏的空间变异特征。

## 2.6 分形和多重分形分析

基于土壤地貌起伏变化具有分形特征的假设, 文献[3,42]提出基于弯曲度的两个分形指数  $F_B$  与  $F_M$  为

$$\ln T_{B-2D} = F_B \ln d + c \tag{9}$$

$$\ln T_{S-2D} = F_M \ln e + f \tag{10}$$

其中 
$$T_{B-2D} = \frac{L_1}{L_0}$$
  $T_{S-2D} = 100\left(\frac{L_1 - L_0}{L_1}\right)$ 

式中 T<sub>B-2D</sub>、T<sub>S-2D</sub>——轮廓线弯曲度指数

L1——剖面地形的实际长度

L<sub>0</sub>——剖面地形在水平面的投影长度

d、e——采样间隔

法的计算精度较高。

 $F_B$ 、 $F_M$ 、c、f——回归系数

具体计算过程为:计算不同采样间隔  $d(或 \neq e)$ 对应的  $T_{B-2D}($ 或者  $T_{S-2D})$ ,两边同时取对数,作线 性回归,得到的斜率即为分形指数  $F_B($ 或者  $F_M)$ 。

文献[43~44]提出一种基于半方差理论的分形指数 D

$$\begin{cases} D = 3 - H \\ \lg \gamma = 2H \lg h + g \end{cases}$$
式中  $\gamma$ ——半方差 ——采样间隔

 $H_{g}$ ——回归系数,计算同式(9)和(10)

文献[45]认为土壤地貌粗糙度具有统计自仿 射特性,可用处处连续与不可导且具有自仿射特征 的理想分形曲线 Markov – Gaussian 来模拟。文献 [38,46~48]利用此标准函数分别对常用的计算表 面粗糙度分形维数的方法进行了比较,认为均方根

对于严格数学意义上的单一分形,它们具有自相似性和跨越不同尺度的对称性,即具有标度不变性,文献[49]认为土壤地貌只是在一定尺度范围内 具有分形特征,这只是一种伪分形。而文献[50~ 51]认为地貌粗糙度分形维数随空间尺度不同而变 化,所以一个分形维数难以表达其复杂性,往往需要 多个分维(多重分形 multifractal)与统计参数一起定 量刻画地貌粗糙度。

## 3 模型解析与应用

## 3.1 地表入渗与农田持水量

可以想象,降水入渗与地表径流必然与农田表 面起伏和粗糙程度密切相关,地势越低洼则积水的 可能性越大<sup>[52]</sup>。农田最大持水量(maximum depressional storage,简称 MDS) 是研究入渗和地表 径流的重要特征参数,但是该参数很难直接测量获 得,于是一些学者建议用地表粗糙度指数预测 MDS。文献 [53] 首先提出了用随机粗糙度指数 R (式(1))预测 MDS 的线性模型,此后部分学者又提 出3种粗糙度指数预测基于 MDS 的非线性模 型<sup>[54~55]</sup>,这些指数涉及到随机粗糙度  $R(\mathfrak{I}(1))$ 、 微变程指数  $L_{0}(\exists(3))$ 、大变程指数  $L_{s}(\exists(4))$ 、 坡度指数  $\theta(\mathfrak{I}(7))$  和弯曲度指数  $T(\mathfrak{I}(8))$ 。文 献[56]专门定义 MUD(mean upslope depression)指 数描述农田持水能力,该指数依赖于地表粗糙程度 和坡度,可直接用来预测 MDS。文献[55]总结并比 较了这些模型,指出由于指数L,和T的计算依赖于 测量尺度,且与 MDS 的关系不唯一,故不适于预测 MDS。在另外3个指数中,只有R与MDS的相关性 最高( $R^2 = 0.80$ ),但是由于 R 无法刻画 MDS 的空 间变异特征,因此该指数在应用上也有其局限性。

### 3.2 农田表层孔隙度与粗糙度的映射与反演关系

土壤既然属于典型的多孔介质,孔隙性质必然 成为其基本属性之一。在土壤物理中,孔隙度定义 为单位容积空间内土壤中水分与气体分子所占空 间,它反映了不同粒径土粒和团粒的随机分布与排 列的紧实程度。农田环境下土壤孔隙度的取样测定 不仅工作量大,测定步骤繁琐,而且由于样本需要脱 水烘干而非常耗时。文献[49]曾定性地指出,农田 表层看上去越粗糙,则意味着孔隙度越高。文献 [11,34]进一步指出,目前基于激光斜射原理的土 壤表面粗糙度快速、高精度测量方法在技术上已经 突破,如果能够深入定量研究表层孔隙度与不同尺 度下粗糙指数的映射与反演规律,有可能实现农田 环境下土壤孔隙度的快速测定。文献[11]首先尝 试应用上述式(2)作为定义的粗糙指数在一块典型 壤土(silt-loam)农田结合铧式犁、旋耕机、圆盘耙等 3种耕作方式下进行了探索性研究,试验结果表明 两参数间存在着正相关性 $(0.70 < R^2 < 0.80)$ ,初步 证实了文献[49]的推断。此后文献[34]认为式(2) 定义的粗糙指数在尺度上无法区分定向粗糙度与随 机粗糙度,通过尝试重新定义小尺度差分粗糙指数, 在同样一块农田上结合4种耕作方式继续试验,得 到了更好相关性(0.89 < R<sup>2</sup> < 0.98)的结论。然而

对于这些映射模型指数对不同质地土壤的适应性, 还有待继续研究。

#### 3.3 地表粗糙度与风蚀

由风蚀的基本过程可知<sup>[31]</sup>,风对地面的剪切作 用所产生的上举力和拖拽力使地表的疏松颗粒进入 气流跃迁到下风方向的某一位置,颗粒降落到地面 时,可能被"捕捉",也可能反弹起来,同时冲击其它 土壤颗粒使之运动。文献[31]首先提出用防护角 (shelter angle) 描述地表粗糙度,其中防护角是指颗 粒到达某一指定点时必须倾斜的最大角度,该研究 将防护角大于15°的点作为受到保护而免受风蚀作 用的点。随后该文献研究了地表随机粗糙度(R)和 土垄高度与风蚀的关系,计算结果表明地表随机粗 糙度小于3mm时,所有地面均受到磨蚀,而随机粗 糙度大于3 mm 时,地面受磨蚀的比例随粗糙度的 增大而减小,且近似为指数关系。具有土垄屏蔽的 地面抗风蚀能力与土垄高度密切相关,当土垄高度 低于 100 mm 时,其抗风蚀效果随土垄高度的变化 而显著不同。而当土垄高度大于 100 mm 时, 土垄 的屏障作用近似保持不变。由此可知,应将土垄的 屏障作用与随机粗糙度综合考虑,才有可能客观评 价耕作农田的地表抗风蚀效果。

### 4 结束语

农田土壤表面轮廓与粗糙度的形成既有人为耕 作因素,又有无法抗拒的复杂环境外因的影响。从 土壤本身看,多孔介质三态共存,相互作用,这些都 决定了这一领域的研究难度与挑战性。回顾 20 世 纪80年代,文献[16]曾指出农田表层土壤信息的 快速、准确获取与信息解析是制约深化研究的两大 瓶颈。经过前人的不懈努力,如今信息获取的技术 瓶颈已经解决,信息解析的理论与应用研究则自然 成为当前精细农业的一个关注热点。目前,国际上 对于农田表面粗糙度的信息解析研究主要集中在 3个方面:耕作质量的客观评价,在环境变化等外力 作用下的渐变过程,与其他土壤物理参数的相互关 系和影响。因此,土壤粗糙度的定量化研究对于农 田尺度的精细耕作与优化管理,具有重要的理论价 值与应用前景。基于表层农田粗糙度的、不同尺度 下的信息解析应首先考虑选择更多的实际应用作为 切入点,可以检验前人给出的各种理论模型指数的 应用价值,进而可推动该领域研究的全局发展。

参考文献

- Taconet O, Ciarletti V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammertry [J].
   Soil & Tillage Res., 2007, 93(1): 64 ~ 76.
- 2 Saleh A. Soil roughness measurement: chain method [J]. J. Soil Water Conserv., 1993, 48(6): 527 ~ 529.
- 3 Merrill D. Comments on the chain method for measuring soil surface roughness: use of the chain set[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62(4): 1147 ~ 1149.
- 4 Kuipers H. A reliefmeter for soil cultivation studies [J]. Neth. J. Agric. Sci., 1957, 5(4): 255 ~ 262.
- 5 Podmore T H, Huggins L F. An automated profile meter for surface roughness measurements [J]. Trans. of the ASAE, 1981, 24(3): 663 ~ 665, 669.
- 6 Welch R T, Jordan T R, Thomas A W. A photogrammetric technique for measuring soil erosion [J]. J. Soil Water Conserv., 1984, 39(3): 191 ~ 194.
- 7 Warner W S. Mapping a three-dimensional soil surface with handheld 35 mm photography [J]. Soil Tillage Res., 1995, 34(3): 187~197.
- 8 Garcia Moreno R, Saa Requejo A, Tarquis Alonso A M, et al. Shadow analysis: a method for measuring soil surface roughness[J]. Geoderma, 2008, 146(1~2): 201~208.
- 9 Huang C, Bradford J M. Portable laser scanner for measuring soil surface roughness [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54(5): 1402 ~ 1406.
- 10 Romkens M J, Wang J Y. Effect of tillage on surface roughness [J]. Trans. ASAE, 1986, 29(2): 429~433.
- 11 Sun Y R, Lin J H, Schulze Lammers P, et al. Estimating surface porosity by roughness measurement in a silt-loam field [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2006, 169(5): 630 ~ 632.
- 12 Aguilar M A, Aguilar F J, Negreiros J. Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(4): 504 ~ 517.
- 13 Croft H, Anderson K, Kuhn N J. Characterizing soil surface roughness using a combined structural and spectral approach [J]. European Journal of Soil Science, 2009, 60(3): 431 ~ 442.
- 14 蔡祥,孙宇瑞,林剑辉,等. 基于激光反射的土壤表面粗糙度测量装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(1):
   68~71,91.

Cai Xiang, Sun Yurui, Lin Jianhui, et al. Design of a laser scanner for characterizing soil surface roughness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(1):68 ~71,91. (in Chinese)

- 15 吕悦来,李广毅. 地表粗糙度与土壤风蚀[J]. 土壤学进展,1992,20(6):38~42.
- 16 Zobeck T M, Onstad C A. Tillage and rainfall effects on random roughness: a review[J]. Soil & Tillage Research, 1987, 9(1):1~20.
- 17 Garcia Moreno R, Diaz Alvarez M C, Tarquis Alonso A, et al. Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions [J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 35 ~ 44.
- 18 Romkens M J, Wang J Y. Effect of tillage on surface roughness [J]. Trans. ASAE, 1986, 29(2): 429 ~ 433.
- 19 Allmaras R R, Burwell R E, Larson W E, et al. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage [R]. Washington, D.C.: USDA-ARS Conservation Research Report, 1966, No.7.
- 20 秦耀东. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2003: 1~27.
- 21 刘孝义. 土壤物理学基础及其研究法[M]. 沈阳:东北大学出版社, 1998: 11~25.
- 22 Kehl M, Everding C, Bostschek J. Erosion process and erodibility of cultivated soils in North Rhine-Westphalia under artificial rain: I. Sit characteristics and result of laboratory experiments [J]. Plant Nutr. Soil Sci., 2005, 168(1): 34~44.
- 23 Onstad C A, Wolfe M L, Larson C L, et al. Tilled soil subsidence during repeated wetting [J]. Trans. of the ASAE, 1984, 27(3):733 ~ 736.
- 24 Romkens M J M, Wang J Y. Soil translocation by rainfall [J]. Miss. Acad. Sci., 1985, 30: 9 ~ 21.
- 25 Dexter A R. Effect of rainfall on the surface microrelief of tillage soil [J]. J. Terramech., 1977, 14(1): 11 ~ 22.
- 26 Burwell R E, Larson W E. Infiltration as influenced by tillage-induced random roughness and pore space [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1969, 33(3): 449 ~ 452.
- 27 Onstad C A. Effect of rainfall on tilled soil properties, 84-2525 [C]. St. Joseph, MI.: ASAE Paper, 1984, 84: 2 525 ~ 2 531.
- 28 Johnson C B, Mannering J V, Moldenhauer W C. Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1979, 43(4): 772 ~ 777.
- 29 Potter K N. Soil properties effect on random roughness decay by rainfall[J]. Trans. of the ASAE, 1990, 33(6):1889 ~1 892.
- 30 Vidal Vazquez E, Garcia Moreno R, Miranda J G V, et al. Assessing soil surface roughness decay during simulated rainfall by multifractal analysis [J]. Nonlin. Processes Geophys., 2008, 15(3): 457 ~ 468.
- 31 Potter K N, Zobeck T M, Hagan L J. Microrelief index to estimate soil erodibility by wind[J]. Trans. of the ASAE, 1990, 33(1):151~155.
- 32 Pardini G, Vigna Guidi G, Pini R, et al. Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wettingdrying cycles and freezing-thawing cycles [J]. Catena., 1996, 27(3~4):149~165.
- 33 Schrader S, Langmaack M, Helming K. Impact of Collembola and Enchytraeidae on soil surface roughness and properties [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 25(4): 396 ~ 400.
- 34 Sun Y R, Lin J H, Schulze Lammers P, et al. Predicting surface porosity using a fine-scale index of roughness in a cultivated field [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(1): 57 ~ 64.
- 35 Kuipers H. A reliefmeter for soil cultivation studies [J]. Neth. J. Agric. Sci., 1957, 5(4): 255 ~ 262.
- 36 Burwell R E, Allmaras R R, Amemiya M. A field measurement of total porosity and surface microrelief of soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1963, 27(6):697 ~ 700.
- 37 Linden D R, Van Doren D M. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1986, 50(3): 1560 ~ 1565.
- 38 Zhixiong L, Nan C, Perdok U D, et al. Characterisation of soil profile roughness [J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(3): 369 ~ 377.
- 39 鲁植雄,吴小平, Perdok U D,等. 耕作土壤表面不平度分析[J]. 农业机械学报, 2004,35(1): 112~116. Lu Zhixiong, Wu Xiaoping, Perdok U D, et al. Analysis of tillage soil surface roughness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 112~116. (in Chinese)
- 40 Romkens M J M, Wang J Y. Effect of tillage on soil roughness [J]. Trans. of the ASAE, 1986, 29(2):429~433.
- 41 Helming K, Roth C H, Wolf R, et al. Characterization of rainfall-microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs) [J]. Soil Technol., 1993, 6(3):273 ~ 286.
- 42 Bertuzzi P, Rauws G, Courault D. Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall[J]. Soil & Tillage Research, 1990,17(1~2): 87~99.

- 43 Huang C, Bradford J M. Application of a laser scanner to quantify soil microtopography [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56(1):14~21.
- 44 Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation[J]. J. Soil Sci., 1983, 34(3):577 ~ 597.
- 45 Rajendra M P. Modeling and simulation of surface roughness [J]. Applied Surface Science, 2004, 228(1~4): 213~220.
- 46 侯占峰,鲁植雄,赵兰英. 耕作土壤地貌不平度的分形特性[J]. 农业机械学报,2007,38(4):50~53.
  Hou Zhanfeng, Lu Zhixiong, Zhao Lanying. Fractal behavior of tillage soil surface roughness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):50~53. (in Chinese)
- 47 鲁植雄,赵兰英,侯占峰.路面不平度的分形特征[J].江苏大学学报:自然科学版,2008,29(2):111~114. Lu Zhixiong, Zhao Lanying, Hou Zhanfeng. Fractal behavior of road profile roughness [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2):111~114. (in Chinese)
- 48 葛世荣. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 73~80.
  Ge Shirong. The fractal behavior and fractal characterization of rough surfaces [J]. Tribology, 1997, 17(1): 73~80.
  (in Chinese)
- 49 Andrle R, Abrahams A. Fractal techniques and the surface roughness of talus slope [J]. Earth Surf. Proc. Land, 1989, 14(3):197 ~ 209.
- 50 García Moreno R, Díaz Álvarez M C, Saa Requejo A, et al. Multifractal analysis of soil surface roughness [J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 512 ~ 520.
- 51 曹汉强,朱光喜,李旭涛,等. 多重分形及其在地形特征分析中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(12): 1182~1185.

Cao Hanqiang, Zhu Guangxi, Li Xutao, et al. Multi-fractal and its application in terrain character analysis [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(12): 1 182 ~1 185. (in Chinese)

- 52 Freebairn D M, Gupta S C, Onstad C A, et al. Antecedent rainfall and tillage effects upon infiltration [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(4):1183 ~ 1189.
- 53 Monteith N H. The role of surface roughness in runoff [J]. Soil Conserv. J., 1974, 30: 42~45.
- 54 Onstad C A. Depressional storage on tilled soil surfaces [J]. Trans. of the ASAE, 1984, 27(3): 729 ~732.
- 55 Kamphorst E C, Jetten V, Guerif J, et al. Predicting depressional storage from soil surface roughness [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64(3): 1749 ~ 1758.
- 56 Hansen B, Schjonning P, Sibbesen E. Roughness index for estimation of depression storage capacity of tilled soil surface [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 52(1~2): 103~111.

#### (上接第24页)

5 贾玉红,武晓娟. 基于磁流变缓冲器的飞机起落架模糊控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(11): 1 264~1 267.

Jia Yuhong, Wu Xiaojuan. Fuzzy control of landing gear based on MR damper [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(11): 1 264 ~ 1 267. (in Chinese)

- 6 祝世兴,李永洁,王力克. 模糊控制磁流变减振器在起落架中的应用探析[J]. 液压与气动,2008(12):68~70. Zhu Shixing, Li Yongjie, Wang Like. Analysis of application of fuzzy control MR fluid absorber in landing gear[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2008(12):68~70. (in Chinese)
- 7 Dong X M, Yu M, Li Z S, et al. Neural network compensation of semi-active control for magneto-rheological suspension with time delay uncertainty[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(1): 1 ~ 14.
- 8 余森,廖昌荣,李立新.磁流变减振器控制研究[J].化学物理学报,2001,14(5):606~612. Yu M, Liao C R, Li L X. Research on control method for MR damper[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2001, 14(5):606~612. (in Chinese)
- 9 Leitmann G. Semiactive control for vibration attenuation [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(6): 841 ~ 846.