

北江干流河岸带不同植被类型土壤粒径分形特征

高传友¹, 赵清贺^{2,3}, 刘倩^{2,3}

(1. 广西职业技术学院, 南宁 530226; 2. 教育部 黄河中下游数字地理技术重点实验室,
河南 开封 475004; 3. 河南大学 环境与规划学院, 河南 开封 475004)

摘要:结合野外调查与室内试验,以北江干流河岸带竹林、桉树林、混交林和草地土壤为对象,对比分析了不同植被类型土壤的颗粒组成与分形维数(D)特征及其与其他土壤理化性质的相关性。结果表明:北江干流河岸带土壤结构良好($D=2.79$),质地均一,粒径分布均匀(粉粒、砂粒、黏粒百分比分别为40.66%,36.59%,22.75%),但随粒级增大,空间变异增强; D 值与土壤颗粒组成显著相关,随黏粒和粉粒含量升高、砂粒含量降低, D 值升高;不同植被类型土壤分形与颗粒组成差异明显,其中砂粒含量表现为竹林>混交林>草地>桉树林, D 值、粉粒和黏粒含量均表现为桉树林>草地>混交林>竹林,竹林和桉树林对土壤结构的影响差异有显著($p<0.05$),其他植被类型影响差异不显著; D 值、黏粒含量均与硝态氮(NO_3^--N)和全磷(TP)含量分别呈显著负相关和显著正相关($p<0.05$)关系,土壤砂粒含量与含水量(SM)呈显著负相关($p<0.05$),土壤粉粒含量只与SM呈显著正相关,另外, D 值、砂粒、粉粒和黏粒含量与总有机碳(TOC)和全氮(TN)的相关性均不显著。河岸带土壤受多种因素影响,其土壤理化性质间的相互关系与其他景观差异明显。

关键词:土壤粒径;分形维数;植被类型;河岸带;北江干流

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0037-06

Fractal Characteristic of Soil Particle Size Under Different Vegetation Types in Riparian Zone of the Main Stream of Beijiang River

GAO Chuanyou¹, ZHAO Qinghe^{2,3}, LIU Qian^{2,3}

(1. Guangxi Vocational and Technical College, Nanning 530226, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Kaifeng, He'nan 475004, China; 3. College of Environment and Planning, He'nan University, Kaifeng, He'nan 475004, China)

Abstract: Taking 4 kinds of vegetation types such as bamboo forest, eucalyptus forest, mixed forest, and grassland as research samples, we investigated the soil particle size distribution (PSD) and fractal dimension (D) characteristics as well as their relationships with other basic soil physicochemical properties based on the field survey and laboratory experiment. The results indicated that soil structure in Beijiang River riparian zone was good with D value of 2.79, soil texture was uniform, and the soil PSD was homogeneous with silt, sand, and clay contents of 40.66%, 36.59%, and 22.75%, respectively. However, spatial variation of soil particle increased with increase of soil particle size. Pearson correlation analysis indicated that D value was significantly related with PSD, namely, D value increased with increase of silt and clay contents and decrease of sand content. D value and PSD varied obviously between different vegetation types, therein, the sand content followed the order of bamboo forest>mixed forest>grassland>eucalyptus forest, while the D value, silt content, and clay content presented the same change rule, in the order of eucalyptus forest>grassland>mixed forest>bamboo forest. Moreover, ANOVA result showed that, with regarding to effect of vegetation type on soil structure, there was significant difference between bamboo forest and eucalyptus forest, while insignificant difference between other vegetation types was observed. Relationship between D value and PSD and other soil physicochemical properties showed that both D value and clay content were correlated signifi-

收稿日期:2015-07-29

修回日期:2015-09-16

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41301197);中国博士后科学基金资助项目(2014M550382,2015T80766);教育部黄河中下游数字地理技术重点实验室开放基金(GTYR2013010)

第一作者:高传友(1984—),男,河南开封人,硕士,讲师,主要从事园林设计和景观生态学研究。E-mail:905136388@qq.com

通信作者:赵清贺(1982—),男,河南开封人,博士,讲师,主要从事景观生态学研究。E-mail:zhaqinghe@henu.edu.cn

cantly and negatively with nitrate nitrogen content ($p < 0.05$) and then were correlated significantly and negatively with total phosphorus content ($p < 0.05$). Soil sand content was significantly negatively correlated with soil moisture content at the 0.05 level, and then soil silt content was only significantly negatively correlated with soil moisture content. In addition, the correlations between D value, sand, silt, clay contents and total organic carbon and total nitrogen contents were not significant. In summary, riparian soil is influenced simultaneously by various factors, and the relationship between its physicochemical properties is significantly different from the other landscape.

Keywords: soil particle size distribution; fractal dimension; vegetation types; riparian zone; Beijiang River

河岸带是维持河流生态系统健康,连接陆地生态系统和水生生态系统的重要生态交错带^[1],能提供多种生态系统服务,如纵向上过滤河流悬浮沉积物与水体污染物从而减少地表物质的河道内传输,横向上依靠环境变量的梯度效应从而滞留高地沉积物与农业面源污染物,生物提供多样的栖息地,增强坡岸稳定性和调节高地至低地的坡面径流等^[2-3]。作为河岸带生态系统服务维持的基础,河岸带土壤因受河流洪水过程、河道形态、岸滩结构和人为干扰等多种因素的影响^[4-5],呈现复杂的组成和结构异质性,成为自然因素和人为因素共同作用的聚集地^[1]。如受流水过程影响,河岸带土壤粒径分布具有明显的梯度效应、夹带、传输和沉积过程中不同团粒与形状的颗粒的水力分选效应以及水流强度差异等,致使随距河流距离的增加或从低地至高地,土壤颗粒粒径大小呈降低趋势(砂粒至黏粒),有机质含量呈升高趋势^[5]。因此,研究河岸带土壤组成与结构,有助于进一步了解洪水过程对河岸冲刷和淤积沉积物的影响,亦为自然和人为干扰下河岸带生态系统服务的维持提供理论基础^[1,5]。

土壤粒径分布与分形是土壤组成与结构研究的重要内容之一^[6]。其中,土壤粒径分形维数被认为是解释土壤结构受水位波动^[2]、土地利用变化^[1,6-7]、植被恢复状况^[3,8-10]、人类干扰程度^[11]等环境因子影响的重要指标和有效工具^[12-14],近年来在土壤科学研究中备受关注。因此,本研究以受人类活动和洪水过程影响严重的北江干流河岸带为对象,分析不同植被类型土壤粒径分形特征,为揭示不同植被类型调节洪水对河岸侵蚀的影响和河岸带生态系统稳定性的维持提供基础。

1 研究区概况

本研究选择粤北地区的北江干流河岸带(清远—韶关段)为研究区域(图 1)。北江属珠江水系第二大水系,广东省 4 大河流之一,占广东省国土面积的 22%^[15-16]。流域年平均气温为 18~21℃,年最高气温出现在 7 月、8 月份^[15]。年降雨量为 1 300~2 400 mm,主要集中在雨季(4—9 月,占全年降水量的 70%),旱季(10—3 月)降

雨较少。其中,雨季分为两个汛期:第一个汛期,受锋面降雨影响,发生在 4—6 月,雨量、雨强和持续时间较长,往往造成洪涝灾害;第二个汛期,受热带气旋影响,发生在 7—9 月^[15,17]。由于北江流域降雨时空分布异质性较大,每年洪涝和旱灾时有发生,但是,时间上,随着雨季的延迟和旱季降雨的增加,年内降雨有趋均的态势,而空间上降雨中心有北移趋势(位于降雨中心的流域中南部年降雨减少,北部降雨增加)^[15]。北江年平均径流量为 $4.82 \times 10^{10} \text{ m}^3$,水资源十分丰富,是广东省重要的引用水源,沿江建设有多个水利水电工程用以满足农业、工业和市政用水以及水电开发和洪水控制^[15,17]。但是,由于流域周边经济发展迅速,近年来北江水质恶化明显,其中,农业/农村区域的潜在污染源主要为农业非点源污染、杀虫剂、有机污染物和农村生活污水等,工业/城市区域的潜在污染源包括工业废水、城市生活污水、化工污染和水路交通污染等^[16,18]。北江流域总面积的 70% 由红壤、赤红壤、黄红壤及黄壤组成,具有较好的营养和渗水蓄水能力,为区域内各种植物和农作物的生长发育提供良好条件,也正因如此,区域内尤其是河流沿岸开垦严重,造成土壤养分与结构发生较大变化。目前针对北江的研究,多以流域降雨时空变化、水土流失、水文水质等方面为主要对象^[15-18],较少关注河岸带土壤—植被系统,更缺少河岸带不同植被类型土壤粒径组成与分形维数等基础性研究。

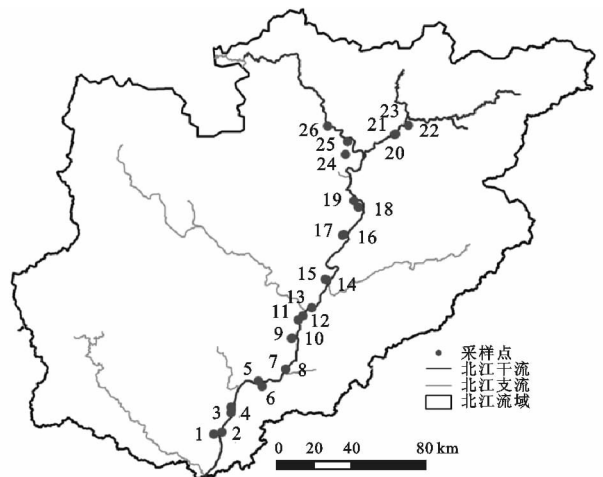


图 1 研究区采样点位置

2 材料与方法

2.1 样品采集与室内分析

在对研究区进行植被普查的基础上,选择具有代表性的混交林(乔灌杂木林)、桉树林、竹林和草地作为不同植被类型于 2014 年 6 月进行采样,样地的面积为 400 m²,共 26 个样地,其中混交林 8 个,桉树林 5 个,竹林 7 个,草地 6 个,样地分布见图 1。在各个样地内采用 5 点采样法,每个采样点距离中心采样点 5 m,采样深度为 0—20 cm,同样地中 5 个样点土壤混合均匀后装入自封袋密封保存,带回实验室进行风干处理。另外,采用环刀法取 0—20 cm 土样带回实验室,采用烘干法测定土壤容重(BD)和含水量(SM)。

风干后土样取出根系与枯落物并过 2 mm 筛,采用四分法取出部分土样,利用马尔文激光粒度分析仪(MALVERN 2000)测定土壤颗粒机械组成,根据美国制土壤粒径分级标准,输出不同质地(黏粒、粉粒、砂粒)和粒级(<0.002,0.002~0.02,0.02~0.05,0.05~0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2 mm)颗粒百分含量(%);剩余土壤研磨过 60 目筛,用于测定土壤养分含量[总有机碳(TOC)、全氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、全磷(TP)、有效磷(A-P)含量],其中,TOC 采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定,TN 采用碳氮元素分析仪测定,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 采用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提并分别用紫外分光光度法和纳氏试剂比色法进行测定,TP 和 A-P 分别采用酸溶—钼锑抗比色法和 Olsen 法测定。

2.2 分形维数计算与数据处理

采用基于土壤颗粒重量分布的方法^[19-20],计算土壤颗粒质量分形维数,公式如下:

lg [M(r<R_i)/M_T] = (3-D)lg(R_i/R_{max}) (1)

式中:D——土壤颗粒粒径分形维数;r——土壤颗粒粒径(mm);R_i——某粒级上限与下限的算术平均值;M(r<R_i)——粒径小于 R_i 的颗粒累积质量;M_T——

土壤颗粒的总质量;M(r<R_i)/M_T——粒径小于 R_i 的土壤颗粒的累积质量百分数;R_{max}——所有粒级的最大粒径^[19]。首先分别计算出 lg [M(r<R_i)/M_T] 和 lg(R_i/R_{max}),其次分别以 lg [M(r<R_i)/M_T] 和 lg(R_i/R_{max}) 为纵坐标和横坐标进行线性拟合,从拟合方程中得到直线斜率,该直线斜率即等于(3-D),进一步求出土壤粒径分形维数 D 值。

采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行数据的统计与分析;相关性分析采用 Pearson 相关系数和线性回归方法,单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著性差异检验不同植被类型间 D 值与颗粒组成的差异及其显著性,显著性水平设定为 0.05。

3 结果与分析

3.1 北江河岸带土壤粒径分布与分形特征描述

如表 1 所示,北江干流河岸带土壤样品的颗粒组成以<0.002,0.002~0.02,0.05~0.25 mm 的含量较高,分别为 22.75%,28.89%,28.24%,其次为 0.02~0.05 mm,其平均值为 11.8%,1~2 mm 含量最小,平均值仅为 1.1%。变异系数表明,随粒径增大,各粒级空间变异增大。

按照美国制土壤质地分类标准,研究区土壤主要由粉粒组成(40.7%),其次为砂粒(36.6%),黏粒最低(22.8%),总体上呈均匀分布。根据质量分形维数计算公式,计算分形维数时各样地的线性拟合方程的 R² 为 0.78~0.99,表明拟合效果能较好地反映土壤粒径分布特征,同时也说明土壤质量分形维数在本研究区的计算精度较高。分形维数计算结果表明,北江干流河岸带土壤分形维数为 2.71~2.86,平均值为 2.79,变异系数为 2%,空间变异较小,说明研究区土壤质地比较均^[21-22]。根据前人研究^[7,23-24],结构良好的土壤其粒径分形维数应在 2.75 左右,因此,北江干流河岸带土壤结构整体属于良好。

表 1 北江干流河岸带土壤粒径分布与分形维数统计描述

项目	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	D	R ²
平均值	22.8	28.9	11.8	28.2	3.6	3.7	1.1	2.79	0.89
最小值	15.2	10.2	4.0	8.5	0.0	0.0	0.0	2.71	0.78
最大值	33.2	42.0	22.0	51.6	22.9	20.4	9.1	2.86	0.99
标准差	5.7	9.7	4.6	11.6	5.2	5.6	2.2	0.05	0.06
变异系数	25.2	33.4	39.4	41.1	145.5	151.0	201.7	1.60	6.30

由图 2 可知,由相关性分析与回归分析可知,研究区土壤分形维数 D 值与黏粒和粉粒含量呈显著正相关关系,R² 分别为 0.98,0.81,p 值均为 0.00;分

形维数与砂粒百分含量呈显著负相关关系,其回归方程的 R² 和 p 值分别为 0.63,0.00,达到极显著水平。这表明黏粒和粉粒含量越高,土壤颗粒的分形维数越

高,而土壤砂粒含量越高,其分形维数越低。本研究结果与较多研究的土壤分形维数与黏粒和砂粒含量关系的结果相一致^[7,11,25],而与部分研究关于土壤分形维数与粉粒关系的结果有所不同^[26],同时,亦与个别研究关于土壤分形维数与砂粒关系的结果相反^[27]。这与诸多环境因子的不同有关,如受干扰程度^[11]、植被类型和土地利用方式^[7,25]、不同粒径分级标准^[28]、不同研究尺度^[27]等。根据前人对细颗粒含量与土壤退化或土壤肥力之间关系的研究结果^[7,11,25],结合本研究土壤粒径分形维数与细颗粒之间显著的相关性,从侧面说明研究区土壤粒径分形维数可以作为指示土壤退化或者土壤肥力的一个指标。

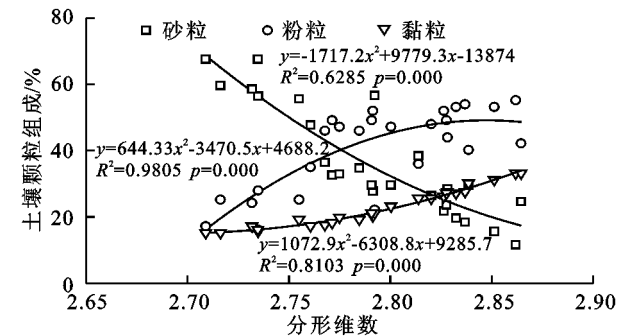


图 2 土壤分形维数与颗粒组成的相关性

表 2 植被类型对土壤分形维数与颗粒组成的影响

植被类型	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	分形维数
混交林	37.1±17.8ab	39.9±13.0ab	23.0±6.5ab	2.79±0.05ab
竹林	48.2±12.1b	32.7±10.7a	19.1±2.6a	2.76±0.03a
桉树林	25.8±6.5a	48.3±4.5b	26.0±5.6b	2.82±0.03b
草地	31.4±19.5ab	44.6±14.6ab	24.0±6.5ab	2.81±0.05ab

注:同一列不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

3.3 河岸带土壤颗粒分形维数与理化性质关系

土壤颗粒组成和分形维数的变化,可能会造成土壤其他基本理化性质发生变化。因此有必要探讨土壤粒径组成和分形维数与其他基本理化性质之间的相关性。表 3 是北江干流河岸带 0—20 cm 土层土壤颗粒组成和分形维数与土壤理化性质的相关关系表。由表 3 可知,分形维数 D 值与硝态氮(NO₃⁻-N)、全磷(TP)含量分别呈显著负相关($p<0.05$)和显著正相关($p<0.05$)关系,与土壤容重(BD)、全氮(TN)、总有机碳

3.2 不同植被类型土壤颗粒组成与分形特征

各植被类型土壤颗粒差异显著,除竹林外,均以粉粒含量最高。其中,砂粒含量表现为竹林>混交林>草地>桉树林,与砂粒含量相反,分形维数 D 值、粉粒含量和黏粒含量均表现为桉树林>草地>混交林>竹林,除竹林与桉树林之间差异显著外($p<0.05$),其他植被类型间差异均不显著,说明竹林与桉树林在改良或维持土壤结构方面有显著差异。根据前人研究^[7,23-24],本研究竹林土壤分形维数最接近 2.75,说明竹林土壤结构状况最好,具有一定的保水保肥能力,混交林次之,桉树林最低,表明桉树纯林的土壤结构最差,保水保肥能力也较差。值得说明的是:4 种植被类型中竹林的黏粒含量最低,说明并非黏粒越高土壤结构越好^[23-24],而可能存在一个阈值。在阈值范围内,随黏粒含量升高,土壤分形维数 D 值升高,颗粒比表面积增大,黏结性更好,对养分的吸附和固定越多,而超过阈值会导致土壤通气能力不足,结构变差^[25]。因此,对于特定类型土壤(不同植被类型、土地利用方式或者研究尺度等),可根据其类型黏粒含量与分形维数的相关性进一步探讨其保持良好土壤结构的黏粒含量^[24,26]。

(TOC)和有效磷(A-P)呈负相关性,但均未达到显著水平($p>0.05$),与土壤含水量(SM)呈正相关,亦未达到显著水平($p>0.05$)。土壤砂粒含量与 SM 和 TP 呈显著负相关($p<0.05$),与其他理化性质相关性均不显著。土壤粉粒含量只与 SM 呈显著正相关,与其他理化性质相关性不显著。土壤黏粒含量与分形维数相似,与 NO₃⁻-N 和 TP 含量分别呈显著负相关($p<0.05$)和显著正相关($p<0.05$)关系,与其他理化性质相关性均未达到显著性水平。

表 3 河岸带土壤颗粒组成和分形维数与土壤理化性质相关性

项目	SM	BD	TOC	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TP	A-P
分形维数	0.379	-0.156	-0.166	-0.085	0.292	-0.449*	0.524**	-0.267
砂粒	-0.465*	0.220	0.115	0.023	-0.177	0.325	-0.423*	0.059
粉粒	0.454*	-0.209	-0.083	0.007	0.113	-0.229	0.295	0.051
黏粒	0.364	-0.183	-0.154	-0.083	0.267	-0.445*	0.584**	-0.282

注:*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

土壤颗粒分布在土壤水分运动过程中扮演重要的角色。据前人研究^[29],砂粒含量越多,SM 就较低,黏

粒含量越高,分形维数越大,SM 就较高。本文结果与其他地区研究结果相一致,但除砂粒含量外,分形维数

D 值、黏粒含量与SM的正相关性均未达到显著水平,说明砂粒含量对研究区SM的影响较为显著。BD是反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力的高低,与土壤结构有密切关系的基本物理属性,其值越大土壤越紧实、板结,退化趋势越明显,其值越小土壤越疏松,结构越良好^[1,7,11,30]。与黎建强等^[29]的BD与分形维数 D 值呈显著负相关的结果不同,本研究中BD与 D 值负相关性明显,但未达到显著水平,其原因可能与作用于土壤的环境因子有关,如Liu等^[11]发现不同干扰程度草地BD与 D 值相关性变异较大。一般情况下,土壤分形维数 D 值越高、颗粒比表面积大的黏粒含量越丰富,土壤黏结性和对养分的吸附和固定作用就越强,易造成养分积累^[25]。但本研究发现,分形维数 D 值和黏粒含量均与TOC和TN的相关性不显著,且均呈负相关性,其原因可能与研究区土壤黏粒含量过高导致土壤通气能力不足有关^[23-24]。

河岸带对地表径流中有效氮的截留具有重要作用,在同等河岸带结构和土壤条件下,土壤颗粒尤其是细颗粒对 NH_4^+-N 具很强的吸附作用,而对 NO_3^--N 的吸附能力有限,最终导致大部分可交换态 NH_4^+-N 成为结合态氮,而 NO_3^--N 被淋洗^[31-32]。植物吸收和反硝化作用是河岸带截留转化氮素的最主要机理,而作为反硝化作用发生的适宜场所,河岸带土壤质地越重,黏粒含量越高,反硝化作用越强,促使更多的 NO_3^--N 转化为气态氮(N_2 , N_2O)^[31-32]。本研究中 NH_4^+-N 与土壤分形维数及颗粒组成相关性不显著, NO_3^--N 与分形维数 D 值和黏粒含量呈显著负相关,进一步说明河岸带土壤颗粒组成和分形维数对 NO_3^--N 的影响更大,即质地越细,土壤通气状况越差,反硝化作用越强, NO_3^--N 含量越少。

自然状态下,土壤中的磷素来源主要为岩石风化释放和凋落物分解^[32-33],河岸带土壤因其特殊的位置,地表径流和地下径流活动频繁,磷素的迁移转化主要通过吸附作用进行^[32]。河岸带土壤通过对地表或地下径流中磷素的吸收,而增加土壤中的TP含量、减少汇入河流中的TP浓度^[33]。因此,本研究关于北江干流河岸带土壤TP与分形维数 D 和黏粒含量呈显著正相关、与砂粒含量呈显著负相关的结果,与伏耀龙等^[25]的岷江上游干旱河谷土壤分形维数与TP的相关性不显著以及Liu等^[33]对长江典型流域土壤颗粒分形维数与TP的关系研究(TP含量与分形维数、粉粒和黏粒含量呈显著的负相关,与砂粒含量呈显著正相关)不太一致。总之,受地形地貌过程、水文过程、土地利用和植被类型、干扰程度、研究尺度等因素的影响,土壤颗粒组成和分形特征与土壤理化

性质间的相互作用颇为复杂,而对河岸带土壤粒径分形及其与理化性质关系的研究目前较少,有待更多案例进行比较分析。

4 结论

(1) 北江干流河岸带不同植被类型土壤主要有粉粒组成(40.66%),其次为砂粒(36.59%),黏粒最低(22.75%),总体上呈均匀分布,并粒径增大,各粒级空间变异增大。土壤分形维数为2.71~2.86,空间变异较小,土壤结构整体属于良好、质地比较均一。研究区土壤分形维数 D 值与黏粒和粉粒含量呈显著正相关关系,与砂粒百分含量呈显著负相关关系,说明黏粒和粉粒含量越高,砂粒含量越低,土壤颗粒的分形维数越高。

(2) 对于不同植被类型,砂粒含量表现为竹林>混交林>草地>桉树林,分形维数 D 值、粉粒含量和黏粒含量均表现为桉树林>草地>混交林>竹林。其中,竹林与桉树林之间差异显著外($p<0.05$),表明二者在改良或维持土壤结构方面有显著差异。

(3) 北江干流河岸带土壤分形维数 D 值、黏粒含量均与 NO_3^--N 和TP含量分别呈显著负相关和显著正相关($p<0.05$)关系,土壤砂粒含量与SM和TP呈显著负相关($p<0.05$),土壤粉粒含量只与SM呈显著正相关。分形维数 D 值和颗粒含量与TOC和TN的相关性均不显著。

参考文献:

- [1] Jiang P, Cheng L, Li M, et al. Impacts of LUCC on soil properties in the riparian zones of desert oasis with remote sensing data: A case study of the middle Heihe River basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 506/507:259-271.
- [2] Tang Q, Bao Y, He X, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 479/480:258-266.
- [3] Gageler R, Bonner M, Kirchhof G, et al. Early response of soil properties and function to riparian rainforest restoration[J]. PloS ONE, 2014, 9(8):e104198. 1-e104198. 8.
- [4] Woodward K B, Fellows C S, Mitrovic S M, et al. Patterns and bioavailability of soil nutrients and carbon across a gradient of inundation frequencies in a lowland river channel, Murray-Darling Basin, Australia [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2015, 205:1-8.
- [5] O'Donnell J, Fryirs K, Leishman M R. Can the sedimentological and morphological structure of rivers be used to predict characteristics of riparian seed banks[J]. Geomorphology, 2015, 245:183-192.

- [6] 王德,傅伯杰,陈利顶,等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2007,27(7):3081-3089.
- [7] Liu X, Zhang G, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. *Geoderma*, 2009,154:123-130.
- [8] 于东明,胡小兰,张光灿,等. 江子河小流域不同植被类型土壤粒径的多重分形特征[J]. 中国水土保持科学, 2011,9(5):79-85.
- [9] Hufford K M, Mazer S J, Schimel J P. Soil heterogeneity and the distribution of native grasses in California; Can soil properties inform restoration plans[J]. *Ecosphere*, 2014, 5(4):244-253.
- [10] Miller R B, Fox G A, Penn C J, et al. Estimating sediment and phosphorus loads from streambanks with and without riparian protection[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 189:70-81.
- [11] Liu Y, Gong Y, Wang X, et al. Volume fractal dimension of soil particles and relationships with soil physical-chemical properties and plant species diversity in an alpine grassland under different disturbance degrees[J]. *Journal of Arid Land*, 2013,5(4):480-487.
- [12] Yi L, Min L, Horton R. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions[J]. *Pedosphere*, 2011,21(1):75-83.
- [13] Huang G, Zhang R. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model[J]. *Geoderma*, 2005,127(1):52-61.
- [14] Huang G, Zhang R, Huang Q. Modeling soil water retention curve with a fractal method[J]. *Pedosphere*, 2006,16(2):137-146.
- [15] Luo Y, Liu S, Fu S, et al. Trends of precipitation in Beijiing River basin, Guangdong Province, China[J]. *Hydrological Processes*, 2008,22(13):2377-2386.
- [16] Song M W, Huang P, Li F, et al. Water quality of a tributary of the Pearl River, the Beijiing, Southern China: implications from multivariate statistical analyses[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011,172(1/4):589-603.
- [17] 刘占明,陈子燊. 广东北江流域前汛期降水与全球海温及遥相关的相关性研究[J]. 地理科学, 2014,34(10):1239-1246.
- [18] Chen L, Huang Y, Peng X, et al. PBDEs in sediments of the Beijiing River, China: levels, distribution, and influence of total organic carbon[J]. *Chemosphere*, 2009,76(2):226-231.
- [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):1896-1899.
- [20] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2):362-369.
- [21] 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.
- [22] 白一茹,汪有科. 黄土丘陵区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. 农业机械学报, 2012,43(5):42-48.
- [23] 刘云鹏,王国栋,张社奇,等. 陕西4种土壤粒径分布的分形特征研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2003,31(2):92-94.
- [24] 葛东媛,张洪江,郑国强,等. 重庆四面山4种人工林地土壤粒径分形特征[J]. 水土保持研究, 2011,18(2):148-151.
- [25] 伏耀龙,张兴昌,王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012,28(5):120-125.
- [26] 魏茂宏,林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3):679-686.
- [27] 赵明月,赵文武,刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子的对比分析:以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 生态学报, 2015,35(14):1-11.
- [28] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等. 四种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014,22(6):1060-1068.
- [29] 黎建强,张洪江,陈奇伯,等. 三峡库区植物篱系统土壤颗粒分形特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持研究, 2014,21(6):129-133.
- [30] 任婷婷,王瑄,孙雪彤,等. 不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J]. 水土保持学报, 2014,28(2):123-126.
- [31] 樊兰英,郭晋平,张芸香,等. 山地河岸林土壤对硝态氮和铵态氮的截留及影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2):134-137.
- [32] 汤家喜,孙丽娜,孙铁珩,等. 河岸缓冲带对氮磷的截留转化及其生态恢复研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(8):1514-1520.
- [33] Liu X, Li Z, Li P. Particle fractal dimension and total phosphorus of soil in a typical watershed of Yangtze River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10):6091-6099.