

基于分形理论的土壤粗糙指数与孔隙率映射规律研究*

王聪颖¹ 张慧娟¹ 孙宇瑞¹ 林剑辉²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 为建立土壤表层孔隙率与表面粗糙程度之间的关系,提出了一种采用立体表面积对土壤表面粗糙性进行覆盖的分形分析方法。该方法结合地面激光扫描仪快速测得的地表原始不平度数据,可直接测定出土壤表面分维值 $D \in [2, 3)$ 。为进一步探讨地表粗糙的细节信息,将立体表面积法引入到多重分形分析中,计算了各多重分形的谱参数。分析结果表明,单一分形维数 D_l 、 D_r , 多重分形谱参数 $\alpha|_{f_{\max}}$ 、 $\Delta\alpha$ 均能够有效地反映地表粗糙程度,在忽略耕作方式影响的前提下, $\alpha|_{f_{\max}}$ 与表层土壤孔隙率的线性相关性最高 ($R^2 = 0.7014$)。因此利用土壤表层粗糙程度的分形参数进行土壤表层孔隙率的预测是可行的。

关键词: 土壤表层孔隙率 土壤表面粗糙度 分形 立体表面积

中图分类号: S152 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0032-07

Relationship between Soil Surface Porosity and Roughness Indices
Based on Fractal Theory

Wang Congying¹ Zhang Huijuan¹ Sun Yurui¹ Lin Jianhui²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract

With the aim to establish the relationship between soil surface porosity and surface roughness, a fractal analysis procedure based on 3-D surface area calculation was proposed, which applied a surface unit to cover the soil roughness characteristics. Using the soil surface unevenness data measured by a laser profiler, the method could derive the fractal dimension of soil surface directly ($D \in [2, 3)$). Furthermore, 3-D surface area method was also introduced into multi-fractal spectrum analysis for investigating fine scale information. The statistical analysis demonstrates that fractal dimension D_l , D_r , and multi-fractal parameters $\alpha|_{f_{\max}}$, $\Delta\alpha$ can reflect the change process of soil surface roughness effectively regardless the influence of different tillage types. In this case, $\alpha|_{f_{\max}}$ fitted a linear relation to porosity with the value of $R^2 = 0.7014$, which showed potential to be a meaningful indicator for surface porosity estimation.

Key words Surface porosity, Soil roughness, Fractal, 3-D surface area

引言

土壤孔隙率既是表征土壤类多孔介质基本属性的主要物理参数,又是评价耕作土壤质量、农作物生长环境与水资源利用效率的重要因子^[1~4]。传统测

定土壤孔隙率的手段是气压比重计测定法^[5~7],其扰动性取样和测量周期长的缺点极大限制了它的实际应用。文献[5]提出一种应用土壤表面粗糙度预测土壤表层孔隙率的方法。在该方法中,如何对所获取的不平度原始数据进行合理的数学处理,进而

收稿日期: 2010-12-23 修回日期: 2011-05-09

* 国家自然科学基金资助项目(30871454、30671715)、中德科学中心资助中德联合研究小组项目(GZ494)和中国农业大学基本科研业务专项资金资助项目(15059201)

作者简介: 王聪颖,博士生,主要从事先进传感技术及信息挖掘研究,E-mail: congyingly@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

实现对表层土壤粗糙度作出定量评价是关键问题^[6-7]。

研究表明,农田土壤地表属于具有趋向性的随机表面^[8],耕作后地表形态具有一定程度的自仿射和标度不变性的特征^[9],故而可以将分形方法扩展到二维粗糙表面的定量表征中。近年来部分学者研究也表明,分形方法能够反映土壤表面的本质结构特征^[10-19]。但是,在土壤表面的分形测量上由于很难直接对表面粗糙性状进行覆盖,人们一直采用小岛法、剖面形法或自仿射变量图法^[9]。这些方法均将二维分形分析简化成一维问题,测得的表面分维值均处于 1~2 之间,并非表面的真正分维值($D \in [2,3)$)。因此,直接测定土壤表面的真正分维仍然是表面分形量测中的一个难题。

基于上述问题,本文借鉴投影覆盖法^[9](projective covering method, 简称 PCM)和 GIS 中地表参数提取方法^[20-21],提出立体表面积法,应用激光扫描仪测得的地表不平度数据,直接测定耕作土壤表面分维值,并进一步将立体表面积法应用到质量概率函数中,进行多重分形谱分析。分别提取单一分形和多重分形参数作为粗糙度指数预测表层土壤孔隙率。

1 基于立体表面积法的单一分维和多重分形谱计算

1.1 立体表面积法

空间曲面表面积又称立体表面积^[22]。本文激光扫描仪获得的原始地表不平度数据按规则网格位置分布,如图 1 所示。尺度为 $\delta \times \delta$ 的网格 4 个顶点的高程值由激光扫描仪测定,取平均即可得中心点 O 的高程 z ,连接中心点 O 与 4 个角点,便可将网格位置上的土壤表面分成 4 个三角形。由每个三角形 3 个顶点的空间坐标计算出该三角形的面积,4 个三角形面积累加即得到了该网格位置上土壤表面的实际面积。需要指出的是,这种方法是一种化曲面为平面的近似投影算法,当网格边长尺度 δ 足够小时,计算结果逐渐逼近真实值。

设网格尺度为 $\delta \times \delta$ 的投影网络中第 k 个正方形网格位置上的曲面表面积为 $A_k(\delta)$,即

$$A_k(\delta) = S_{\triangle OAB} + S_{\triangle OBC} + S_{\triangle OCD} + S_{\triangle ODA} \quad (1)$$

则整个测量区域的曲面表面积可以近似表达为

$$A(\delta) = \sum_{k=1}^{N(\delta)} A_k(\delta) \quad (2)$$

式中 $N(\delta)$ 是网格尺度为 $\delta \times \delta$ 时被测粗糙表面投影网络的网格总数。当取不同的 δ 值,即测得不同的

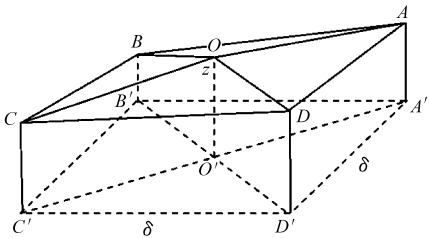


图 1 空间立体表面面积的几何表示

Fig. 1 Geometrical representation of 3-D surface area within a micro-cell

表面积 $A(\delta)$ 。显然 δ 越小,被测粗糙区域的表面积越大, $A(\delta)$ 将越接近于地表真实的表面积,该值实际上反映了整个被测区域高程模型三维表面的起伏特征,是对整个区域三维表面复杂度的总体概括,即网格尺度 $\delta \times \delta$ 一定时所对应的区域曲面表面积 $A(\delta)$ 值越大,土壤地表的起伏变化越强烈,表面粗糙变异越复杂;反之亦然。

1.2 单一分形维数计算

根据分形理论^[21-22],对于多重分形体的量测有

$$G(\delta) = G_0 \delta^{E-D} \quad (3)$$

式中, E 为欧式空间维数,当其分别取 1、2、3 时,该式分别对应于分形曲线、分形面积或分形体积测量。 G_0 为 $D = E$ 时对应的 $G(\delta)$ 值。其中当 $E = 2$ 时, $G(\delta)$ 对应于面积,结合式(2)即可得到立体表面积法所测定的分形关系为

$$A(\delta) = \sum_{k=1}^{N(\delta)} A_k(\delta) = A_0 \delta^{2-D} \quad (4)$$

式中, A_0 为 $D = 2$ 时光滑表面的面积, D 是粗糙地表的真实分维,即 $D \in [2,3)$ 。等式两边同时求对数,得到

$$\begin{cases} \ln A(\delta) = \ln A_0 + k \ln \delta \\ D = 2 - k \end{cases} \quad (5)$$

将 $\ln \delta$ 和 $\ln A(\delta)$ 分别在 x 、 y 轴上描点,进行线性拟合即可求出斜率,进而得到表面分维值 D 。

1.3 多重分形谱计算

简单分形维数对所研究的对象是一种整体性表征,若要体现更精细的信息,则可考虑使用多重分形进行分析。多重分形的计算首先要获得被考察物理量在相应分形结构上的概率分布,如果用网格尺度 $\delta \times \delta$ 的网格覆盖一个多重分形集,定义 $P_i(\delta)$ 为在第 i 个网格上的质量分布概率,引入 1.2 节所述的立体表面积法,那么第 i 个网格具有奇异性 α_i 的概率可以定义为

$$P_i(\delta) = \frac{A_i(\delta)}{\sum_{k=1}^{N(\delta)} A_k(\delta)} = \frac{A_i(\delta)}{A(\delta)} \propto \delta^{\alpha_i} \quad (6)$$

设 $N(\alpha)$ 为奇异性存在区间 α 到 $\alpha + d\alpha$ 的网格

数目, $f(\alpha)$ 定义为具有奇异性 α 的网格集合的 Hausdorff 维数, 有

$$N(\alpha) \propto \delta^{-f(\alpha)} \tag{7}$$

引入表述奇异测度性质的具有 q 阶测度矩的广义维数 $D(q)$, 则

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\delta)} P_i^q(\delta)}{\ln \delta} \tag{8}$$

α 、 $f(\alpha)$ 或 q 、 $D(q)$ 作为两套独立参数都可描述多重分形的内部结构, 其间的关系为

$$\begin{cases} \tau(q) = q\alpha(q) - f(\alpha(q)) \\ D(q) = \frac{\tau(q)}{q-1} \\ \alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} \end{cases} \tag{9}$$

从理论分析可知, $f(\alpha)$ 的图形为倒“U”形(图 2), 设 $f(\alpha)$ 与水平 α 轴交点为 $\alpha_{\min}$ 和 $\alpha_{\max}$ 两点, 而曲线的最高点坐标为 $(\alpha_{f_{\max}}, f_{\max})$, 作一条斜率为 q 的直线与 $f(\alpha)$ 曲线相切, 则切点即为对分布阶矩的贡献最大点; 此斜率为 q 的直线与纵轴交点的截距为 $-\tau(q)$; 过原点作一斜率为 1 的直线, 与斜率为 q 的直线的交点横坐标即为 $D(q)$ 。

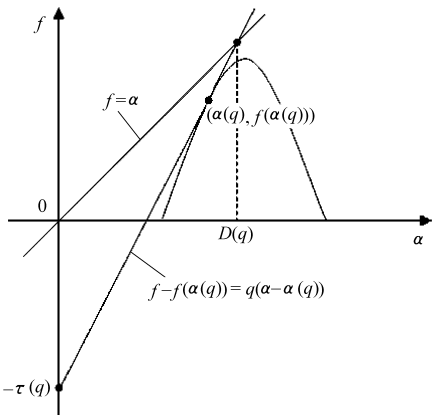


图 2 $f(\alpha)$ 、 $D(q)$ 、 $-\tau(q)$ 和 q 之间的理论关系
Fig.2 Relationship among $f(\alpha)$, $D(q)$, $-\tau(q)$ and q

结合 3 种耕作方式对土壤表面进行了多重分形分析, 首先应用立体表面积法计算出 $A_i(\delta)$ 和 $A(\delta)$, 然后得到投影覆盖概率 $P_i(\delta)$, 对于每个给定的 q 值, 都可以根据式(6)~(8)计算出相应的 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha(q))$, 从而作出相应的多重分形谱曲线 $f(\alpha)-\alpha$ 和广义分形维数随权重因子变化的曲线 $D(q)-q$ 。

2 试验方法与设备

2.1 试验方法

田间试验地点为德国波恩大学 Dikopshof 农业试验站, 土壤质地属于粉砂壤土, 颗粒组成(质量分数)是: 砂粒 17%, 粉粒 67%, 粘粒 16%; 有机质含

量为 1.89%。试验时间为 2008 年 7 月 17 日到 2008 年 8 月 13 日, 每 5 d 进行一次观测, 共进行了 7 次试验。

具体试验步骤是^[6~7]: 划分 3 个地块(每块长 30 m, 宽 3 m), 分别采取浅松铲(耕深 10 cm)、深松铲(耕深 15 cm)和铧式犁(耕深 20 cm)3 种耕作方式。对于每种耕作方式的地块, 各选择一基准区域(长 2 m, 宽 1 m), 并在所选区域 4 个顶角上以深埋木楔方式各做一固定支点, 其目的为确保重复扫描的基准区域相同。每次测量过程中对于不同耕作方式的地块, 首先用地面激光扫描仪扫描记录基准区域的不平度原始数据, 然后另选取一个取样区域并进行扫描, 再对取样区域和基准区域的不平度原始数据进行 T 统计检验, 确定没有显著性差异(置信度 95%)后, 对每个取样区域表层土壤用环刀法取 8 个土样(环刀直径 57 mm, 高 40 mm), 样品在干燥箱中 105 ℃ 下经 24 h 干燥后, 连同环刀一起放入气压比重计(精度 $\pm 1\%$)的气室内测定孔隙率。以土壤耕作当天为起始时间, 即可得到每种耕作方式地块不平度和孔隙率随时间变化的序列。详细的试验过程可参照文献[7]。

2.2 地面激光扫描仪

本试验所用的激光扫描测量系统由德国波恩大学农业工程研究所研制, 工作电压为直流 24 V, 串口方式与上位机通讯。如图 3 所示, x 轴、 y 轴方向的最大扫描范围分别是 1.5 m 和 0.5 m, 扫描精度为 1 mm。该仪器的核心部件为激光测距传感器, 其工作原理采用激光三角测距法^[23~25]。该传感器首先经由两条互相垂直的水平导轨实现二维平面上的定位, 记为 (i, j) , 然后测量出该点地表到导轨基准水平面的垂直距离, 记为 $z_{i,j}$, 在设定的扫描平面上周而复始, 便可获得扫描范围内地表各点到导轨基准面的垂直距离, 这些距离数据的全集合, 即为不平度原始数据。试验中选取 y 轴与耕作方向平行, 扫描区域大小为 0.96 m $\times$ 0.48 m, x 轴、 y 轴方向上的步距均为 10 mm, 每次扫描可获得 4 753 个原始数据。

3 结果与分析

3.1 土壤表面的分形分析

3.1.1 基于单一分形的时序分析

以耕作方式 1(浅松铲)为例对地表分形特征进行分析。图 4 给出了浅松铲耕作方式下, 应用立体表面积法直接计算的耕作后第 0 天、13 天、27 天的土壤表面分维结果。从图 4 可以看出: 使用立体表面积法测定的地表分维值处于 2~3 之间, 直接测定

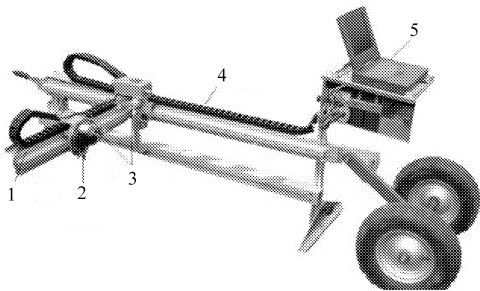


图 3 地面激光扫描仪

Fig. 3 Laser profiler used in the test

1. y 轴导轨 2. 激光测距传感器 3. 步进电动机 4. x 轴导轨
5. 上位机

了表面的真实分维值,这为地表粗糙的分形分析提供了一个新的途径。同时也应看到,地表粗糙分维在不同的度量区间内具有不同的分维值(D_l 和 D_r),体现了表面自相似性的局域特征,即多重分形特征。两个尺度范围内的不同分形维数表明由这两个尺度范围所能获得的结构特征及地面复杂程度是不同的。 D_l 表征的是较小尺度范围内所能获得的相对细节的结构信息, D_r 则表征了较大尺度范围内能够获得的相对宏观的结构信息。图 4 中可以看出,两段线性模型转折点位于 $\delta = 1/8$ 处,对应的计算网格尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 。

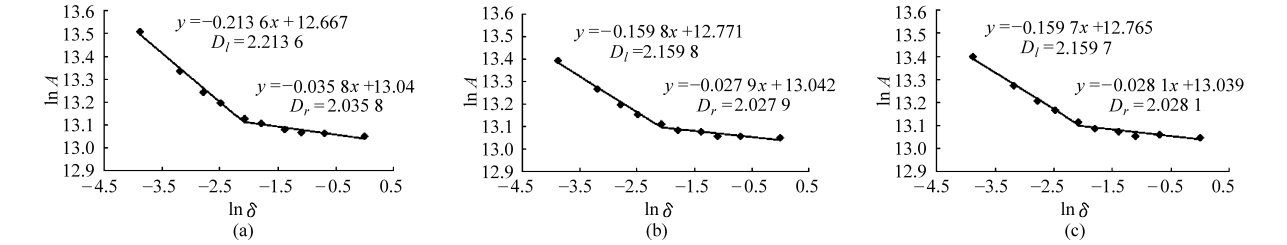


图 4 浅松铲耕作下立体表面积法直接测定的土壤表面分维

Fig. 4 Estimation of fractal dimension of soil surface using 3-D surface area method (tillage type: ripped)

(a) 第 0 天 (b) 第 13 天 (c) 第 27 天

从图 4 也可看到,尽管 D_l 和 D_r 刻画地表粗糙程度的尺度范围不同,但是随着时间的推移,二者各自均呈递减趋势,这与土壤表面逐渐平滑的变化过程一致,由此表明它们具备刻画土壤表面粗糙程度的能力。

3.1.2 基于多重分形的时序分析

图 5 显示了浅松铲耕作后地表粗糙多重分形

谱 $f(\alpha) - \alpha$ 和 $D(q) - q$ 曲线的时序变化过程,表 1 列出了这些多重分形谱的参数,包括 α 最小、最大点的坐标值($(\alpha_{\min}, f(\alpha_{\min}))$ 、 $(\alpha_{\max}, f(\alpha_{\max}))$), f 最高点的坐标值($(\alpha_{f_{\max}}, f_{\max})$),多重分形谱宽度 $\Delta\alpha$ 、 f 的值域 Δf 和 $D(q) - q$ 曲线的值域 ΔD 。表 1 中 S_{1-n} 表示浅松铲耕作后第 n 天的测量结果。

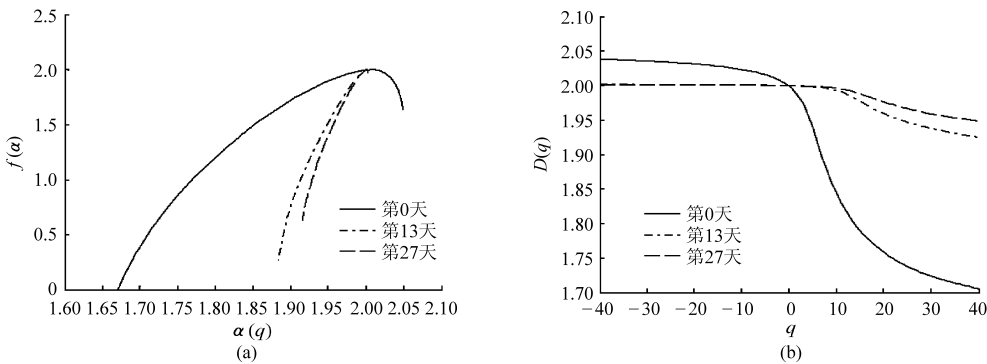


图 5 浅松铲耕作方式下土壤表面多重分形性质时间序列分析

Fig. 5 Multi-fractal characteristics of soil surface changed over time

(a) 多重分形谱 $f - \alpha$ (b) 广义分形维数 $D - q$

表 1 浅松铲耕作后地表多重分形谱参数

Tab. 1 Multi-fractal spectrum parameters of soil surface elevation

试验序号	$\alpha_{\min}$	$f(\alpha_{\min})$	$\alpha_{\max}$	$f(\alpha_{\max})$	$\alpha_{f_{\max}}$	$f_{\max}$	$\Delta\alpha$	Δf	ΔD
S_{1-0}	1.669	0	2.049	1.642	2.005	2	0.380	-1.642	0.333
S_{1-13}	1.910	0.667	2.003	1.972	2.000	2	0.093	-1.305	0.060
S_{1-27}	1.916	0.623	2.003	1.968	2.000	2	0.087	-1.344	0.053

$f(\alpha)$ 反映了具有相同奇异指数 α 的子区域所构成子集的不规则、不均匀和复杂程度,其值取决于构成该子集的子区域数目,揭示了高程模型中具有相同奇异指数 α 的微地貌类型的地位和变化趋势。图5中,对于3个时间状态, $f(\alpha)-\alpha$ 均呈向右的钩状,表明土壤表面形成过程中经历了不同程度的局部叠加,导致了土壤表面粗糙分布非均匀性。随着时间的推移, $\Delta\alpha$ 依次递减,表征了最大、最小概率的差别逐渐减小,即地表各微元立体表面积的奇异性减少。亦即说明 S_{1-0} 较为粗糙不规则,其包含的细节信息比 S_{1-13} 和 S_{1-27} 更多。

$D(q)-q$ 曲线反映了地表起伏变化的不均匀程度,当 $q\gg 1$ 时, $D(q)$ 代表地表起伏变化剧烈区域子集的维数,当 $q\ll 1$ 时, $D(q)$ 代表地表起伏较为平坦区域子集的维数,这样就可以将区域内地形起伏按变化的剧烈程度进行分解,从而更准确地把握区域范围内地形起伏特征。由图5可以看出, $D(q)$ 的值域范围 ΔD 也呈逐一递减趋势,表明三者表面差异性逐渐减小,起伏程度逐渐降低。

综上所述可以看出,某些多重分形谱参数与地

表粗糙程度随时间的变化趋势是同相的,利用这些多重分形谱参数的计算可以定量描述土壤表面形貌特征。

3.2 各分形参数与土壤表层孔隙率的统计关系

3.2.1 不同耕作方式下

通过获得的原始数据考察各分形参数与土壤表层孔隙率的关系,以确定何种单一分形或多重分形参数可以作为地表粗糙度指标预测土壤表层孔隙率。3种耕作方式下各分形参数与土壤表层孔隙率拟合的线性模型参数及相关系数见表2~3,由此可以得出:①在统计精度上, D_l 和 D_r 与孔隙率的一元线性回归模型的相关系数 R^2 和均方根误差(RMSE)的数值均相当,且2个模型的 R^2 均在0.509~0.796之间,拟合程度均较好; D_r 拟合模型的斜率相对较大,该模型对自变量的变化更敏感。②参数 $\Delta\alpha$ 与孔隙率回归模型斜率均为正,决定系数 R^2 在0.488~0.822之间变化。③ $\alpha|_{fmax}$ 是对应于最大 $f(\alpha)$ 的 α 值,即多重分形最或然子集的奇异指数;该参数回归模型斜率均大于零,相关系数在0.582~0.802之间,变化范围相对较小,模型精度比较理想。

表 2 孔隙率与 D_l 、 D_r 线性拟合公式参数

Tab.2 Parameters for fitting a linear relationship between porosity and roughness referring to the roughness indices of D_l , D_r

耕作方式	线性模型 $y = ax + b$							
	D_l				D_r			
	a	b	R^2	RMSE	a	b	R^2	RMSE
浅松铲	70.220	-82.787	0.526	3.398	277.890	-497.560	0.509	3.457
深松铲	110.600	-166.360	0.690	3.191	363.830	-673.060	0.725	3.008
铧式犁	64.469	-72.604	0.765	2.191	232.670	-408.500	0.796	2.042

表 3 孔隙率与 $\alpha|_{fmax}$ 、 $\Delta\alpha$ 线性拟合公式参数

Tab.3 Parameters for fitting a linear relationship between porosity and roughness referring to the roughness indices of $\alpha|_{fmax}$, $\Delta\alpha$

耕作方式	线性模型 $y = ax + b$							
	$\alpha _{fmax}$				$\Delta\alpha$			
	a	b	R^2	RMSE	a	b	R^2	RMSE
浅松铲	1 541.500	-3 024.600	0.582	3.188	25.901	55.683	0.697	2.714
深松铲	2 399.200	-4 742.400	0.791	2.623	43.387	50.856	0.488	4.104
铧式犁	1 893.900	-3 731.000	0.802	2.008	40.082	53.344	0.822	1.907

不难看出,在3种耕作方式下, $\alpha|_{fmax}$ 与孔隙率的线性相关程度最高, D_l 、 D_r 与 $\Delta\alpha$ 也取得了较好的回归结果,这几个参数效果相当,这里称之为有效分形参数。

3.2.2 有效分形参数与孔隙率关系综合分析

为了进一步观察各分形参数的适应性,忽略耕于立体表面积的参数预测孔隙率的影响却并不明显,即表明这些参数对不同耕作方式具有一定的

作方式影响,综合全部测量数据后,各参数与孔隙率的统计关系线性回归结果如图6所示。

可以看出,在忽略耕作方式影响的条件下,这些参数与孔隙率回归结果的相关系数仍然较高($0.6022\leq R^2\leq 0.7014$),说明耕作方式虽然会对地表的起伏状态造成不同程度的影响,但是对这些基鲁棒性。在这些参数中, $\alpha|_{fmax}$ 与土壤表层孔隙率的相关性最好($R^2=0.7014$),且RMSE亦最小。

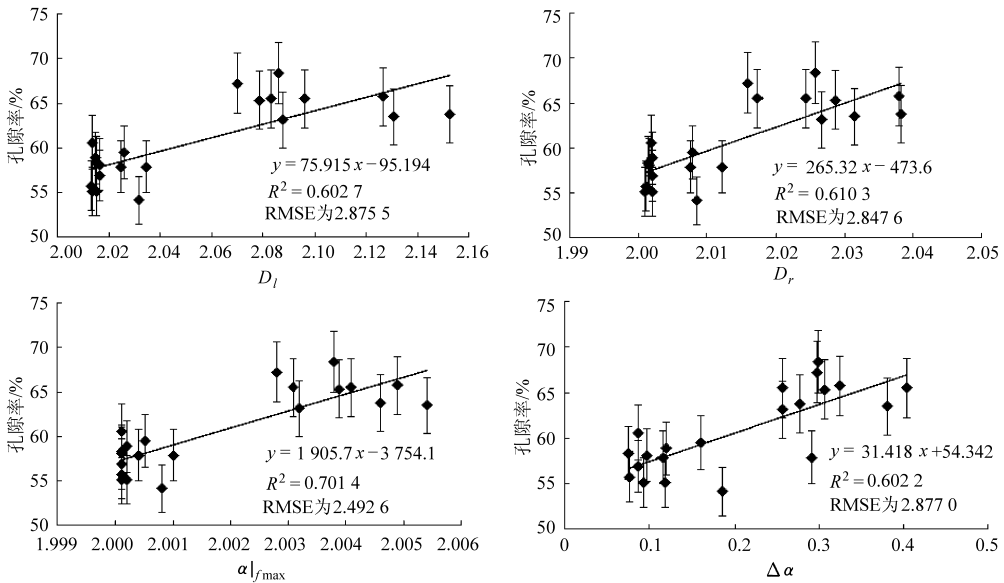


图 6 忽略耕作方式后 D_l 、 D_r 、 $\alpha|_{fmax}$ 、 $\Delta\alpha$ 与孔隙率的回归关系

Fig. 6 General regression analysis between porosity and D_l , D_r , $\alpha|_{fmax}$, $\Delta\alpha$ regardless of tillage type

为了进一步评价各个分形参数的统计效果，表 4 列出了不同分形指数与孔隙率回归方程的显著性检验结果。其中 F 统计值的置信水平为 95%， p 值为对应 F 值小于临界值的概率。显然， $\alpha|_{fmax}$ 的 F 值最大，相应的小概率事件的发生概率最小，因而这一参数的回归模型最为显著。

表 4 各分形指数与孔隙率回归方程的显著性检验

Tab. 4 Significant test of regression equation between different fractal indices and porosity

参数	D_l	D_r	$\alpha _{fmax}$	$\Delta\alpha$
F	28.808	29.749	44.624	28.76
p	3.52×10^{-5}	2.91×10^{-5}	2.18×10^{-6}	3.56×10^{-5}

4 结论

(1) 提出了采用立体表面积覆盖多重分形体的

方法,借助地面激光扫描仪获得的土壤表面不平整原始信息,直接测定出土壤表面分维值 $D \in [2,3)$, 并进一步应用立体表面积法建立质量概率函数,对农田地表进行了多重分形谱分析。结果表明,部分分形参数与地表随时间变化趋于平滑的趋势一致,可以用来表征地表粗糙程度。

(2) 统计结果表明,在 3 种不同耕作方式下,单一分形指标 D_l 、 D_r , 多重分形参数 $\alpha|_{fmax}$ 、 $\Delta\alpha$ 与孔隙率的线性相关系数范围在 0.488 ~ 0.822 之间。进一步分析表明,在忽略耕作方式影响的前提下,这些参数与孔隙率的相关性仍然维持在较高水平 ($0.6022 \leq R^2 \leq 0.7014$),表明基于立体表面积法的单一分形维数和多重分形谱部分参数能够作为地表粗糙度指数有效地反映表层土壤孔隙率。其中 $\alpha|_{fmax}$ 与孔隙率的决定系数 R^2 最高 (0.7014), RMSE 最小 (2.4926), 其回归模型最为显著。

参 考 文 献

1 Kehl M, Everding C, Bostschek J, et al. Erosion process and erodibility of cultivated soils in North Rhine-Westphalia under artificial rain: I. sit characteristics and result of laboratory experiments [J]. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2005, 168(1): 34~44.

2 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.

3 Bjarne H, Schjonning P, Sibbesen E. Roughness indices for estimation of depression storage capacity of tilled soil surfaces [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 52(1~2): 103~111.

4 Stephens P R, Hewitt A E, Sparling G P, et al. Assessing sustainability of land management using a risk identification model [J]. Pedosphere, 2003, 13(1): 41~48.

5 Sun Y, Lin J, 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.

6 Sun Y, Lin J, Schulze Lammers P, et al. Predicting surface porosity using a fine-scale index of roughness in a cultivated field [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(1): 57~64.

- 7 张慧娟, 孙宇瑞, 林剑辉, 等. 不同粗糙度尺度下预测表层土壤孔隙率量化指数比较研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 69 ~ 76.
Zhang Huijuan, Sun Yurui, Lin Jianhui, et al. Comparative study on predicting porosity by different roughness indices [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 69 ~ 76. (in Chinese)
- 8 Taconet O, Ciarletti V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(1): 64 ~ 76.
- 9 谢和平, 王金安. 岩石节理(断裂)表面的多重分形性质[J]. 力学学报, 1998, 30(3): 314 ~ 320.
Xie Heping, Wang Jin'an. Multi-fractal behaviors of fracture surfaces in rocks[J]. Acta Mechanica Sinica, 1998, 30(3): 314 ~ 320. (in Chinese)
- 10 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): 1 147 ~ 1 149.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Zhixiong L, Nan C, Perdok U D, et al. Characterisation of soil profile roughness [J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(3): 369 ~ 377.
- 14 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)
- 15 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 Z X, Zhao L Y, Hou Z F. Fractal behavior of road profile roughness [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(2): 111 ~ 114. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 Andrieu R, Abrahams A. Fractal techniques and the surface roughness of talus slope [J]. Earth Surf. Proc. Land, 1989, 14(3): 197 ~ 209.
- 18 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.
- 19 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): 1 182 ~ 1 185.
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)
- 20 刘光. 地理信息系统-基础篇[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 243 ~ 245.
- 21 李爽, 姚静. 基于分形的 DEM 数据不确定性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 59.
- 22 孙霞, 吴自勤, 黄韵. 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006: 53 ~ 88.
- 23 Huang C, Bradford J M. Portable laser scanner for measuring soil surface roughness [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54(5): 1 402 ~ 1 406.
- 24 Raper R L, Grift T E, Tekeste M Z. A portable tillage profiler for measurement subsoiling disruption [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(1): 23 ~ 27.
- 25 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)