

滨海地区不同土地利用方式土壤颗粒组成及分形维数特征

朱芸^{1,2}, 傅庆林^{2*}, 郭彬², 林义成², 刘琛²

(1.南京林业大学 林学院, 南京 210037;

2.浙江省农业科学院 环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘要:【目的】研究土壤颗粒分形维数与土壤肥力之间的关系, 为土壤颗粒分形维数作为评价滨海地区土壤肥力的综合指标提供理论依据。【方法】选取浙江省绍兴市上虞区滨海地区4种土地利用方式(新垦海涂、水稻田、果园地和菜园地)的0~100 cm土壤剖面为研究对象。应用分形理论对滨海地区不同土地利用方式土壤颗粒分形维数、pH、EC、土壤养分和酶活性进行研究, 探讨了土壤颗粒分形维数与土壤颗粒组成及土壤肥力之间的关系。同时利用因子分析法研究了各理化因子对滨海地区土壤颗粒分形维数的影响。【结果】研究区土壤颗粒分形维数主要在2~3之间; 水稻土、果园土和菜园土的土壤颗粒分形维数显著高于新垦海涂; 土地利用方式对土壤剖面中颗粒组成分布产生显著影响($P<0.05$), 进而影响到土壤剖面的颗粒分形维数; 新垦海涂和水稻土土壤颗粒分形维数在0~20 cm土层中最高, 而果园土和菜园土土壤颗粒分形维数在80~100 cm土层中最高。【结论】土壤颗粒分形维数与土壤肥力相关性显著($P<0.01$), 较好地反映土壤肥力, 可作为评价滨海地区土壤肥力的定量指标之一。

关键词: 滨海地区; 土地利用方式; 土壤颗粒分形维数; 土壤肥力

中图分类号: S152

文献标识码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022108

OSID:



朱芸, 傅庆林, 郭彬, 等. 滨海地区不同土地利用方式土壤颗粒组成及分形维数特征[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 130-137.

ZHU Yun, FU Qinglin, GUO Bin, et al. Particle Composition and Fractal Dimension Vary with Land Management for Soils in Coastal Regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 130-137.

0 引言

【研究意义】滨海盐土作为我国生态脆弱系统土壤类型之一, 同时也是重要的耕地后备资源^[1]。滨海盐土在成陆过程中受到海水浸灌的影响, 形成了含盐量高、土壤物理结构差和肥力低等特点, 严重制约了滨海地区的农业可持续发展^[2]。【研究进展】土壤颗粒组成是土壤重要的物理性质, 其在成土过程中受到生物、化学等各种因素综合影响, 使其大小和形态各异, 且影响着土壤水、肥、气、热的传输与分配^[3-4]。由于其自身特性及构成, 通常用土壤粒径分形维数来描述其分形特征^[5-9]。贾晓红等^[10]研究发现在干旱沙漠地区中土壤颗粒分形维数可作为评价土壤演变程度的定量指标; 王景燕等^[11]发现土壤颗粒分形维数可以评价坡地退耕后土壤肥力的变化; 姚姣转等^[12]研究

表明土壤颗粒分形维数可用于反映土壤沙漠化过程。熊波等^[13]发现土壤颗粒分形维数可作为区域耕地土壤质量评价指标之一。

【切入点】土地利用是人类干预土壤结构和肥力最直接的活动, 土地利用变化可引起自然现象和生态过程的变化, 合理的土地利用可以有效改善土壤结构, 增强土壤对外界环境变化的抵抗力; 不合理的土地利用会导致土壤结构破坏, 质量下降^[14]。揭示土壤颗粒组成变化是土地利用和管理中的重要部分, 通过不同土地利用方式下土壤颗粒的变化特征, 分析土壤生态环境及土壤肥力的变化情况^[15]。近年来, 关于土壤颗粒分形维数的研究都集中在干旱区沙地或坡耕地, 但是, 目前针对滨海盐土的土壤颗粒组成及分形维数研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】因此, 本文以上虞区杭州湾滩涂围垦区为研究区, 选取新垦海涂、水稻田、果园地和菜园地4种土地利用类型为研究对象, 分析其理化性质和酶活性, 计算土壤颗粒分形维数, 并探讨土壤肥力与土壤颗粒分形维数的关系, 以期以土壤颗粒分形维数作为评价滨海地区土壤肥力的指

收稿时间: 2022-03-04

基金项目: 浙江省粮食主产区农田地力快速培育与修复技术研究与示范项目(2019C02008)

作者简介: 朱芸(1995-), 女, 博士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治。E-mail: zhu052419952020@outlook.com

通信作者: 傅庆林, 男, 研究员, 主要从事盐碱土改良。

E-mail: Fuql161@aliyun.com

标提供理论依据。

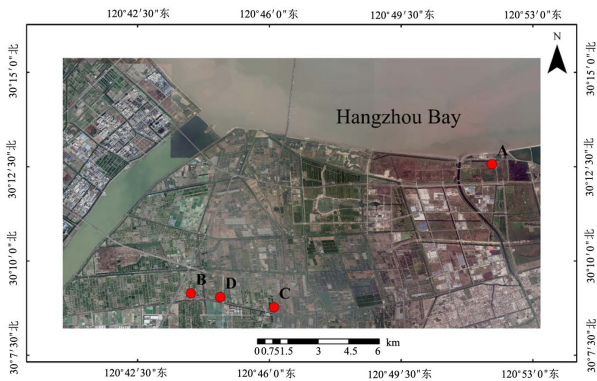
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省绍兴市上虞区杭州湾滨海盐土围垦区（经度 30°07'07"—30°12'36"，纬度 120°44'11"—120°52'05"），地处亚热带季风气候区，无霜期 251 d 左右，年降水量 1 400 mm。

1.2 样品采集

样品采集于 2019 年 12 月，选取新垦海涂、水稻田（1976 年海涂围垦）、果园地（1974 年海涂围垦）和菜园地（1977 年海涂围垦）等 4 种土地利用方式（图 1），每种土地利用方式分别选取 3 个平行地块，各地块之间相隔至少 50 m。每个地块采用“S”形混合取样，采样剖面深度为 100 cm，按 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm 采集各土层土壤样品。样品去除杂质后装入自封袋带回实验室，待样品自然风干后磨碎过 2 mm 筛用于土壤理化性质和酶活性的测定。



注 A（新垦海涂）、B（水稻地）、C（果园地）和 D（菜园地）

图 1 研究区域及采样点分布示意图

Fig.1 Study area and sampling point map

1.3 测定方法

土壤颗粒组成测定采用比重计法^[16]测定：①称取过 2 mm 筛的风干土样 50 g 于 500 mL 三角瓶中，加水湿润。根据不同的土壤 pH 值加入不同的分散剂（碱性土壤加六偏磷酸钠溶液；中性土壤加草酸钠溶液；酸性土壤加氢氧化钠溶液），再加水于三角瓶中使土壤容积约为 250 mL。瓶口放一个小漏斗放于电板上加热煮沸 1 h，边加热边摇匀。②待混悬液冷却后将其移到 1 000 mL 量筒中，测量悬液温度并结合时间沉降表，查出对应的比重计读数时间。用搅拌棒搅拌悬液上下约 30 次，测定时将比重计插入悬液中，到了选定时间记录比重计读数。以卡钦斯基制土壤粒径分级标准分 5 级测定：<0.001 mm、0.001~0.005、0.005~0.01、0.01~0.05、0.05~0.25 mm。

土壤 pH 值按 1：2.5 土水比用电极法-酸度计测定；EC 值按照 1：5 土水比用电导率仪 DDS-307A 测定；土壤有机碳量和全氮量采用元素分析仪检测（Elementar Vario MACRO, Germany）；碱解氮、有效磷和速效钾分别采用碱解扩散法、钼锑抗比色法和火焰光度计法^[17]。土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[18]，脲酶活性使用苏州科铭生物技术有限公司提供的试剂盒测定（comin biotechnology Co, Ltd, Suzhou, China）。

1.4 土壤颗粒分形维数（D）计算方法

本文采用杨培岭等^[19]提出的土壤分形模型计算，计算公式为：

$$\frac{W(\gamma < R_i)}{W_0} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (1)$$

R_i 为粒径分级中第 i 级， $W(\gamma < R_i)$ 为粒径小于 R_i 的土壤颗粒分布质量总和， W_0 为土壤各粒级质量的总和， R_{\max} 为最大粒径的平均粒径。对式（1）中的两边同时取对数，以 $\lg(V_i/V_0)$ 为纵坐标， $\lg(R_i/R_{\max})$ 为横坐标作图，得到的直线斜率为 $3-D$ ，因此，可用回归分析法得到土壤分形维数 D 。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2016 进行数据整理和土壤颗粒分形维数计算拟合；利用 SPSS20.0 软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA）、偏相关性分析（Partial correlation）和因子分析，在因子分析法中对数据进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy) 和 Bartlett 球形 (Bartlett's test of sphericity) 统计学检验，KMO 越接近于 1，Bartlett 球形值越小，研究数据越适用于因子分析^[20]。采用 Excel 2020 作图。

2. 结果与分析

2.1 土壤颗粒组成与分形维数

由表 1 可知，研究区内土壤颗粒组成主要以粗粉砂粒（0.01~0.05 mm）为主，质量百分数在 54.53%~84.01% 之间；土壤颗粒分形维数（ D ）主要在 2~3 之间，且分形维数线性方程拟合度较高， R^2 均在 0.80 以上。不同土地利用方式下土壤颗粒组成和分形维数差异性显著（ $P < 0.05$ ）。其中，在 0~20 cm 土层中，果园土、菜园土和水稻土中的黏粒（<0.001 mm）、粉粒（0.001~0.005 mm）和细粉粒量（0.005~0.01 mm）显著高于新垦海涂，其他土层中则无规律性变化；在不同土层中，果园土、菜园土和水稻土中的砂粒量（0.05~0.25 mm）相比于新垦海涂，均显著降低（ $P < 0.05$ ），而粗粉砂粒量（0.01~0.05 mm）在不同土层中变化规律则不明显。相比于新垦海涂，果园土、菜园土和水稻土土壤颗粒分形维数显著增加

($P<0.05$)，说明滨海盐土开垦后土壤颗粒组成得到有效改善。

不同土层中土壤颗粒组成和分形维数差异显著 ($P<0.05$)。随着土层深度加深，果园土和菜园土中的黏粒 (<0.001 mm) 和粉粒 (0.001~0.005 mm) 量逐渐增加，而在新垦海涂和水稻土中逐渐降低；砂粒

(0.05~0.25 mm) 量在新垦海涂中逐渐增加，而在果园土、菜园土和水稻土中呈逐渐降低趋势；细粉粒 (0.005~0.01 mm) 和粗粉砂粒 (0.01~0.05 mm) 量在不同土层中变化规律不明显。新垦海涂和菜园土土壤颗粒分形维数在 0~20 cm 土层中最高，而果园土和菜园土土壤颗粒分形维数在 80~100 cm 土层中最高。

表 1 不同土地利用方式下土壤颗粒组成及分形维数

Table 1 Soil particle composition and fractal dimensions under different land use types

土层深度/cm	土地利用类型	土壤颗粒组成/%					D	R^2
		<0.001 mm	0.001~0.005 mm	0.005~0.01 mm	0.01~0.05 mm	0.05~0.25 mm		
0~20	新垦海涂	8.69±0.28cA	2.49±0.23cB	3.12±0.37cB	64.01±0.99cA	23.26±0.72aB	2.50±0.01bA	0.86±0.04
	果园土	13.50±0.42aB	3.59±0.35bC	10.22±0.50aC	63.21±0.52cA	7.47±0.56dA	2.59±0.01aC	0.90±0.04
	菜园土	11.02±0.21bB	5.88±0.56aC	5.83±0.73bA	71.39±0.72bB	9.41±0.49cA	2.57±0.02aC	0.92±0.03
	水稻土	10.08±0.75bA	3.76±0.89bA	4.06±0.39cA	74.04±0.93aD	15.32±0.79bA	2.59±0.02aA	0.88±0.03
20~40	新垦海涂	2.80±1.08dD	2.56±0.45cB	12.90±0.57aA	54.53±0.88cB	25.92±0.87aB	2.26±0.02dC	0.93±0.01
	果园土	16.55±0.58aA	7.38±0.35aB	9.51±0.79bC	60.45±1.20bB	6.51±0.32bB	2.63±0.01aB	0.92±0.01
	菜园土	10.12±0.71bB	6.31±0.45aC	5.31±0.76cA	75.49±1.05aA	4.40±0.61cC	2.52±0.01bD	0.87±0.03
	水稻土	6.36±0.46cB	4.41±1.03bA	4.49±1.10cA	76.15±0.84cC	6.99±0.69bB	2.41±0.01cC	0.86±0.05
40~60	新垦海涂	4.59±1.61bC	2.49±0.56bB	2.85±0.51cB	63.92±1.01cA	24.55±1.07aB	2.31±0.02cB	0.90±0.03
	果园土	14.67±1.75aB	8.72±0.15aB	11.87±1.20aB	60.38±0.74cB	5.44±0.58bC	2.59±0.02aC	0.93±0.01
	菜园土	14.77±1.67aA	8.95±0.64aB	5.63±1.04bA	72.09±0.56bB	1.85±0.21cD	2.60±0.01aC	0.87±0.03
	水稻土	6.51±1.26bB	2.89±0.67bA	4.08±0.65bA	80.11±0.63aB	6.70±0.52bB	2.39±0.02bC	0.87±0.04
60~80	新垦海涂	2.65±1.02dD	3.25±0.76cB	2.97±0.52cB	64.95±0.31cA	26.25±0.68aB	2.22±0.01dC	0.91±0.05
	果园土	16.40±1.32aC	12.51±0.42aA	14.92±0.31aA	58.95±0.45dB	4.36±0.81bD	2.64±0.01aB	0.94±0.01
	菜园土	12.03±0.59bB	8.27±0.26bB	4.25±0.57bA	71.57±0.67bB	3.28±0.21cC	2.58±0.01bC	0.89±0.02
	水稻土	9.65±1.05cA	1.54±0.56dB	2.07±0.54cB	83.66±0.73aA	4.15±0.23bC	2.49±0.02cB	0.84±0.02
80~100	新垦海涂	6.57±0.70bB	5.74±0.38cA	2.54±0.60bB	56.15±0.35cB	31.83±0.87aA	2.37±0.02cB	0.93±0.01
	果园土	17.76±1.01aA	13.13±0.35aA	12.66±0.58aB	55.83±0.90cC	4.08±0.77cD	2.68±0.02aA	0.93±0.01
	菜园土	17.33±0.66aC	10.69±0.51bA	1.90±0.53bB	60.39±0.58bB	7.74±1.08bB	2.69±0.01aA	0.88±0.01
	水稻土	5.86±0.51bB	4.15±0.47cA	2.79±0.67bB	84.01±0.87aA	3.33±0.56cC	2.42±0.01bC	0.87±0.05

注 同列不同小写字母表示同一土层中不同土地利用方式差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示同一土地利用方式下不同土层间差异显著 ($P<0.05$)，下同。

2.2 土壤 pH、EC 和养分

不同土地利用方式下土壤 pH、EC 和养分量差异显著 ($P<0.05$) (表 2)，相比于新垦海涂，菜园土、果园土和水稻土 pH、EC 和速效钾量显著降低 ($P<0.05$)，有机质量、全氮量、碱解氮量和有效磷量显著增加 ($P<0.05$)。果园土中的 pH 和 EC 值最低，与新垦海涂相比，分别降低了 45.4% 和 86.2%，有效磷量最高，增加了 592.6%；有机质量、全氮量和碱解氮量在水稻土中最高，相较于新垦海涂，分别增加了 335.1%、161.1% 和 127.5%，且水稻土中的速效钾量最低，降低了 46.2%。

土壤 pH、EC 和养分量在不同土层中差异性显著 ($P<0.05$)。4 种土地利用方式下土壤 pH 和速效钾量随着土层加深逐渐升高，土壤 EC 在新垦海涂和水

稻土中也随着土层加深逐渐升高，但在果园土和菜园土中随着土层加深而降低。水稻土、果园土和菜园土有机质量、全氮量、碱解氮量和有效磷量均随着土层加深而逐渐降低。

2.3 土壤酶活性

图 2 为不同土地利用方式对土壤酶活性的影响。由图 2 可知，不同土地利用方式下土壤酶活性差异显著 ($P<0.05$)，滨海盐土围垦利用后土壤酶活性显著增加，过氧化氢酶活性大小具体表现为菜园土>水稻土>果园土>新垦海涂；脲酶活性在果园土中最高，大小排序为果园土>菜园土>水稻土>新垦海涂。在不同土层中土壤酶活性差有显著性差异 ($P<0.05$)，随着土层加深，土壤脲酶和过氧化氢酶活性显著降低 ($P<0.05$)。

表 2 不同土地利用方式对 pH、EC 和土壤养分的影响

Table 2 Effects on pH, EC and soil nutrients under different land use types

土层深度/cm	土地利用方式	pH	EC/ (dS m ⁻¹)	有机质量/ (g kg ⁻¹)	全氮量/ (g kg ⁻¹)	碱解氮量/ (mg kg ⁻¹)	速效钾量/ (mg kg ⁻¹)	有效磷量/ (mg kg ⁻¹)
0~20	新海涂	8.64±0.12aC	1.116±0.05aE	5.17±0.05dA	0.36±0.02cA	54.57±3.4dA	219.8±2.5aD	18.25±0.6dA
	果园土	4.72±0.21dE	0.156±0.01dA	22.42±0.12aA	0.69±0.03bA	107.6±4.1bA	139.3±3.1cD	126.4±2.5aA
	菜园土	7.62±0.14cC	0.450±0.02bA	13.09±0.09cA	0.72±0.05bA	90.19±2.6cA	161.4±1.5bC	65.67±3.8bA
	水稻土	7.97±0.15bD	0.269±0.02cE	21.56±0.07bA	0.94±0.03aA	124.2±3.5aA	118.2±2.7dE	47.48±4.1cA
20~40	新海涂	8.96±0.09aB	1.340±0.02aD	4.68±0.10dB	0.33±0.03cA	50.78±4.2dA	237.2±1.8aC	4.51±1.1dC
	果园土	5.13±0.05cD	0.145±0.02dB	20.13±0.15aB	0.61±0.02bB	89.12±1.5aB	155.6±2.5cC	103.2±3.2aB
	菜园土	8.83±0.12aB	0.365±0.01bB	10.60±0.08cB	0.59±0.04bB	73.52±2.1cB	186.4±4.2bB	31.82±2.1bB
	水稻土	8.12±0.15bD	0.294±0.02cD	19.12±0.09bB	0.81±0.04aB	82.45±3.1bB	135.3±1.7dD	25.68±1.5cB
40~60	新海涂	9.01±0.09aB	1.443±0.03aC	4.11±0.12dC	0.25±0.02cB	36.68±2.5cB	269.2±2.5aB	11.05±0.2dB
	果园土	5.89±0.05cC	0.136±0.01dC	18.32±0.08aC	0.42±0.02bC	72.23±1.9aC	181.3±3.1bB	74.23±2.4aC
	菜园土	9.10±0.08aA	0.313±0.02cC	8.75±0.06cC	0.50±0.03aC	47.43±2.1bC	184.2±1.7bB	24.03±1.8bC
	水稻土	8.45±0.12bC	0.353±0.02bC	17.32±0.10bC	0.49±0.03aC	73.56±1.7aC	165.1±2.5cC	14.34±3.1cC
60~80	新海涂	9.12±0.13aB	1.649±0.03aB	3.41±0.07dD	0.18±0.02bC	30.38±3.2cB	277.2±2.9aB	1.32±0.5dD
	果园土	6.38±0.08cB	0.118±0.02dE	18.73±0.05aC	0.40±0.05aC	57.75±2.8aD	188.9±1.8cB	38.24±1.4aD
	菜园土	9.05±0.05aA	0.330±0.02cC	6.38±0.12cD	0.39±0.03aD	40.17±1.8bD	194.6±1.7bA	22.01±2.1bC
	水稻土	8.73±0.07bB	0.404±0.02bB	16.84±0.06bD	0.43±0.03aC	53.81±3.5aD	188.6±5.1cB	12.78±2.8cC
80~100	新海涂	9.84±0.06aA	1.871±0.01aA	2.85±0.11cE	0.14±0.05cC	19.71±2.8bC	305.8±2.7aA	2.71±1.2bC
	果园土	7.13±0.12dA	0.125±0.01dD	16.47±0.05aD	0.29±0.06bD	45.47±2.4aE	213.3±3.5bA	13.64±1.7aE
	菜园土	8.86±0.03cB	0.320±0.01cC	2.78±0.08cE	0.37±0.02aD	22.74±4.1bE	196.0±3.9cA	15.46±2.1aD
	水稻土	9.10±0.17bA	0.449±0.02bA	15.87±0.13bE	0.41±0.03aC	42.44±2.5aE	219.4±2.4bA	5.96±1.5bD

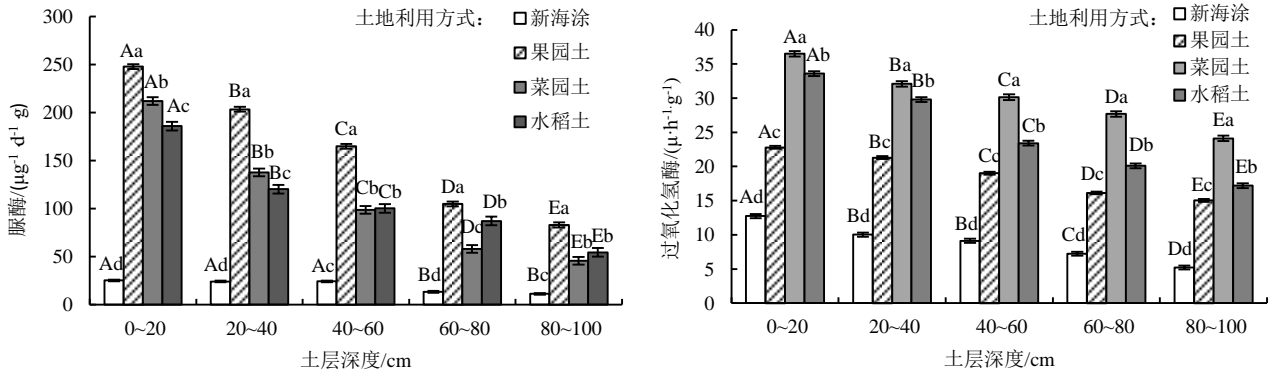


图 2 不同土地利用方式对土壤酶活性的影响

Fig.2 Effects on soil enzyme activities under different land use types

2.4 土壤颗粒分形维数与理化性质和酶活性的关系

表 3 为土壤颗粒分形维数 D 与土壤理化性质和酶活性偏相关性分析。由表 3 可知，在滨海盐土中，土壤颗粒分形维数 (D) 与黏粒 (<0.001 mm)、粉粒 ($0.001\sim 0.005$ mm)、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、脲酶和过氧化氢酶显著 ($P<0.05$) 或极显著

($P<0.01$) 正相关，与砂粒 ($0.05\sim 0.25$ mm)、pH、EC、速效钾极显著负相关 ($P<0.05$)，而与细粉砂粒 ($0.005\sim 0.01$ mm) 和粗粉砂粒 ($0.01\sim 0.05$ mm) 量无显著相关性 ($P>0.05$)，说明在滨海地区中，土壤颗粒分形维数能较好地表征土壤肥力变化状况。

表 3 土壤颗粒分形维数 D 与土壤理化性质和酶活性偏相关性分析

Table 3 Partial correlation analysis of soil particle fractal dimension with soil physicochemical properties and enzyme activities

	土壤粒径/mm					pH	EC	有机质量	全氮量	碱解氮量	速效钾量	有效磷量	脲酶活性	过氧化氢酶活性
	<0.001	0.001~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.25									
D	0.851**	0.366**	0.263	-0.251	-0.449**	-0.526**	-0.484**	0.28*	0.434**	0.575**	-0.375**	0.512**	0.618**	0.421**

注 *表示显著相关 ($P<0.05$)，**表示极显著相关 ($P<0.01$)。

2.5 土壤颗粒分形维数的影响因子分析

采用因子分析法对影响土壤颗粒分形维数 D 的理化(黏粒、粉粒、细粉粒、粗粉砂粒、砂粒、pH、EC、有机质量、全氮量、碱解氮量、速效钾量和有效磷量)和酶活性因子(脲酶和过氧化氢酶)进行统计分析。样本数据充足性检验结果如表4所示, KMO 值为 0.621, 其值越接近于 1, 表明因子分析的相关性越强, 越适合于公共因子分析, 越符合客观事实; 巴特利球形检验结果显著性小于 0.05, 且总方差解释

初始特征值的前 3 个主成分的方差贡献率之和为 78.546% (表 5), 大于 70%, 综合以上分析结果可知因子分析的结果可以接受。

表 4 样本充足性的 KMO 值和巴特利球形检验

KMO 值		0.621
巴特利球形度检验	近似卡方	1016.577
	自由度	91
	显著性	0.000

表 5 总方差解释

Table 5 Explains of the total variance

主成分	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
特征值	6.312	3.273	1.411	0.872	0.710	0.429	0.295	0.249	0.193	0.124	0.060	0.045	0.017	0.009
方差贡献率/%	45.087	23.380	10.079	6.232	5.073	3.065	2.106	1.781	1.377	0.884	0.428	0.320	0.124	0.063
累计方差贡献率/%	45.087	68.468	78.546	84.778	89.851	92.916	95.023	96.804	98.181	99.065	99.493	99.813	99.937	100.000

图3为土壤颗粒分形维数影响因子碎石图。由图3土壤颗粒分形维数影响因子碎石图可以看出, 特征值从第4个开始变化逐渐变小, 因此最终保留3个公共因子, 这与表5得到的结果一致。同时, 由提取的3个公共因子的旋转成分矩阵可知(表6), 第一主成分主要包括碱解氮、全氮、有效磷和脲酶; 第二主成分主要包括粗粉砂粒、pH、速效钾和过氧化氢酶; 第三主成分主要包括黏粒和有机质。其中第一主成分的方差贡献率最高, 因此第一主成分是滨海盐土土壤颗粒分形维数 (D) 的综合影响因子。同时由土壤颗粒分形维数和土壤理化性质与酶活性的偏相关性分析(表3)可知, 土壤颗粒分形维数 (D) 和碱解氮、全氮、有效磷和脲酶均显著正相关 ($P<0.05$), 与第一主成分

内容一致。

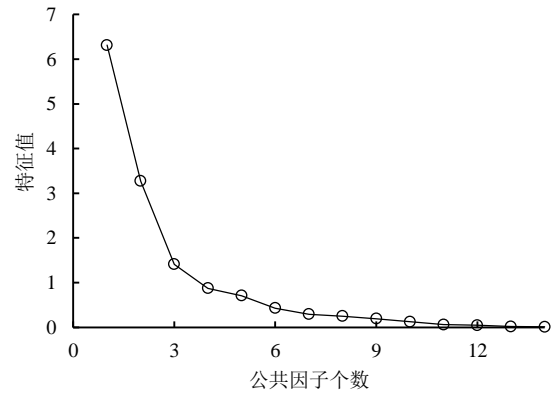


图3 土壤颗粒分形维数影响因子碎石图

Fig.3 Impact factor lithograph of soil particle fractal dimension

表 6 旋转成分矩阵

Table 6 Composition matrix after rotation

主成分	黏粒	粉粒	细粉粒	粗粉砂粒	砂粒	pH	碱解氮量	EC	有机质量	全氮量	速效钾量	有效磷量	过氧化氢酶活性	脲酶活性
1	0.095	-0.003	0.249	-0.019	-0.202	-0.708	0.933	-0.377	0.486	0.694	-0.329	0.857	-0.061	0.917
2	-0.348	-0.726	-0.822	0.838	-0.037	0.615	0.033	0.044	0.344	-0.152	0.772	-0.292	0.769	-0.225
3	0.587	0.293	0.164	0.400	-0.945	-0.262	0.080	-0.871	0.596	0.482	-0.180	0.247	0.130	0.227

3 讨论

土壤颗粒是土壤结构的基础组成单元, 影响着土壤理化性质和生物学过程^[21]。土壤颗粒分形维数已被广泛用于表征土壤结构特征和质地均一性, 土壤质地越粗, 土壤结构越差; 质地越细, 土壤中的黏粒量越多, 分形维数也就越高, 且随着土地利用方式不同而改变^[22, 13]。新垦海涂成陆过程受海水入渗影响, 积盐过程先于成土过程, 土壤物理结构差。研究表明, 土壤颗粒组成受人类活动等影响发生一定的变化, 果园土、菜园土和水稻土中的黏粒 (<0.001 mm)、粉粒 (0.001~0.005 mm) 和细粉粒 (0.005~0.01 mm) 量显著高于新垦海涂, 而粗粉砂粒 (0.01~0.05 mm) 和砂

粒 (0.05~0.25 mm) 量显著低于新垦海涂, 这主要是因为海涂围垦后受土地翻耕、灌溉和施肥等人为因素影响, 大颗粒土壤细化从而导致黏粒的产生与积累^[23]。农耕种植使土壤结构改善, 黏粒量相对增加, 土壤颗粒分形维数因而增加, 这证实了慈恩等^[24]的研究结果。研究还发现, 果园土和菜园土的黏粒量显著高于水稻土, 这是因为相较于水稻田, 旱地的利用方式对土壤颗粒组成的影响更为强烈^[25], 这可能归结于水稻土受灌溉影响, 部分细颗粒物质随水流失而造成的。因此, 果园土和菜园土的土壤颗粒分形维数显著高于水稻土和新垦海涂。研究显示, 菜园土和果园土耕作表层中的黏粒量低于下层土壤, 可能是由于随着耕作年限延长, 表层黏粒通过土壤孔隙逐渐向下迁移累积, 导

致其土壤颗粒分形维数较高^[26]; 而水稻土耕作表层中的黏粒量高于下层土壤, 究其原因, 主要是因为稻田土壤表层在淹水条件下成浆状, 更容易促成黏粒的形成, 因而表层土壤颗粒分形维数高于下层分形维数^[27]。

土壤物理性质、养分量和酶活性都是影响土壤肥力的重要指标。养分量可以直接表征土壤的肥力状况^[28]; 土壤酶是土壤形成、发育及肥力形成的重要因素, 能有效反映土壤养分转化能力的强弱^[29]。而土壤颗粒分形维数可以更好地表征土壤肥力状况, 土壤颗粒分形维数越高, 土壤保肥能力越强^[30]。滨海盐土围垦后进行农业种植, 土壤质地细粒化的同时, 也影响了土壤养分状况和酶活性。我们研究发现菜园土、果园土和水稻土的养分量和酶活性显著高于新垦海涂(速效钾量除外), 这是因为土地开发利用后, 施肥以及表层土壤生物量的增加, 导致土壤养分量和酶活性的增加, 这与 Wei 等^[31]的研究结果一致, 而速效钾量的降低可能是由于滨海地区土壤降盐改良, 从而导致钾的流失^[32]。邱捷等^[8]对海涂围垦区不同土地利用类型土壤分形维数进行研究, 发现土壤有机质量与土壤颗粒分形维数呈极显著正相关。但是, 程先富等^[33]发现土壤颗粒分形维数与有机质量显著负相关; 而周先容等^[34]研究发现土壤颗粒分形维数与有机质量无显著相关性。这些结果可能和研究样品的土壤类型和区域等不同有关。在本研究中, 土壤颗粒分形维数与 pH、EC 和速效钾量显著负相关, 而与有机质量、全氮量、碱解氮量和有效磷量显著正相关, 这是因为土壤中细颗粒量越多, 土壤活性增强, 养分量越高, 土壤颗粒分形维数越大^[35]。本研究还发现, 土壤颗粒分形维数和脲酶、过氧化氢酶活性呈极显著正相关, 这主要是因为土壤黏粒的保肥性、黏着性和可塑性较强, 土壤黏粒量越多, 吸附的土壤酶越多^[11,36]。利用因子分析法和相关性分析发现, 土壤碱解氮量、全氮量、有效磷量和脲酶活性对土壤颗粒分形维数有显著影响, 是影响土壤颗粒分形维数的主导因素, 进一步说明在滨海地区中土壤颗粒分形维数可以用来土壤肥力评价。

4 结论

1) 滨海地区不同土地利用方式土壤粒径分布中, 粗粉砂粒(0.01~0.05 mm)为主, 质量百分数在 54.53%~84.01%之间。海涂开垦能够促进土壤颗粒组成的改善, 土壤黏粒、粉粒和细粉粒增加而砂粒和粗粉砂粒量降低, 土壤颗粒分形维数增加。不同土地利用方式下土壤颗粒分形维数差异性显著, 大小依次为果园土>菜园土>水稻土>新垦海涂。新垦海涂和水稻土的土壤颗粒分形维数随土层深度加深而减小, 而果园

土和菜园土的土壤分形维数随土层深度加深而增加。

2) 土壤颗粒分形维数与黏粒、粉粒、有机质量、全氮量、碱解氮量、有效磷量、脲酶活性和过氧化氢酶活性显著或极显著正相关, 相关系数为 0.851、0.366、0.28、0.434、0.575、0.512、0.618 和 0.421, 与砂粒、pH、EC、速效钾极显著负相关, 相关系数为 -0.449、-0.526、-0.484 和 -0.375, 而与细粉砂粒和粗粉砂粒量无显著相关性。本文揭示了土地利用方式和土壤肥力(碱解氮、全氮、有效磷和脲酶)是影响滨海地区土壤颗粒分形维数的主要因素, 土壤颗粒分形维数可以作为表征滨海地区土壤肥力状况的指标。

参考文献:

- [1] 邱捷, 王洪德, 郑一鹏, 等. 海涂围垦区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(5): 882-888.
QIU Jie, WANG Hongde, ZHENG Yipeng, et al. Fractal features of soil particles under different land uses in a coastal reclamation area[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(5): 882-888.
- [2] 尹春艳, 陈小兵, 刘虎, 等. 不同淋洗条件下黄河三角洲盐渍土脱盐规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 76-82.
YIN Chunyan, CHEN Xiaobing, LIU Hu, et al. Salt leaching from salt-affected soils under different leaching methods in the Yellow River Delta[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 76-82.
- [3] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1-10.
LI Baoguo. Application and Prospect of fractal theory in Soil Science[J]. Progress in Soil Science, 1994, 22(1): 1-10.
- [4] 韩笑, 余冬立, 王洪德, 等. 滨海土壤团聚体分布和分形维数及其影响因子研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 88-92, 113.
HAN Xiao, SHE Dongli, WANG Hongde, et al. Fractal dimension of coastal soil aggregates and its relationship with physical and chemical soil properties[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(5): 88-92, 113.
- [5] 杨婷, 景航, 姚旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 1-5, 24.
YANG Ting, JING Hang, YAO Xu, et al. Soil particle composition and its fractal dimension characteristics of different land uses in loess hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 1-5, 24.
- [6] 张秦岭, 李占斌, 徐国策, 等. 丹江鸚鵡沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 244-249.
ZHANG Qinling, LI Zhanbin, XU Guoce, et al. Soil particle-size distribution and fractal dimension of different land use types in Yingwugou small watershed of Dan River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 244-249.
- [7] ZHAO C L, SHAO M A, JIA X X, et al. Particle size distribution of soils (0~500 cm) in the Loess Plateau, China[J]. Geoderma Regional, 2016, 7(3): 251-258.
- [8] 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.
- [9] 李涵韬, 余健, 方凤满, 等. 复垦对土壤颗粒组成、分形维数、团聚体影响[J]. 环境科学与技术, 2015(8): 11-16.
LI Hantao, YU Jian, FANG Fengman, et al. Soil Particle Size Distribution, Fractal Dimension, Soil Aggregate Feature and Change after Land Leveling Reclamation[J]. Environmental Science and Technology, 2015(8): 11-16.
- [10] 贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形

- 特征[J]. 地理研究, 2007(3): 518-525.
- JIA Xiaohong, LI Xinrong, LI Yuanshou. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area[J]. Geographical Research. 2007(3): 518-525.
- [11] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南坡地土壤颗粒分形特征、微生物和酶活性对退耕模式的响应[J]. 林业科学研究, 2010, 23(5): 750-755.
- WANG Jingyan, HU Tingxing, GONG Wei, et al. Responses of fractal feature of soil particle, microbe and enzyme activity to de-farming patterns of slope farmland in southern Sichuan Province of China[J]. Forest Research, 2010, 23(5): 750-755.
- [12] 姚姣转, 刘廷玺, 董新, 等. 科尔沁沙地沙丘-草甸相间地土壤颗粒的分形特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 433-440.
- YAO Jiaozhuan, LIU Tingxi, TONG Xin, et al. Soil particle fractal dimension in the dune-meadow ecotone of the horqin sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 433-440.
- [13] 熊波, 王建力, 张天文, 等. 渝东南岩溶山区耕地利用变化下土壤颗粒体积分形特征研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 295-301.
- XIONG Bo, WANG Jianli, ZHANG Tianwen, et al. Study on volume fractal features of soil particle under different land use types in southeast Karst Mountain of Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(3): 295-301.
- [14] 刘梦云, 常庆瑞, 岳庆玲, 等. 宁南山区不同利用方式土壤颗粒分形特征[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 201-206.
- LIU Mengyun, CHANG Qingrui, YUE Qingling, et al. The fractal features of soil particle size distribution under different land use in mountainous areas of south Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(6): 201-206.
- [15] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 35-41.
- DONG Lili, ZHENG Fenli. Fractal characteristics of soil particles in the Hilly-gully Regions of the Loess Plateau, North of Shaanxi, China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 35-41.
- [16] 王龙, 庄南俊. 沉降、比重计测定-用卡钦斯基制对土壤质地的判定[J]. 山东化工, 2019, 48(10): 94-96.
- WANG Long, ZHUANG Nanjun. Sedimentation and hydrometer determination - Determination of soil texture by Kaczynski system[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(10): 94-96.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 1999, 北京: 中国农业科学出版社.
- LU Rukun. Methods for agrochemical analysis of soil [M]. 1999, Beijing: China Agricultural Science Press.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 1986, 北京: 农业出版社.
- GUAN Songyin. Soil enzymes and their research methods[M]. 1986, Beijing: Agricultural Press.
- [19] 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): 1 896-1 899.
- YANG Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by the weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1 896-1 899.
- [20] 马祥华, 焦菊英, 白文娟, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤养分因子对植被恢复的贡献[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 328-335.
- MA Xianghua, JIAO Juying, BAI Wenjuan, et al. Contribution of soil nutrient in abandoned lands to vegetation restoration in hilly and gully regions on the loess plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(2): 328-335.
- [21] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 喀斯特地区植被恢复过程中土壤渗透性能及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(6): 12-18.
- WANG Peijiang, DAI Quanhou, DING Guijie, et al. Infiltration characteristics of soil and its affecting factors in the process of vegetation recovery in Karst region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(6): 12-18.
- [22] 王景燕, 胡庭兴, 龚伟, 等. 川南坡地不同退耕模式对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(6): 1 410-1 416.
- WANG Jingyan, HU Tingxing, GONG Wei, et al. Fractal features of soil aggregate structure in slope farmland with different de-farming patterns in south Sichuan Province of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1 410-1 416.
- [23] KIRCHHOF G, PRIYONO S, UTOMO W H, et al. The effect of soil puddling on the soil physical properties and the growth of rice and post-rice crops[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 56(1/2): 37-50.
- [24] 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 不同耕作年限水稻土土壤颗粒的体积分形特征研究[J]. 土壤, 2009, 41(3): 396-401.
- CI En, YANG Linzhang, CHENG Yueqin, et al. Volume fractal property of soil particle size distribution of paddy soils cultivated for different years[J]. Soils, 2009, 41(3): 396-401.
- [25] 张俊华, 李国栋, 南忠仁. 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3 745-3 753.
- ZHANG Junhua, LI Guodong, NAN Zhongren. Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12): 3 745-3 753.
- [26] 张甘霖, 龚子同. 水耕人为土某些氧化还原原形态特征的微结构和形成机理[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 10-16.
- ZHANG Ganlin, GONG Zitong. Micro-structure and formation mechanism of typical redoxi-orphic features of hydric anthrosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 10-16.
- [27] JANSSEN M, LENNARTZ B. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1): 133-141.
- [28] 王钰莹, 孙娇, 刘政鸿, 等. 陕南秦巴山区厚朴群落土壤肥力评价[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5 133-5 141.
- WANG Yuying, SUN Jiao, LIU Zhenghong, et al. Soil fertility quality assessment of Magnolia officinalis communities in Qinba mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5 133-5 141.
- [29] 张玉兰, 陈利军, 刘桂芬, 等. 土壤水解酶类催化动力学研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2 326-2 332.
- ZHANG Yulan, CHEN Lijun, LIU Guifen, et al. Research advance in catalytic kinetics of soil hydrolase[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2 326-2 332.
- [30] 邓良基, 林正雨, 高雪松, 等. 成都平原土壤颗粒分形特征及应用[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 38-42.
- DENG Liangji, LIN Zhengyu, GAO Xuesong, et al. Fractal feature of soil particles in the Chengdu plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(1): 38-42.
- [31] WEI X R, HAO M D, SHAO M G, et al. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 91(1/2): 120-130.
- [32] 刘琛, 丁能飞, 郭彬, 等. 不同土地利用方式下围垦海涂微生物群落和土壤酶特征[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 99-105.
- LIU Chen, DING Nengfei, GUO Bin, et al. Characteristics of microbial community structure and enzyme activities in reclaimed saline soil region under different land use types[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1): 99-105.
- [33] 程先富, 史学正, 王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J]. 地理科学, 2003, 23(5): 617-621.
- CHENG Xianfu, SHI Xuezheng, WANG Hongjie. Fractal characteristics of particle of arable layers in hilly region of red soil[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(5): 617-621.
- [34] 周先容, 陈劲松. 川西亚高山针叶林土壤颗粒的分形特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 891-894.
- ZHOU Xianrong, CHEN Jinsong. Fractal characteristics of soil particles under subalpine coniferous forests in Western Sichuan[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(8): 891-894.
- [35] 赵来, 吕成文. 土壤分形特征与土壤肥力关系研究: 以皖南地区水稻

土为例[J]. 土壤肥料, 2005(6): 7-11.

ZHAO Lai, LYU Chengwen. Study on relation between fractal features and fertility of soil: Take paddy soil in southern area of Anhui Province for example[J]. Soils and Fertilizers, 2005(6): 7-11.

[36] 张昌顺, 范少辉, 漆良华, 等. 闽北典型毛竹林土壤微团聚体分形特

征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 170-175.

ZHANG Changshun, FAN Shaohui, QI Lianghua, et al. Fractal features of soil micro-aggregates under typical phyllostachys edulis forests in Northern Fujian Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 170-175.

Particle Composition and Fractal Dimension Vary with Land Management for Soils in Coastal Regions

ZHU Yun^{1,2}, FU Qinglin^{2*}, GUO Bin², LIN Yicheng², LIU Chen²

(1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Institute of Environmental Resources, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: 【Objective】 Soil particle composition and its fractal dimension are a parameter to characterize soil physical property; they are closely correlated to soil fertility and productivity. The purpose of this paper is to study its variation with land management. 【Method】 The experiment site was at Shangyu County in Shaoxing City of Zhejiang Province. Soil samples were taken from 0~100 cm profile from four land managements: tidal flat, paddy field, and orchard and vegetable field. For each sample, we measured its particle composition and fractal dimension, pH, EC, nutrients and enzymatic activities, from which we analyzed if and how soil fertility and physicochemical properties are correlated to fractal dimension and particle composition using factor-analysis method. 【Result】 The fractal dimension was in the range of 2 to 3, and it was significantly higher in the paddy, orchard and vegetable field than in the tidal flat. The land use affected content and distribution of particle composition and fractal dimension both at significant level ($P < 0.05$). In the newly reclaimed coastal saline soil and paddy soil, the fractal dimension is the highest in the 0~20 cm soil layer, while in the orchard and vegetable field, it is the highest in the 80-100cm soil layer. 【Conclusion】 There is a significant correlation between soil particle fractal dimension and soil fertility ($P < 0.01$). The fractal dimension, which is easy to measure, can thus be used as a proxy for soil fertility in evaluating soil health.

Key words: coastal area; land use type; fractal dimension of soil particles; soil fertility

责任编辑：赵宇龙