

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.024.

刘一迪, 姬王佳, 李志. 陕北黄土区不同植被下深剖面土壤的分形特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 250-256, 264.

Liu Yidi, Ji Wangjia, Li Zhi. Soil Fractal Characteristics of Deep Profiles Under Different Vegetation in Loess Areas of Northern Shaanxi, China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 250-256, 264.

陕北黄土区不同植被下深剖面土壤的分形特征

刘一迪, 姬王佳, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]探究不同植被下深剖面土壤分形特征及其与土壤理化性质和水力学参数的关系,为植被恢复和农业生产提供重要的参考依据。[方法]以陕西省神木六道沟流域为研究区域,采集该区域 4 种植被(草地、杏树、油松、柠条)下 >13 m 深剖面土壤样品,测定土壤颗粒组成、含水率以及有机碳含量等,计算土壤分形维数,分析不同植被下深剖面土壤的分形特征。[结果](1) 该区土壤黏粒、粉粒及砂粒含量分别为 15%, 40% 和 45%, 不同植被下土壤颗粒组成的差异显著 ($p < 0.05$)。 (2) 整个剖面上 4 个样地的分形维数无显著差异 ($p > 0.05$), 在 1—2 m 土层深度内, 植被类型对土壤分形维数的影响显著 ($p < 0.05$), 且油松及草地样地的分形维数大于其他两个样地。 (3) 土壤分形维数与黏粒含量及土壤水力参数 (θ_r , n 和 K_{sat}) 的相关性显著 ($p < 0.05$), 但与有机碳和含水率相关性不显著 ($p > 0.05$)。 [结论] 土壤分形维数主要受土壤细小颗粒影响, 且对土壤水力性质具有一定的指示作用, 油松及草地对土壤结构改善作用最佳。

关键词: 黄土区; 分形维数; 土壤理化性质; 水力学参数

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0250-07

Soil Fractal Characteristics of Deep Profiles Under Different Vegetation in Loess Areas of Northern Shaanxi, China

Liu Yidi, Ji Wangjia, Li Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the fractal characteristics of deep profile soil under different vegetation types and their relationship with soil physicochemical properties and hydraulic parameters, and to provide important reference basis for vegetation restoration and agricultural production. [Methods] Shenmu Liudaogou watershed in Shaanxi Province was taken as the research area. Soil samples with a depth of >13 meters were collected from four vegetation types (grassland, apricot, pine, and peashrub) in the area. Soil particle composition, moisture content, and organic carbon content were measured. Soil fractal dimension was calculate, The fractal characteristics of deep profile soil under different vegetation types analyzed. [Results] (1) The soil clay, silt, and sand contents in this area are about 15%, 40%, and 45%, respectively, and the differences in soil particle composition under different vegetation were significant ($p < 0.05$). (2) The fractal dimension of the four sample plots did not differ significantly ($p > 0.05$) throughout the profile, and the effect of vegetation type on soil fractal dimension was significant ($p < 0.05$) in the depth of 1~2 m. (3) The fractal dimension of the pine and grassland was greater than the other two sample plots. In addition, soil fractal dimension is significantly correlated with clay content and soil hydraulic parameters (θ_r , n and K_{sat}) ($p < 0.05$), but not with soil organic carbon and soil moisture content ($p > 0.05$). [Conclusion] Soil fractal

收稿日期: 2023-03-26

修回日期: 2023-11-04

资助项目: 国家自然科学基金“黄土区潜水补给的方式、速率与控制因素”(42071043)

第一作者: 刘一迪(1999—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水文学。E-mail: 61d@nwafu.edu.cn

通信作者: 李志(1978—), 男, 山东临沂人, 博士, 教授, 主要从事旱区水循环与水环境演变机理与调控方面的研究。E-mail: lizhibox@nwafu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

dimension is mainly influenced by soil fine particles, and is indicative of soil hydraulic properties. Pine and grassland have the best effect on soil structure improvement. This study has important implications for the sustainable use and management of vegetation and water resources in dryland areas.

Keywords: loess area; fractal dimension; soil physicochemical properties; hydrodynamic parameter

土壤是由固、液、气三相组成,具有分形特征的分散多孔体系^[1]。其中,固相物质由大小不同的单个土壤颗粒构成,这些土壤颗粒大小的分布,即土壤颗粒组成是土壤的基本物理性质之一,对土壤的物理、化学和生物特性均具有较大影响^[2]。随着分形理论不断发展,土壤分形维数已成为传统土壤颗粒组成统计的重要补充,研究表明其可以表征粒径的大小和组成特征、反映土壤质地的均一性程度、土壤肥力以及土壤的退化程度^[3-6],因此被广泛应用于表征土壤基质、预测土壤物理过程和量化土壤空间变异性的研究中^[7-8]。

近年来,有关研究多侧重于探讨不同植被类型下土壤分形维数的差异,分析植被变化对土壤结构的影响。例如,与农地与草地相比,林地的土壤分形维数较高^[9-11],其中天然次生林的土壤分形维数大于人工林^[12]。黄土高原由于水土流失严重,在 20 世纪 90 年代实施了退耕还林还草工程,大量农田被转化为林地或草地。基于此,许多研究人员探究了植被类型对土壤理化性质产生的影响(例如土壤水分、土壤有机碳以及土壤酶活性等)^[13-14],同时也分析了不同植被下土壤的分形特征^[15]。然而,由于深剖面采样的成本较高且费时费力,目前研究多聚焦于浅层土壤(0—30 cm),难以探究深根植物(例如杏树、柠条等)对深剖面土壤分形特征的影响,特别是在非饱和带深厚且土地利用变化显著的黄土高原地区。

因此,本文以陕北黄土区—神木六道沟流域为研究区域,分析不同植被下深剖面(>13 m)土壤颗粒组成特征,计算质量分形维数,并进一步探讨其与土壤水、碳含量以及水力学参数的关系,以期对旱区植被恢复和合理配置以及生态环境的可持续管理提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省北部神木市六道沟流域(图 1)。该区属中温带半干旱气候,年均气温为 8.4℃,年均降水量为 437.4 mm,其中 80% 的降水量集中在 7—9 月^[16-17]。该区土壤以砂质壤土为主^[18],土壤容重、田间持水量和萎蔫点分别为 1.42 g/cm³, 13% 和 3%。自 20 世纪 90 年代以来,国家开始推行“退耕还

林还草”政策,该区大面积农地转变为草地、杏树(*Armeniaca sibirica* var. *pubescens* Kost)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr)和柠条(*Caragana korshinskii* Kom)等植被类型,其中灌丛和林地具有更发达的根系^[19-20],对陆地生态系统的水文和生物地球化学循环过程产生重要影响。

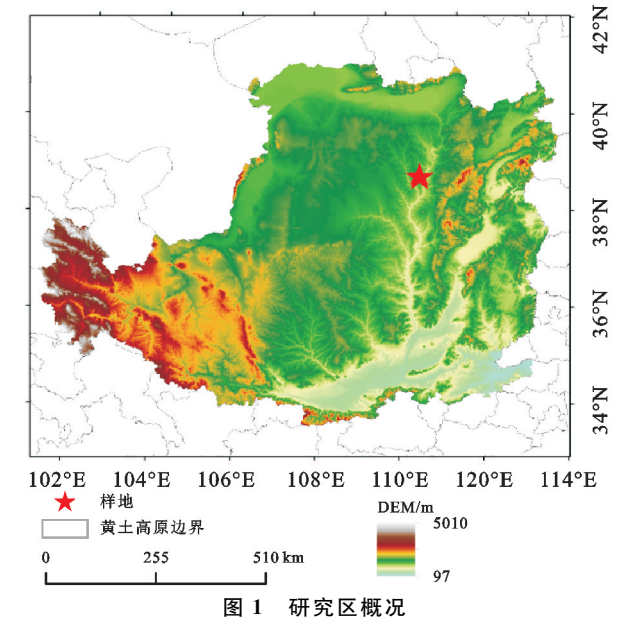


图 1 研究区概况

Fig. 1 Geographical location of the study region

1.2 样品采集与分析

选择典型植被类型,采集>13 m 深剖面土壤样品,包括草地(CD)、杏树(XS)、油松(YS)和柠条(NT)(表 1)。4 种植被类型的样地彼此相邻(<200 m),具有相似的气候和水文地质条件;此外,深厚黄土层质地均一,我们前期一项研究也发现同一土地利用类型下 5 个土壤水分剖面相似^[21]。因此,我们认为不同剖面的差异仅来自土地利用变化的影响。人工打钻取土,每 20 cm 收集一次土样。在采样现场,土钻最下方土壤样品装于铝盒用于测定土壤质量含水率,剔除土钻上方 1/3 土壤后,将剩余土样迅速装于聚乙烯塑料瓶密封保存,用于实验室分析测定。

土壤含水率采用烘干法测定。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化法测定。土壤颗粒组成采用吸管法测定;利用 H₂O₂ 和 HCl 去除过 1 mm 筛的风干土样中的有机质与碳酸盐,再利用六偏磷酸钠使其充分分散,于特定时间在给定深度吸取定量悬液烘干、称重,计算不同粒径土壤颗粒的百分比。本研究采用美国土壤

质地分类标准:黏粒(clay, 0~0.002 mm)、粉粒(silt, 0.002~0.05 mm)以及砂粒(sand, 0.05~2 mm)。

表1 采样点概况

Table 1 Basic information of sampling points

植被类型	草地	杏树	油松	柠条
深度/m	18	13.8	15	14.2
树龄/a	15	25	25	35
生长密度/(棵·hm ⁻²)	/	750	750	1200
地理位置	38°47'51"N 110°22'18"E	38°47'50"N 110°22'17"E	38°47'36"N 110°21'15"E	38°47'33"N 110°21'21"E

1.3 深剖面土壤分形特征

分形维数可表征土壤粒径大小和组成特征,反映土壤质地的均一程度,并可作为一种新参数成为传统土壤质地粒径统计的重要补充。土壤分形维数越小,土壤结构越松散,通透性越好;土壤分形维数越大,土壤结构越紧实,通透能力越弱。本研究区域位于黄土高原,降水少,水土流失严重,因此对于本研究而言,土壤分形维数越大,土壤的结构更加稳定。1983年Mandelbrot^[22]提出分形几何的概念,Tyler在此基础上建立了三维空间的体积分维模型。然而,受客观条件限制,我们无法直接获得土壤颗粒体积及数量。因此,假设不同土壤粒级具有相同密度,Tyler^[1]和杨培岭^[4]等用土壤质量代替土壤体积,对体积分维模型进行修改,提出土壤颗粒粒径分布的质量分形维数模型:

$$\frac{M(\delta < R)}{M_0} = \left[\frac{R}{R_L} \right]^{3-D} \quad (1)$$

式中: D 为质量分形维数; $M(\delta < R)$ 为粒径 $<R$ 的累积土壤质地质量; M_0 为各粒级土壤质地体积之和; R 为所选粒级土壤质地粒径; R_L 为最大粒级土壤质地粒径。

1.4 土壤水力学参数

土壤水力参数是土壤水运动和溶质迁移模拟过程中所需的重要参数^[23],但其大多需要采集原状土,深剖面土壤无法直接测定。因此,多采用数学方法进行估算。另外,分形理论已被广泛用于估算土壤水力学参数,也常被用于研究土壤物理性质与土壤水力性质的关系。本研究中土壤水力参数由Rosetta模型^[24]进行估算,选取等级为第三级,即输入土壤砂粒—粉粒—黏粒含量和容重数据。其中土壤容重(BD)计算公式如下:

$$BD = \frac{100}{\frac{OM}{0.244} + \frac{100-OM}{1.64}} \quad (2)$$

式中:BD为土壤容重(g/cm³);OM为土壤有机质含量(g/cm³)。

Rosetta程序可估算Van-Genuchten模型参数及饱和导水率,表达式分别如下:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |h|)^n]^m} \quad (3)$$

$$K(h) = K_{sat} \frac{\{1 - (\alpha \cdot h)^n - 1 [1 + (\alpha \cdot h)^n]^m\}^2}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (4)$$

式中: $\theta(h)$ 为土壤吸力 $=h$ (kPa)时对应的土壤体积含水量(cm³/cm³); θ_s 为土壤饱和含水量(cm³/cm³); θ_r 为土壤残余含水量(cm³/cm³); α 为尺度参数,与土壤通气性相关性较强(1/kPa); m 和 n 均为形状参数,两者默认关系为: $m=1-n^{-1}$; K_{sat} 为饱和导水率(cm/d)。

2 结果与分析

2.1 深剖面土壤颗粒组成与分形维数

土壤颗粒组成均表现为粉粒和砂粒含量较高,而黏粒含量相对较低,说明该区土壤类型以壤土为主。4个样地土壤颗粒组成差异显著。土壤黏粒含量表现为油松(17.2%)>柠条(15.9%)>杏树(15.2%)>草地(14.3%),变异系数介于26%~48%;粉粒含量表现为草地(50.2%)>杏树(46.8%)>油松(38.1%)>柠条(33.8%),变异系数介于24%~43%;砂粒含量表现为柠条(50.4%)>油松(44.7%)>杏树(38.0%)>草地(35.5%),变异系数介于26%~38%(表2)。整体而言,土壤颗粒组成均属于中等变异。另外,土壤颗粒组成在垂直方向上也波动较大(图2),土壤黏粒与粉粒含量均在0—2 m波动较大,柠条地的黏粒和粉粒含量明显低于其他样地,而砂粒含量则高于其他样地;除杏树地外,其他3个样地的黏粒含量均在2—5 m相对稳定,油松地的粉粒和砂粒含量变化较为剧烈,且粉粒含量低于其他3个样地;4个样地的黏粒含量在5—10 m变化幅度较小,柠条地的粉粒含量显著低于其他3个样地,而砂粒含量显著高于其他3个样地;10 m以下,除杏树地外,其他3个样地的颗粒组成均基本趋向稳定。

4个样地土壤质量分形维数的大小依次为:油松(2.74)>柠条(2.72)≈杏树(2.72)≈草地(2.72)。不同植被下土壤分形维数在不同深度的差异不同:4个样地的分形维数在0—1 m差异不显著($p>0.05$);在1—2 m等4个样地有显著差异($p<0.05$),表现为油松(2.78)>草地(2.72)>杏树(2.71)>柠条(2.66);杏树、油松和柠条地的分形维数在2—5 m均小于草地(2.74);在5—10 m表现为油松(2.74)>柠条(2.73)>杏树(2.70)≈草地(2.70),但差异并不显著($p>0.05$);杏树、油松和柠条地的分形维数在10 m以下均明显大于草地(2.67)(表3)。

表 2 神木六道沟流域各样地土壤剖面
土壤颗粒组成统计特征

Table 2 Statistical characteristics of soil particle
composition in various soil profiles

in Shenmu Liudaogou Basin		%			
粒级	指标	草地	杏树	油松	柠条
黏粒	最小值	5.9	5.6	7.3	5.8
	最大值	25.3	40.2	38.4	27.2
	平均值	14.3	15.2	17.2	15.9
	变异系数	52.0	52.0	34.0	31.0
粉粒	最小值	13.4	10.8	9.5	5.1
	最大值	73.9	58.9	59.1	62.2
	平均值	50.2	46.8	38.1	33.8
	变异系数	28.0	24.0	35.0	44.0
砂粒	最小值	17.3	22.2	25.4	31.0
	最大值	78.0	77.0	73.5	78.3
	平均值	35.5	38.0	44.7	50.4
	变异系数	37.0	26.0	32.0	30.0

2.2 深剖面土壤水、碳含量以及水力学参数

4 个样地土壤水分含量(SMC)差异显著($p<0.05$), 平均土壤含水量的大小依次为草地(14.13%)>杏树(11.07%)>沙柳(9.52%)>柠条(5.72%)。各样地的

土壤含水率在垂直方向上的变化趋势有所不同(图 3):在 0—2 m 土层深度内,4 个样地的土壤水分均变化剧烈,草地样地与杏树样地的土壤水分呈减少趋势,而油松样地与柠条样地呈增加趋势;2—5 m 土层深度内,除油松样地以外的其他 3 个样地变化幅度较小;5 m 以下土层深度内,土壤水分含量均基本呈增加趋势;3 种深根植物样地的土壤水分含量基本均小于草地样地的土壤水分含量,同时深根植物的年龄对土壤水分含量也有一定影响,树龄越大,其土壤水分含量越低。4 个样地的土壤有机碳含量(SOC)差异不显著,均在 0—1 m 土层深度内明显减少,1 m 以下土壤有机碳含量较低,且基本稳定。

表 3 神木六道沟流域各样地不同土层深度分形维数

Table 3 Fractal dimension of different soil depths in various sites in Shenmu Liudaogou Basin

土层深度/m	草地	杏树	油松	柠条
0—1	2.74a	2.75a	2.73a	2.72a
1—2	2.72a	2.71b	2.78a	2.66c
2—5	2.74a	2.71a	2.73a	2.72a
5—10	2.70a	2.70a	2.74a	2.73a
10—13	2.67a	2.75a	2.73a	2.73a
全剖面	2.72a	2.72a	2.74a	2.72a

注:同列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

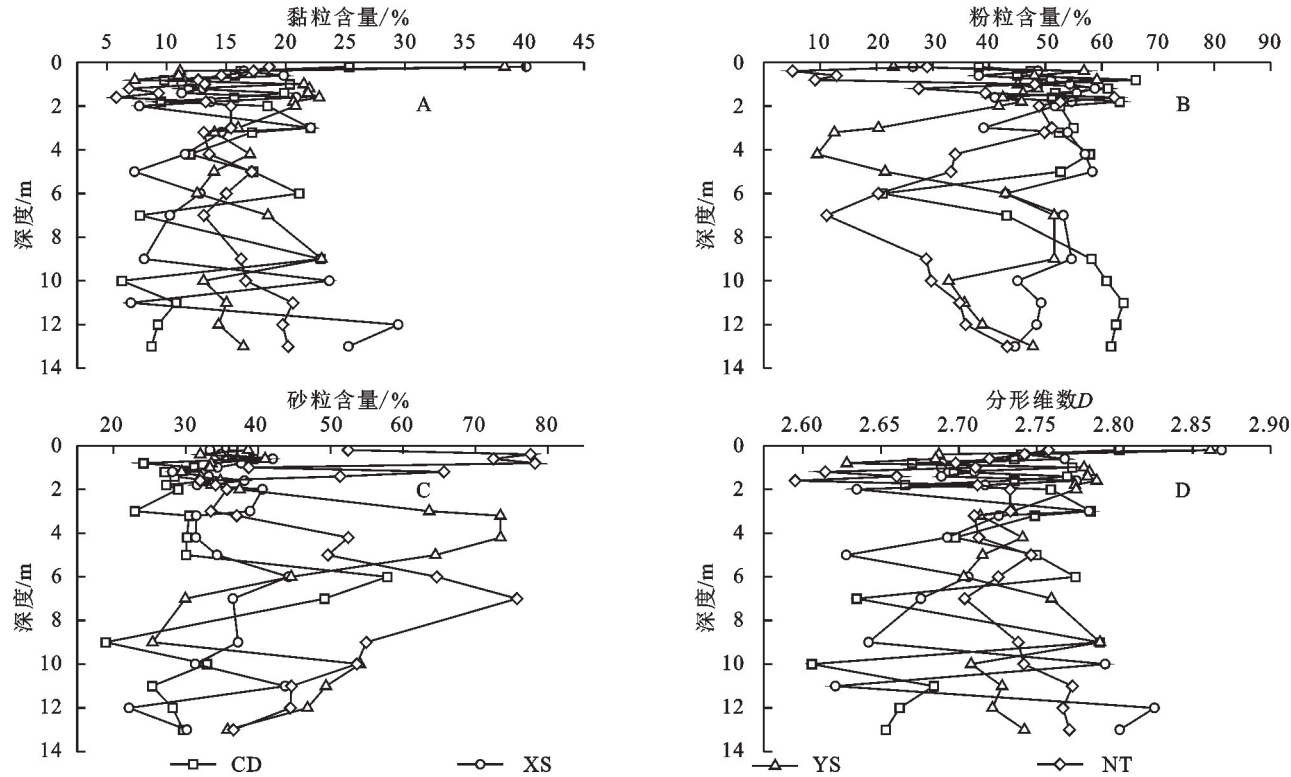


图 2 4 种植被下土壤颗粒组成及质量分形维数剖面

Fig. 2 Soil particle composition and mass fractal dimensional profile under four vegetation types

利用 Rosetta 模型估算得出的各样地土壤水力参数,4 个样地的土壤水分特征曲线(VG 模型)参数除 θ_r 以外的其余 3 个参数均有显著差异($p<0.05$), 其垂直方向上的剖面特征分别为(图 3):在 0—2 m

土层深度内,4 个样地的 θ_r 变化较剧烈,柠条样地的 θ_r 明显小于其余 3 个样地,除柠条样地以外,其余 3 个样地 α 的变化幅度均较小;2—6 m 土层深度内草地样地的 θ_r 明显大于其余 3 个样地,4 个样地的 θ_r 大

小为草地>杏树>柠条>油松;而在2—4 m土层深度内,油松样地 α 的变化剧烈,其余3个样地较为稳定;4—10 m土层深度内,各样地 α 的变化幅度均较为剧烈,柠条样地的 α 大小明显大于其余3个样地;6—11 m土层深度内,草地样地与杏树样地的 θ_r 变化幅度较其余两个样地强烈,四样地均呈增加的趋势,且柠条样地小于其余3个样地;在11 m以下,杏树样地 θ_r 的变化依旧较为剧烈,其余3个样地的 θ_r 大小为柠条>油松>草地,且仅草地的 α 大小趋于稳定,其余三样地 α 变化依旧较为剧烈。柠条样地的 n 在整体上小于其余

3个样地;除柠条样地外的其他3个样地 n 的大小在6 m以下土层深度的变化均较为剧烈。

4个样地的土壤饱和导水率(K_{sat})差异性并不显著($p>0.05$),垂直方向上的变化情况为(图3):在0—1 m土层内,均呈增加趋势;而在2—5 m土层深度内,草地样地的 K_{sat} 基本稳定,且小于其余3个样地,柠条样地保持下降趋势,其余两个样地 K_{sat} 增加;5—10 m土层深度内,除油松样地基本稳定外,其余3个样地均先明显增大后减小;10 m以下土层深度内柠条样地与油松样地的 K_{sat} 基本稳定,草地样地和杏树样地的变化幅度较大。

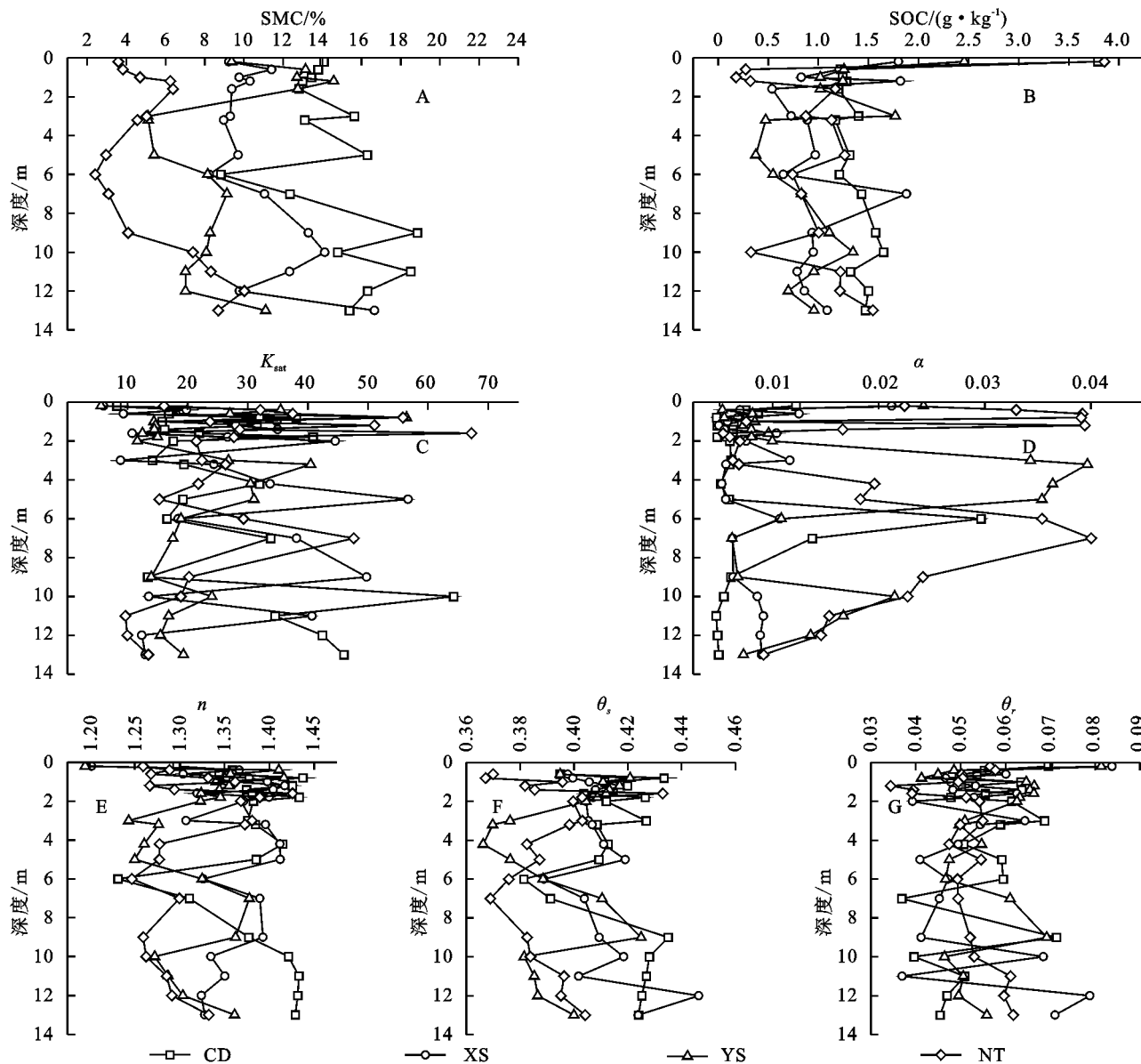


图3 4种植被下土壤物理性质和水力参数剖面

Fig. 3 Soil physical properties and hydraulic parameters profiles under four vegetation types

3 讨论

3.1 土壤分形维数与土壤理化性质的关系

土壤分形维数可在一定程度上反映土壤质地的

均一程度,也可表征土壤属性和肥力及土壤退化程度,还对土壤理化性质具有一定影响。土壤分形维数与土壤理化性质之间的相关性分析(表4)表明土壤分形维数受黏粒含量影响最大,呈极显著正相关($p<$

0.001),黏粒含量越高,分形维数越大。但分形维数与土壤粉粒和砂粒含量无显著相关关系,与前人研究结果略有不同。丁敏等^[10]研究发现土壤分形维数大小主要由黏粒决定,且与黏粒和细粉砂含量正相关,与粗粉砂与砂粒含量负相关,说明分形维数并非对所有粒级的土壤颗粒含量变化均有明显响应。但整体而言,土壤颗粒组成的分形维数随土壤质地变细而增加,随砂粒含量增加而减少。

表 4 土壤分形维数与理化性质的相关性分析
Table 4 Fractal dimension of different soil depths in various sites in Shenmu Liudaogou Basin

土壤理化性质	草地	杏树	油松	柠条
土壤含水量	-0.076	0.247	0.354	0.236
土壤有机碳含量	0.144	-0.138	0.507 *	0.104
黏粒	0.951 **	0.843 **	0.965 **	0.857 **
粉粒	-0.256	-0.309 *	-0.051	-0.362 *
砂粒	-0.273	-0.169	-0.370	-0.079
θ_r	0.946 **	0.770 **	0.966 **	0.946 **
θ_s	0.171	-0.004	0.664 **	0.066
α	0.289	0.256	-0.298	-0.033
n	-0.831 **	-0.805 **	-0.745 **	-0.177
K_{sat}	-0.730 **	-0.815 **	-0.206	-0.579

注: * 表明在 $p < 0.05$ 水平上极显著相关; ** 表明在 $p < 0.01$ 水平上极显著相关。

神木市 4 个样地中仅油松样地整个剖面内的土壤分形维数与土壤有机碳含量、柠条样地的土壤分形维数与土壤含水率有显著相关性($p < 0.05$),其余样地的土壤分形维数与土壤含水率、有机碳含量均无显著相关性($p > 0.05$)。这与罗雅曦等^[25]以及单桂梅等^[26]的研究结果一致,土壤分形维数对土壤养分指示作用可能具有很强的空间特异性,研究的尺度不同结论不同。在本研究区中土壤颗粒组成并不是影响土壤水、碳含量的主要因素,土壤分形维数与土壤水、碳含量的关系有待进一步加以验证。此外,本研究中 4 个样地的土壤分形维数与 θ_r 均呈显著正相关,与 n 呈显著负相关;除油松样地以外,其余 3 个样地的土壤分形维数与 K_{sat} 呈显著负相关,因此在该研究区,土壤分形维数对土壤水力性质有一定的指示作用。

3.2 植被变化对土壤分形维数的影响

土壤分形维数是描述土壤颗粒几何形状的参数^[27],反映土壤颗粒填充土壤孔隙的能力,常被用来反映土壤质地、均一程度、物理性状及肥力特征^[28-29]。一般而言,土壤分形维数越小,土壤结构越松散,通透性越好;土壤分形维数越大,土壤结构越紧实,通透能力越弱,同时土壤胶体越丰富,吸附性能越强,土壤吸附养分也越丰富。本研究区域位于水土流失严重的黄土高原,因此对于本研究而言,土壤分形维数越大,

土壤的结构更加稳定。本研究中,由于植被覆盖、根系生物量及其生长条件等影响,4 种植被下的土壤分形维数在整个剖面上草地的土壤分形维数小于其他 3 个样地,但并不存在显著差异。

不同土层深度,4 个样地的土壤分形维数大小关系有所不同:由于 0—1 m 深度土壤受人为干扰等其他因素影响较强,且各植被类型的土壤分形维数大小差异并不显著,植被类型对土壤分形维数大小的影响不明显;在 1—2 m 土层内,油松与草地样地的土壤分形维数明显大于其他两个样地,且存在显著差异,说明该土层深度油松与草地对土壤结构的改善作用较柠条与杏树较强;2 m 以下土层内各样地土壤分形维数大小无显著差异,植被类型对土壤分形维数并无显著影响。

4 结 论

黄土区退耕还林引起的植被类型的改变对土壤分形维数的影响明显,油松及草地对土壤有较好的改善作用,可以增加土壤的稳定性以减少水土流失,可能是研究区改善土壤结构的最佳选择。另外,土壤分形维数大小与黏粒含量及部分土壤水力参数有显著相关性,而与粉粒、砂粒含量以及土壤有机碳含量、含水率的相关性并不显著。研究结果表明,分形理论可用于描述不同植被类型下土壤剖面的结构特征,分形维数对土壤水力性质有一定的指示作用。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil Physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[3] 李国旗,赵盼盼,邵文山,等.封育对荒漠草原沙芦草群落土壤粒径分形维数及理化性质的影响[J].草地学报,2018,26(3):551-558.

Li G Q, Zhao P P, Shao W S, et al. Effects of fencing on soil particle size fractal dimension and the physico-chemical properties of *Agropyron mongolicum* community in desert steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018,26(3):551-558.

[4] 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.

Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. Chinese Science Bulletin, 1993,38(20):1896-1899.

[5] Wang X T, Sun L, Zhao N N, et al. Multifractal dimensions

- of soil particle size distribution reveal the erodibility and fertility of alpine grassland soils in the Northern Tibet Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2022,315:115145.
- [6] 陈宇轩,张飞岳,高广磊,等.科尔沁沙地樟子松人工林土壤粒径分布特征[J].干旱区地理,2020,43(4):1051-1058.
Chen Y X, Zhang F Y, Gao G L, et al. Soil particle size distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in the Horqin Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2020,43(4):1051-1058.
- [7] 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.
- [8] 刘茜雅,王海兵,左合君,等.苏宏图戈壁沉积物分形空间变异性及其成因[J].干旱区地理,2021,44(1):168-177.
Liu X Y, Wang H B, Zuo H J, et al. Fractal spatial variability and its genesis of sediments in Suhongtu Gobi[J]. Arid Land Geography, 2021,44(1):168-177.
- [9] 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 T, Jing H, Yao X, 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.
- [10] 丁敏,庞奖励,刘云霞,等.黄土高原不同土地利用方式下土壤颗粒体积分形特征[J].干旱区资源与环境,2010,24(11):161-165.
Ding M, Pang J L, Liu Y X, et al. Fractal characteristics of soil particle volume size distribution under different land use on the Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(11):161-165.
- [11] 董智今,展秀丽,丁小花.毛乌素沙地西南缘不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J].水土保持研究,2022,29(3):43-48,56.
Dong Z J, Zhan X L, Ding X H. Fractal features of soil particles under different land uses in the southwestern edge of the Mu Us sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):43-48,56.
- [12] 杨慧玲,高鹏,王华伟,等.大黑山生态修复区不同植被类型土壤颗粒的分形特征[J].中国水土保持科学,2009,7(5):52-57.
Yang H L, Gao P, Wang H W, et al. Characteristics of soil particles fractal dimension under different forest stands of the ecological restoration area in Dahei Mountain Area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(5):52-57.
- [13] Xu H W, Qu Q, Chen Y H, et al. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2021, 196:104812.
- [14] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009,19(6):707-718.
- [15] Xiao L, Xue S, Liu G B, et al. Fractal features of soil profiles under different land use patterns on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2014,6(5):550-560.
- [16] Hu W, Shao M A, Wang Q J, et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses[J]. Geoderma, 2009,149(3/4):355-366.
- [17] Ji W J, Huang Y N, Shi P J, et al. Recharge mechanism of deep soil water and the response to land use change in the loess deposits[J]. Journal of Hydrology, 2021,592:125817.
- [18] 高照良,穆兴民.黄土水蚀风蚀交错区土地利用/覆被时空变化研究:以陕西省神木县六道沟流域为例[J].水土保持学报,2004,18(5):146-150.
Gao Z L, Mu X M. Spatio-temporal change of land use/coverage in loess wind-water erosion crisscross region: Take Liudaogou watershed as example[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004,18(5):146-150.
- [19] Li H J, Si B C, Wu P T, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess[J]. Hydrological Processes, 2019,33(2):320-327.
- [20] Tong Y P, Wang Y Q, Song Y, et al. Spatiotemporal variations in deep soil moisture and its response to land-use shifts in the Wind-Water Erosion Crisscross Region in the Critical Zone of the Loess Plateau (2011—2015), China[J]. Catena, 2020,193:104643.
- [21] Huang Y N, Chang Q R, Li Z. Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China[J]. Science of the Total Environment, 2018(628/629):443-452.
- [21] Huang Y N, Chang Q R, Li Z. Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China[J]. Science of the Total Environment, 2018,628:443-452.
- [22] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature[M]. Updated and Augm. New York: W. H. Freeman, 1983.
- [23] 王艳艳.子牙河流域土壤结构分形与其水力性质关系研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
Wang Y Y. Study on the relationship between fractal of soil structure and hydraulic properties in Ziya River Basin[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.

- sis of water pollution[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 209: 1941-1947.
- [19] Liu K L, Lin T, Zhong T T, et al. New methods based on a genetic algorithm back propagation(GABP) neural network and general regression neural network (GRNN) for predicting the occurrence of trihalomethanes in tap water[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 870: 161976.
- [20] 冯汉中, 杨淑群, 刘波. 支持向量机(SVM)方法在气象预报中的个例试验[J]. *四川气象*, 2005, 25(2): 9-12.
Feng H Z, Yang S Q, Liu B. A case study of support vector machine(SVM) method in meteorological forecast[J]. *Journal of Sichuan Meteorology*, 2005, 25(2): 9-12.
- [21] Okcu D, Pektas A O, Uyumaz A. Creating a non-linear total sediment load formula using polynomial best subset regression model[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 539: 662-673.
- [22] 张智韬, 韩佳, 王新涛, 等. 基于全子集-分位数回归的土壤含盐量反演研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 142-152.
Zhang Z T, Han J, Wang X T, et al. Soil salinity inversion based on best subsets-quantile regression model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 142-152.
- [23] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
Zhu L Y. Remote sensing monitoring and assessment of water quality for lakes[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [24] 徐红敏. 基于支持向量机理论的水环境质量预测与评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Xu H M. Study on the prediction and assessment methods of water environment quality based on support vector machines theory[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [25] 徐敏. 基于复杂性理论的河湖环境系统模型研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
Xu M. Research of water environmental system models based on complexity theory[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [26] 王渤权, 金传鑫, 周论, 等. 基于长短期记忆网络的西丽水库水质预测[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(6): 64-70.
Wang B Q, Jin C X, Zhou L, et al. Water quality prediction for Xili reservoir based on long-short term memory[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(6): 64-70.
-
- (上接第 256 页)
- [24] Schaap M G, Leij F J, van Genuchten M T. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 251(3/4): 163-176.
- [25] 罗雅曦, 刘任涛, 张静, 等. 腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 525-535.
Luo Y X, Liu R T, Zhang J, et al. Soil particle composition, fractal dimension and their effects on soil properties following sand-binding revegetation within straw checkerboard in Tengger Desert, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 525-535.
- [26] 单桂梅, 张春平, 刘霞, 等. 沂蒙山区小流域坡耕地土壤颗粒结构与养分退化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(5): 76-82.
Shan G M, Zhang C P, Liu X, et al. Grain structure and nutrient degradation characteristics of soil from small watershed's sloping lands in Yimeng mountainous areas[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(5): 76-82.
- [27] 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.
- [28] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4): 490-497.
Huang G H, Zhan W H. Fractal property of soil particle size distribution and its application[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4): 490-497.
- [29] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 74-78.
Dang Y A, Li S Q, Wang G D, et al. Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(9): 74-78.