

陈小磊,舒强,田欢,等. 浙北平原区土壤分形特征及其与土壤肥力的关系——以水稻土为例[J]. 江苏农业科学,2021,49(22):247-252.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.22.043

# 浙北平原区土壤分形特征及其与土壤肥力的关系 ——以水稻土为例

陈小磊<sup>1</sup>, 舒强<sup>1</sup>, 田欢<sup>2</sup>, 徐明星<sup>1</sup>

[1. 浙江省地质调查院, 浙江杭州 311203; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉 430074]

**摘要:**对浙北平原区水稻土分形特征与土壤肥力的关系进行研究,为利用土壤分形维数表征土壤肥力提供基础依据。通过对土壤各粒级颗粒组成、肥力指标进行相关性分析,了解该地区土壤的分形特征,探究土壤分形特征与土壤肥力之间的关系。结果表明,该地区土壤颗粒粒级范围主要分布在 2~250  $\mu\text{m}$  之间,占土壤颗粒组成的 83.50%~98.36%。土壤分形维数( $D$ )在 2.43~2.76 之间, $D_{\text{黏土}} > D_{\text{粉黏土}} > D_{\text{粉黏壤土}}$ ;黏土、粉黏土和粉黏壤土分形维数之间呈显著性差异( $P < 0.05$ );土壤分形维数与粒级  $< 2 \mu\text{m}$  和 2~20  $\mu\text{m}$  颗粒含量呈正相关,与粒级  $> 20 \sim 50 \mu\text{m}$  和  $> 50 \sim 250 \mu\text{m}$  颗粒含量呈负相关;不同深度土壤的分形维数  $D_{0 \sim 30 \text{ cm}} < D_{30 \sim 60 \text{ cm}} < D_{60 \sim 90 \text{ cm}}$ ,土壤颗粒组成与分形维数的回归方程: $D = 2.549 + 2.646 \times 10^{-3} X_{250 \sim 2000 \mu\text{m}} + 8.890 \times 10^{-4} X_{50 \sim 250 \mu\text{m}} + 1.199 \times 10^{-3} X_{2 \sim 20 \mu\text{m}} + 2.408 \times 10^{-2} X_{< 2 \mu\text{m}}$ 。土壤分形维数受粒级  $< 2 \mu\text{m}$  颗粒含量的影响大于其他粒级,耕种活动引起土壤大颗粒( $> 50 \mu\text{m}$ )含量提高,导致土壤分形维数值降低,土壤分形维数值能有效反映土壤阳离子交换量、全钾和速效钾的特征。开展农耕活动时,可以采用间歇翻耕,缓解表土层长期处于松散状态,防止土壤养分过度流失。

**关键词:**土壤颗粒组成;分形维数;水稻土;土壤肥力

**中图分类号:** S152.2;S153.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)22-0247-06

土壤是由不同大小和形状的固体颗粒物构成的具有自相似特征的多孔介质,且具有分形特征<sup>[1]</sup>。20 世纪 70 年代,Mandelbort 等首次提出了分

形理论<sup>[2]</sup>,随着分形理论的发展,分形理论在土壤学中的应用越来越广泛,主要分为描述土壤物理特征、建立土壤物理过程模型、定量分析土壤空间变异性等 3 类<sup>[3]</sup>。土壤分形特征能反映土壤水肥状况<sup>[4]</sup>、侵蚀退化<sup>[5-6]</sup>状况。分形理论表征土壤粒径分布分为 3 种形式:土壤体积分布分形维数、质量分布分形维数以及土壤粒径数量分布分形维数,其中土壤体积分布分形维数与质量分布分形维数准确度较高<sup>[7-8]</sup>。Arya 等研究了土壤颗粒分形维数的计算方法与分形现象<sup>[9-10]</sup>。杨培玲等在 Katz 等提出的粒径计算方法上进行改进,提出采用土壤颗粒的重量分布计算粒径分布的分形维数<sup>[11-12]</sup>。杨金

收稿日期:2021-03-25

基金项目:潮州市市本级农业地质环境调查项目(编号:2013003);浙江省基本农田土地质量地球化学监测试点项目(编号:121201108000150012)。

作者简介:陈小磊(1988—),男,湖北荆州人,硕士,工程师,主要研究方向为环境地球化学、农业地质、污染评价及修复。E-mail:cxiaolei@sina.cn。

通信作者:徐明星,博士,高级工程师,主要研究方向为土壤资源与环境、农业地质。E-mail:xumingxing535005@163.com。

[20] Zeng X X, Tagn J X, Jiang P, et al. Isolation, characterization and extraction of mer gene of  $\text{Hg}^{2+}$  resisting strain  $D_2$ [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(3): 507-512.

[21] 魏树和,周启星,王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 167-171.

[22] Goswami D, Thakker J N, Dhandhukia P C. Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): a review[J]. Cogent Food & Agriculture, 2016, 2(1): 1127500.

[23] Vessey J K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers

[J]. Plant and Soil, 2003, 255(2): 571-586.

[24] Martínez - Viveros O, Jorquera M A, Crowley D E, et al. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 10(3): 293-319

[25] Shan S P, Guo Z H, Lei P, et al. Increased biomass and reduced tissue cadmium accumulation in rice via indigenous *Citrobacter* sp. XT1-2-2 and its mechanisms[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 135224.

玲等认为体积分形维数与质量分形维数一样能反映土壤的特性,甚至优于质量分析维数<sup>[7]</sup>。

诸多研究者对竹林土、人工林土、水稻土等的分形特征进行研究,并建立了土壤颗粒组成与分形维数的关系<sup>[13-14]</sup>,利用土壤分形维数与土壤颗粒组成之间的关系来分析土壤质量变化、水土流失和地质灾害<sup>[15-16]</sup>。本研究采用体积分形维数的计算方法对浙北平原区水稻土土壤分形维数进行计算,探讨土壤分形特征与土壤肥力的关系,以期利用土壤分形维数来表征土壤肥力特征提供基础研究依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

浙北平原又称杭嘉湖平原,是浙江省最大的平原分布区,地处长江三角洲南岸,北临太湖,东接上海,土壤肥沃,经济发达,是我国著名的鱼米之乡。该区为河湖相、湖沼相和滨海相沉积平原,成土母质为湖相-湖沼相、第四系沉积物土为主<sup>[17]</sup>,土壤类型以湖沼相水稻土为主。

### 1.2 样品采集

土壤样品采自浙北平原区的水稻田,待水稻成熟收割后,开始采集土壤,其中表层土壤(0~20 cm)194 件,土壤剖面 9 条(按 0~30、30~60、60~90 cm 分为 3 层,共 27 件土壤)。表层土壤和土壤剖面样品按照“X”的方式采集,每件土壤样品质量大于 2 kg,装于布袋中带回,剔除植物残余物等杂质后,自然晾干,粉碎后过 20 目筛,备用。

### 1.3 样品测试

土壤样品的质地分析测试由国土资源部杭州矿产资源监督检测中心完成。将风干土样研磨过 2 mm 筛,备用。土壤颗粒组成由激光粒度分析仪测定,pH 值采用电位法测定,土壤有机碳含量用  $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{K}_2\text{CrO}_7$  外加热法测定,土壤阳离子交换量采用 EDTA-乙酸铵混合提取法测定<sup>[18]</sup>,全氮含量用凯氏定氮法测定,全磷含量用硫酸-过氧化氢联合消解-钼锑抗比色法测定,土壤全钾采用氢氧化钠熔融法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,土壤有效磷采用钼锑抗比色法测定,土壤速效钾采用火焰光度计法测定。

### 1.4 模型选择

本研究采用体积分形维数<sup>[7]</sup>的计算公式计算土壤的分形维数。

$$\frac{V(\sigma \leq \bar{d}_i)}{V_0} = \left[ \frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right]^{3-D} \quad (1)$$

其中: $\bar{d}_i$ 为粒径  $d_i$  与  $d_{i+1}$  之间的平均值; $d_{\max}$  为最大粒级的平均直径; $V(\sigma \leq \bar{d}_i)$  为小于  $\bar{d}_i$  的累积土粒的体积; $V_0$  为土壤各粒级体积之和; $D$  为分维系数。

### 1.5 数据处理

采用 Excel 2007、SPSS 21 对数据进行分类、统计、单因素方差分析(ANOVA)和相关性分析,采用 Origin 7.5 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层土壤分形维数特征

浙北平原区水稻土成土母质以湖相-湖沼相沉积物为主<sup>[19-20]</sup>,本研究采集的水稻土土壤类型主要为脱潜型水稻土和潜育型水稻土。本研究对土壤不同粒级范围( $<2 \mu\text{m}$ 、 $2 \sim 20 \mu\text{m}$ 、 $>20 \sim 50 \mu\text{m}$ 、 $>50 \sim 250 \mu\text{m}$ 、 $>250 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ )占比进行统计(表 1),采用美国土壤质地分类系统对土壤进行分类( $<2 \mu\text{m}$  为黏粒, $2 \sim 50 \mu\text{m}$  为粉粒, $>50 \sim 2\,000 \mu\text{m}$  为沙粒),本研究采集的土壤为黏土(108 件)、粉黏土(78 件)、粉黏壤土(8 件)。研究区土壤颗粒粒径范围主要介于  $2 \sim 250 \mu\text{m}$  之间,占土壤颗粒组成总量的 83.50%~98.36%。浙北平原区地区水稻土土壤分形维数值  $D_{\text{黏土}} > D_{\text{粉黏土}} > D_{\text{粉黏壤土}}$ ,分别为 2.62、2.59、2.51。其中,黏土土壤粒径分形维数在 2.51~2.76,粉黏土土壤粒径分形维数在 2.47~2.70,粉黏壤土土壤粒径分形维数在 2.43~2.61,低于皖南水稻土分形维数值(2.67~2.91)<sup>[14]</sup>。分别对 3 种不同质地类型的土壤颗粒组成和分形维数进行单因素方差(ANOVA)分析。结果显示,不同质地类型之间颗粒组成和分形维数均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

### 2.2 表层土壤分形维数与各粒级颗粒组成的关系

对不同土壤质地类型的分形维数与土壤颗粒组成进行相关性分析,表 2 结果显示,粉黏壤土的分形维数仅粒级为  $>250 \sim 2\,000 \mu\text{m}$  和  $<2 \mu\text{m}$  的颗粒呈相关性,相关系数分别为 -0.731( $P < 0.05$ )和 0.994( $P < 0.01$ );黏土的分形维数与粒级为  $>250 \sim 2\,000$ 、 $>50 \sim 250$ 、 $<2 \mu\text{m}$  的颗粒呈显著相关性,相关系数分别为 -0.323( $P < 0.01$ )、-0.452( $P < 0.01$ )和 0.910( $P < 0.01$ );粉黏土的分形维数与粒级为  $>250 \sim 2\,000$ 、 $>50 \sim 250$ 、 $<2 \mu\text{m}$  的颗粒呈显著相关性,相关系数分别为 -0.275( $P < 0.05$ )、

表 1 表层土壤颗粒组成及分形维数

质地类型	样本数	土壤颗粒组成(%)					分形维数
		>250 ~ 2 000 μm	>50 ~ 250 μm	>20 ~ 50 μm	2 ~ 20 μm	<2 μm	
黏土	108	1.40a	11.51a	21.61a	58.95a	6.53a	2.62a
粉黏土	78	1.77a	15.52b	31.16ab	47.04b	4.51b	2.59b
粉黏壤土	8	5.08b	25.42c	34.74b	32.15c	2.61c	2.51c

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(  $P < 0.05$  )。表 4 同。

表 2 不同类型土壤分形维数与土壤颗粒组成的相关系数

土壤分形维数	相关系数				
	>250 ~ 2 000 μm	>50 ~ 250 μm	>20 ~ 50 μm	2 ~ 20 μm	<2 μm
$D_{黏土}$	-0.323 **	-0.452 **	-0.153	0.132	0.910 **
$D_{粉黏土}$	-0.275 *	-0.289 *	0.045	0.083	0.979 **
$D_{粉黏壤土}$	-0.731 *	-0.347	0.419	-0.611	0.994 **

注:\*\*、\* 分别表示在 0.01、0.05 水平(双侧)上显著相关。表 5、表 7 同。

-0.289(  $P < 0.05$  )和 0.979(  $P < 0.01$  );黏土的分形维数与各粒级颗粒的相关性大于粉黏土。

以全部土壤样品为样本对土壤分形维数和各级颗粒进行相关性分析,结果显示(图 1),土壤分形维数与粒级大于 20 μm 的颗粒呈负相关性,与粒级 <20 μm 的颗粒呈显著的正相关性,相关方程见表 3。土壤分形维数与粒级为 <2 μm 和 2 ~ 20 μm 颗粒的相关系数分别为 0.947 和 0.648(  $P < 0.01$  ),与 >20 ~ 50 μm 和 >50 ~ 250 μm 粒级颗粒的相关系数分别为 -0.449(  $P < 0.01$  )和 -0.607(  $P < 0.01$  ),土壤分形维数能有效反映土壤颗粒组成和土壤质地的特征,土壤分形维数越大,土壤颗粒组成中粒级 <20 μm 占比越高越高,与皖南地区水稻土所反映的规律一致<sup>[14]</sup>。

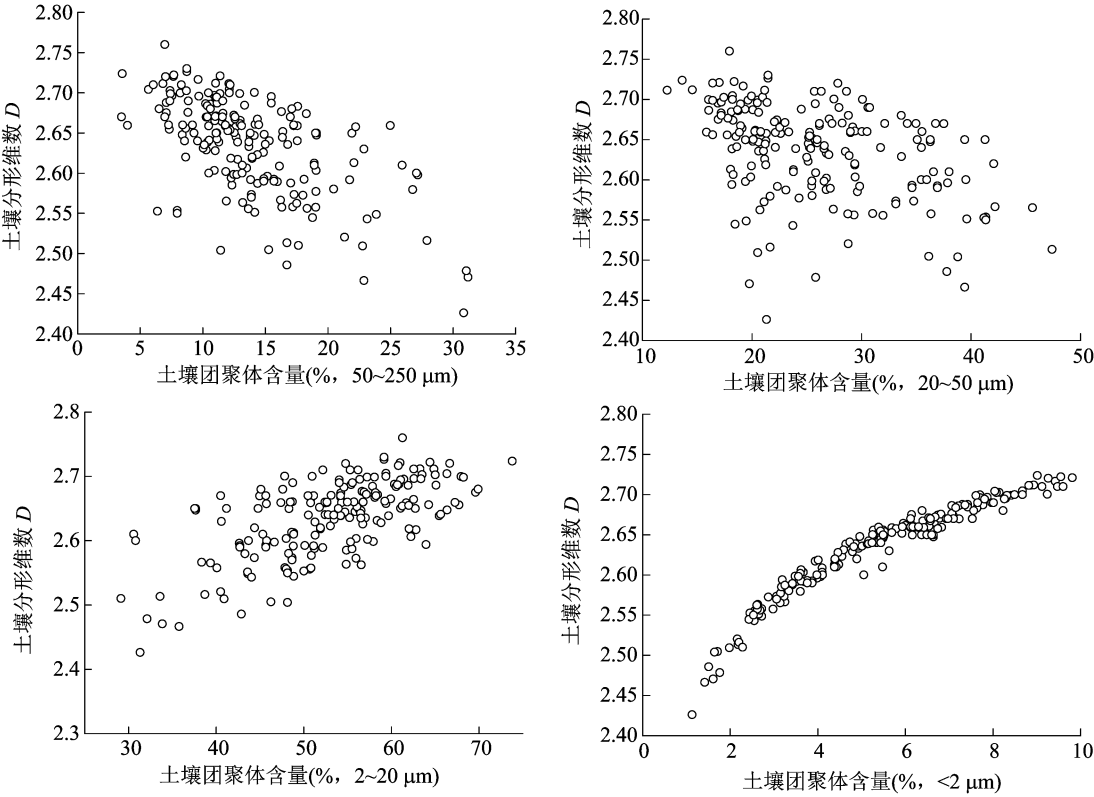


图1 表层土壤分形维数与各级颗粒组成的相关性

将 >50 ~ 250、>20 ~ 50、2 ~ 20、<2 μm 等 4 个粒径的颗粒组成含量与土壤分形维数进行多元回归分析,分形维数  $D = 2.549 + 2.646 \times 10^{-3} X_{>250 \sim 2\,000\,\mu m} +$

$8.890 \times 10^{-4} X_{>50 \sim 250\,\mu m} + 1.199 \times 10^{-3} X_{2 \sim 20\,\mu m} + 2.408 \times 10^{-2} X_{<2\,\mu m}$ 。式中,  $X_a$  为粒级  $a$  颗粒组成的含量;调整  $R^2 = 0.879$ ,  $df = 4$ ,  $F = 342.948$ ,  $F_{(0.01, 4, 189)} =$

表 3 表层土壤分形维数与各粒级颗粒的相关性

土壤颗粒组成	相关方程	相关系数
<2 μm	$y = 2.495 + 2.52 \times 10^{-2}x$	0.947 ( $P < 0.01$ )
2 ~ 20 μm	$y = 2.397 + 4.49 \times 10^{-3}x$	0.648 ( $P < 0.01$ )
>20 ~ 50 μm	$y = 2.727 - 3.55 \times 10^{-3}x$	-0.449 ( $P < 0.01$ )
>50 ~ 250 μm	$y = 2.730 - 6.92 \times 10^{-3}x$	-0.607 ( $P < 0.01$ )
>250 ~ 2 000 μm	$y = 2.654 - 1.09 \times 10^{-2}x$	-0.479 ( $P < 0.01$ )

3.420,  $F > F_{(0.01,4,189)}$ 。由此可见,土壤分形维数主要受粒级 <2 μm 颗粒含量影响,当 <2 μm 颗粒含量 <4% 时影响更加显著。

2.3 不同深度土壤分形维数特征

为进一步揭示土壤分形维数与土壤各粒级团聚体在纵向上的关系,对研究区的 9 条土壤剖面开展分析。浙北平原区水稻田不同深度土壤的分形

表 4 不同深度土壤颗粒组成及分形维数 (n=9)

土壤深度 (cm)	土壤颗粒组成 (%)					分形维数
	>250 ~ 2 000 μm	>50 ~ 250 μm	>20 ~ 50 μm	2 ~ 20 μm	<2 μm	
0 ~ 30	0.53a	11.53a	31.32a	52.84a	3.79a	2.60a
30 ~ 60	0.08b	8.12b	34.56a	53.20a	4.05a	2.61ab
60 ~ 90	0.05b	7.44b	33.76a	53.29a	5.46b	2.64b

2.4 不同深度土壤分形维数与各粒级颗粒组成之间的关系

由表 5 可见,不同深度土壤分形维数与粒级 <50 μm 的颗粒组成均呈现一定的相关性;其中,土壤分形维数与 20 ~ 50 μm 颗粒呈显著负相关性,与粒径 <20 μm 的颗粒呈显著正相关性,颗粒组成粒级越小,与土壤分形维数的相关性增大。30 ~ 60 cm 深度的土壤分形维数与粒径范围在 2 ~ 50 μm 的颗粒组成相关性大于 0 ~ 30 cm 和 60 ~ 90 cm 的土壤,粒径 <2 μm 的颗粒与 0 ~ 30 cm 深度土壤的分形维数相关性最强,相关系数达到 1.000。

表 5 不同深度土壤分形维数与土壤颗粒组成的相关系数

分形 维数	相关系数				
	>250 ~ 2 000 μm	>50 ~ 250 μm	>20 ~ 50 μm	2 ~ 20 μm	<2 μm
$D_{0 \sim 30 \text{ cm}}$	0.026	-0.400	-0.733 *	0.867 **	1.000 **
$D_{30 \sim 60 \text{ cm}}$	-0.035	-0.354	-0.937 **	0.911 **	0.987 **
$D_{60 \sim 90 \text{ cm}}$	0.138	-0.244	-0.689 *	0.588	0.992 **

2.5 土壤分形维数与土壤肥力的关系

土壤肥力受到地质背景、成土母质以及人为活动的影响,土壤颗粒组成在一定程度上能反映土壤肥力状况,土壤分形维数能表征土壤颗粒组成和质

维数见表 4。结果显示,0 ~ 30 cm 土壤中粒级 >50 μm 的颗粒组分高于 30 ~ 60、60 ~ 90 cm 土壤,且呈显著性差异,土壤中粒级 2 ~ 50 μm 的颗粒组成含量随土壤深度的增加而增大,但无明显差异,60 ~ 90 cm 土壤粒级 <2 μm 土壤颗粒组分显著高于其他 2 组;不同深度土壤的分形维数关系为  $D_{0 \sim 30 \text{ cm}} < D_{30 \sim 60 \text{ cm}} < D_{60 \sim 90 \text{ cm}}$ ,其中 0 ~ 30 cm 土壤的分形维数与 60 ~ 90 cm 的土壤呈显著性差异。耕种活动对土壤颗粒组成有影响,浙北平原区的水稻种植引起表层土壤中大粒级颗粒 (>50 μm) 的增加,与其他研究者的研究结果<sup>[21-23]</sup>一致。水型作用使得表层粒径较小的颗粒向下迁移累积<sup>[24]</sup>,粒径较大的颗粒在表层土壤沉积,同时农田排水过程导致粉沙粒和黏粒颗粒流失<sup>[25]</sup>,使得深层土壤分形维数高于表层土壤。

地情况。因此,对土壤分形维数与土壤肥力关系进行研究,为土壤分形维数表征土壤肥力提供了依据。由表 6 可见,土壤有机质含量和阳离子交换量顺序均为黏土 > 粉黏土 > 粉黏壤土;土壤肥力指标(全氮、全钾、碱解氮、速效钾含量)随土壤质地由粗变细而增大,粉黏土中全磷和速效磷含量均高于黏土和粉黏壤土。

土壤分形维数与土壤肥力指标的关系研究(表 7)表明,土壤分形维数与阳离子交换量、全钾和速效钾呈相关性,相关方程分别为  $CEC = -114.99 + 50.538 \times D$  ( $R = 0.657, P < 0.01$ )、 $\text{全钾} = -4.72 + 2.494 \times D$  ( $R = 0.634, P < 0.01$ )、 $\text{速效钾} = -1\,670.77 + 700.762 \times D$  ( $R = 0.318, P < 0.05$ );土壤分形维数增大,粒级 <20 μm 的颗粒组成比例增加,阳离子交换量增加,土壤保肥能力增强;土壤有机质、全氮、全磷含量与分形维数未表现出显著相关性,主要受大团聚体的影响<sup>[26-27]</sup>;各粒级颗粒组成对碱解氮(除粒级为 20 ~ 50 μm 外)和速效磷未表现出明显相关性。

3 讨论与结论

土壤颗粒组成继承了成土母质的特点,又受到

表 6 土壤肥力特征

土壤类型	阳离子交换量 (cmol/kg)	有机质含量 (%)	全氮含量 (mg/kg)	全磷含量 (mg/kg)	全钾含量 (%)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
黏土 ( $n=16$ )	22.01	3.54	2 004.75	876.06	2.05	173.50	30.81	231.75
粉黏土 ( $n=25$ )	18.07	2.75	1 693.76	1 073.20	1.83	162.04	35.78	174.24
粉黏壤土 ( $n=3$ )	14.10	1.67	1 057.00	792.33	1.78	88.67	21.28	104.33
总计 ( $n=44$ )	19.23	2.96	1 763.43	982.36	1.91	161.20	32.98	190.39

表 7 土壤分形维数与土壤肥力的相关系数

肥力指标	相关系数					分形维数
	$>250 \sim 2\ 000\ \mu\text{m}$	$>50 \sim 250\ \mu\text{m}$	$>20 \sim 50\ \mu\text{m}$	$2 \sim 20\ \mu\text{m}$	$<2\ \mu\text{m}$	
阳离子交换量	0.314 *	-0.028	-0.847 **	0.552 **	0.607 **	0.657 **
有机质	0.592 **	0.323 *	-0.600 **	0.253	-0.072	0.007
全氮	0.442 **	0.284	-0.654 **	0.298 *	0.101	0.154
全磷	-0.119	0.114	0.019	-0.112	0.124	0.079
全钾	0.132	-0.135	-0.662 **	0.498 **	0.559 **	0.634 **
碱解氮	0.021	-0.010	-0.367 *	0.258	0.244	0.198
速效磷	-0.148	-0.037	-0.059	0.032	0.227	0.147
速效钾	-0.100	-0.138	-0.290	0.280	0.287	0.318 *

自然和人为活动的影响<sup>[16]</sup>。本研究对象成土母质为湖相-湖沼相、第四系沉积物,与浙北地区成土母质一致<sup>[17]</sup>,土壤类型以湖沼相水稻土为主。调查样品土壤颗粒粒径范围主要介于 $2 \sim 250\ \mu\text{m}$ 之间,占土壤颗粒组成总量的83.50%~98.36%,土壤体积分形维数为 $2.43 \sim 2.76$ ,低于皖南水稻土分形维数( $2.67 \sim 2.91$ )<sup>[14]</sup>。

土壤体积分形维数能表征土壤结构,黏粒含量对土壤体积分形维数的影响较大<sup>[7]</sup>。当 $<2\ \mu\text{m}$ 颗粒含量低于4%时的影响效果大于含量高于4%,与王国梁等研究结论<sup>[28]</sup>一致。黏土分形维数与粒径 $>50\ \mu\text{m}$ 颗粒含量呈显著负相关性,粒径 $>50\ \mu\text{m}$ 颗粒对粉黏土和粉黏壤土分形维数的影响小于黏土,主要由于植物根系与土壤之间相互作用,促进土壤颗粒组成向细化发育<sup>[29]</sup>,因黏土中粒径 $>50\ \mu\text{m}$ 颗粒含量相对低于粉黏土和粉黏壤土,因此该现象在黏土中表现得更为显著。

研究显示,表层土壤分形维数低于深层土壤,旱地土壤不同粒径颗粒在纵向上的分布情况与之类似<sup>[28]</sup>,但稻田土壤表现得更加明显,主要由于长年种植水稻,且每年采用机械化旋耕的方式对表层土壤进行翻耕,使得耕作层松散,进行翻耕时机械对土壤有压实的作用,播种前采用漫灌方式对农田进行处理,农田在较长时间内处于渍水环境状态,水犁作用下表层土壤中粒径较小的颗粒随之向下

迁移<sup>[24]</sup>,导致深层土壤更加趋于紧实,农田排水时导致粉沙粒和黏粒颗粒流失<sup>[25]</sup>。本研究表现为深层土壤中 $>20 \sim 50$ 、 $2 \sim 20$ 、 $<2\ \mu\text{m}$ 颗粒含量高于表层土壤,导致深层土壤分形维数高于表层。因此,耕种方式对土壤中粒径小于 $50\ \mu\text{m}$ 颗粒的迁移有明显影响,并且在土壤分形维数上有明显反应。耕作方式对稻田土壤中颗粒分布的影响大于旱地。可以适当采用间歇翻耕缓解这一现象。

土壤体积分形维数能反映土壤肥力状况。研究显示,土壤体积分形维数与阳离子交换量和全钾呈极显著相关性,土壤颗粒组成中的细颗粒越多,颗粒表面也越粗糙<sup>[30]</sup>。土壤分形维数值小时,大颗粒周围小颗粒少,多为骨架式结构;分形维数值大时,大颗粒周围多被小颗粒包围,单位体积内颗粒接触点多<sup>[31]</sup>,从而对土壤的阳离子交换量有影响。当农田受到长时间渍水和突发大量降雨时,土壤细颗粒随地表水迁移,土壤养分也随之流失,并且该现象高于草地和林地<sup>[32]</sup>。

在该区域开展农业生产活动时,应充分考虑农耕活动对土壤结构的影响,可以适当采用间歇翻耕缓解表层土壤长期处于松散状态,同时施用氮磷钾混合肥或猪厩肥,能提高土壤分形维数,土壤分形维数随深度的增加而降低<sup>[33]</sup>。

浙北平原区水稻土颗粒粒径范围主要分布在 $2 \sim 250\ \mu\text{m}$ 之间,占土壤颗粒组成含量的90.62%~

93.81%。分形维数在 2.43 ~ 2.76 之间,  $D_{黏土} > D_{粉黏土} > D_{粉黏壤土}$ , 分别为 2.62、2.59、2.51。黏土、粉黏土和粉黏壤土土壤分形维数之间呈显著性差异 ( $P < 0.05$ )。土壤分形维数与  $< 2 \mu m$  和  $2 \sim 20 \mu m$  粒级颗粒组成的相关系数分别为 0.947 和 0.648 ( $P < 0.01$ ), 与  $> 20 \sim 50 \mu m$  和  $> 50 \sim 250 \mu m$  粒级颗粒组成的相关系数分别为 -0.449 和 -0.607 ( $P < 0.01$ )。不同深度土壤的分形维数关系为  $D_{0 \sim 30 cm} < D_{30 \sim 60 cm} < D_{60 \sim 90 cm}$ , 耕种活动引起土壤大粒径颗粒 ( $> 50 \mu m$ ) 的增加, 导致土壤分形维数降低。

土壤分形维数  $D = 2.549 + 2.646 \times 10^{-3} X_{250 \sim 2000 \mu m} + 8.890 \times 10^{-4} X_{50 \sim 250 \mu m} + 1.199 \times 10^{-3} X_{2 \sim 20 \mu m} + 2.408 \times 10^{-2} X_{< 2 \mu m}$ , 土壤分形维数受粒级  $< 2 \mu m$  颗粒组成含量的影响大于其他粒级颗粒。土壤分形维数能有效反映土壤质地、阳离子交换量、全钾和速效钾的特性。在一定范围内, 土壤分形维数越大, 说明粒级  $< 20 \mu m$  颗粒占有量、阳离子交换量、全钾和速效钾含量越高。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Mandelbrot B B, Mulvey C. Book - review - fractals - form chance and dimension [J]. Observatory - Didcot, 1980, 13: 1-234.
- [3] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review [J]. Soil and Tillage Research, 1995, 36(1/2): 1-20.
- [4] Gibson J R, Lin H, Bruns M A. A comparison of fractal analytical methods on 2 - and 3 - dimensional computed tomographic scans of soil aggregates [J]. Geoderma, 2006, 134(3/4): 335-348.
- [5] 郗伟华, 刘任涛, 赵娟, 等. 干旱风沙区路域柠条灌丛林地土壤重金属分布及其与土壤分形维数的关系 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 196-202.
- [6] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182.
- [7] 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.
- [8] 张季如, 朱瑞庚, 祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征 [J]. 水利学报, 2004, 35(4): 67-71, 79.
- [9] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle - size distribution and bulk density data [J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(6): 1023-1030.
- [10] Turcotte D L. Fractals and fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B2): 1921-1926.
- [11] 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.
- [12] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation [J]. Physical Review Letters, 1985, 54(12): 1325-1328.
- [13] 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.
- [14] 赵来, 吕成文. 皖南地区水稻土的分形特征研究 [J]. 安徽师范大学学报 (自然科学版), 2005, 28(3): 352-355.
- [15] 滕宏泉, 谢婉丽, 盖海龙, 等. 分形分维理论在地质灾害发育及空间分布规律中的应用——以长安区滑坡、崩塌地质灾害为例 [J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(1): 44-50.
- [16] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系 [J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 221-226.
- [17] 董岩翔, 郑文, 周建华, 等. 浙江省土壤地球化学背景值 [M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-196.
- [18] 浙江省质量技术监督局. 土壤阳离子交换量的测定: DB 33/T 966—2015 [S]. 杭州: 浙江省质量技术监督局, 2015.
- [19] 宋明义, 黄春雷, 董岩翔, 等. 浙江富硒土壤成因分类及开发利用现状 [J]. 上海地质, 2010(增刊 1): 107-110.
- [20] 宋明义, 蔡子华, 黄春雷, 等. 杭嘉湖平原区富硒土壤特征与成因分析 [J]. 广东微量元素科学, 2011, 18(8): 20-26.
- [21] 冀保毅, 赵亚丽, 郭海斌, 等. 深耕条件下秸秆还田对不同质地土壤肥力的影响 [J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 104-109, 116.
- [22] 王志强, 刘英, 杨文亭, 等. 稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响 [J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1143-1155.
- [23] 史琼彬, 赵秀兰, 常同举, 等. 耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1923-1930.
- [24] 张甘霖, 龚子同. 水耕人为土某些氧化还原形态特征的微结构和形成机理 [J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 10-16.
- [25] 章明奎, 邱志腾, 毛霞丽. 长期水耕植稻对水稻土耕层质地的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 249-253.
- [26] 史琼彬, 赵秀兰, 常同举, 等. 耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1923-1930.
- [27] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626-1632.
- [28] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用 [J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550.
- [29] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 154-159.
- [30] 武生智, 魏春玲, 马崇武, 等. 沙粒粗糙度和粒径分布的分形特性 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 1999, 35(1): 53-56.
- [31] 易顺民, 唐辉明. 冻土粒度成分的分形结构特征及其意义 [J]. 冰川冻土, 1994, 16(4): 314-319.
- [32] 王永平, 周子柯, 滕昊蔚, 等. 滇南小流域 3 种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 11-18.
- [33] 赵鹏, 史东梅, 赵培, 等. 紫色土坡耕地土壤团聚体分形维数与有机碳关系 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 137-144.