

水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征

郑晓岚^{1,2}, 杨玲^{1,2}, 宋娇^{1,3}, 鲍玉海¹, 李进林^{1,2}, 贺秀斌¹

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331)

摘要:颗粒组成作为土壤的基本物理特性,对土壤结构、力学性质、肥力特征等均有明显影响。降雨径流、波浪和重力等多重营力作用下的消落带土壤侵蚀过程导致表层土壤颗粒发生了重新分布。为了研究水库消落带土壤颗粒组成的空间分异特征,以三峡水库典型消落带为研究对象,在不同海拔位置分别采集了 0—10 cm 和 10—20 cm 层的土壤用于测定颗粒组成,并利用分形理论计算出体积分形维数。结果表明:(1) 三峡水库消落带土壤颗粒组成以粉粒为主,占总体积的 72.6%~86.5%,且随着海拔的增加而升高;从不同土层深度来看,0—10 cm 层黏粒含量明显低于 10—20 cm 层。(2) 消落带不同海拔位置的土壤体积分形维数具有明显异质性,且与海拔呈正相关($R^2=0.74$),而在不同土层之间具有弱变异性($C_v<2$)。(3) 体积分形维数与黏粒、粉粒含量均呈显著正相关($p<0.01$),与砂粒含量呈显著负相关($p<0.01$),且与黏粒的线性相关性最强。综上,消落带土壤颗粒组成在不同海拔存在较大差异($p<0.01$),但在土层深度上无显著差异($p>0.01$);150~160 m 海拔区间和 0—10 cm 层土壤具有明显的粗粒化现象。

关键词:土壤颗粒组成; 体积分形维数; 空间分布; 水库消落带

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0066-06

Fractal Characteristics and Spatial Variation of Soil Particle Composition in the Reservoir Riparian Zone

ZHENG Xiaolan^{1,2}, YANG Ling^{1,2}, SONG Jiao^{1,3}, BAO Yuhai¹, LI Jinlin^{1,2}, HE Xiubin¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: As the basic physical properties of soil, particle composition has obvious effects on soil structure, mechanical properties, and fertility characteristics. The periodic flooding and exposure process results in the redistribution of surface soil particles in the reservoir riparian zone. In order to study the spatial differentiation characteristics of soil particle composition, the Three Gorges Reservoir was taken as the research object and the volume-based fractal model of soil particle was evaluated. The results suggest that: (1) the soil in the reservoir riparian zone of the Three Gorges Reservoir is dominated by silt, accounting for 72.6% to 86.5% of the total volume, and it increases with the increase in altitude; from the perspective of different soil depths, the clay content in the 0—10 cm soil layer is significantly lower than that in the 10—20 cm soil layer; (2) the volumetric fractal dimension shows significant heterogeneity at different elevations, and is positively correlated with elevations ($R^2=0.74$), while the weak variability between different soil layers is found ($C_v<2$); (3) the volumetric fractal dimension has a significant positive correlation with clay and silt contents ($p<0.01$), and a significant negative correlation with sand content ($p<0.01$); the linear correlation between fractal dimension and clay is the strongest. In summary, the composition of soil particles in the reservoir riparian zone differs greatly at different elevations ($p<0.01$), but there is no significant difference in soil depth ($p>0.01$). The soil coarse-grained phenomenon is obvious in the elevation range of 150~160 m and soil layer of 0—10 cm.

收稿日期:2020-09-21

修回日期:2020-10-23

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41977075,41771321)

第一作者:郑晓岚(1997—),女,重庆奉节人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:842597583@qq.com

通信作者:鲍玉海(1981—),男,山东成武人,副研究员,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:byh@imde.ac.cn

Keywords: soil particle composition; volume fractal dimension; spatial distribution; reservoir riparian zone

土壤颗粒组成直接影响土壤结构、土壤水力特性、土壤肥力状况和土壤侵蚀程度,是重要的土壤物理特性之一,了解区域土壤粒径分布特征,可为控制土壤侵蚀过程、探索土壤特性变化、恢复退化土地生态系统提供一定的科学依据^[1-5]。定量研究土壤粒径分布特征是土壤、地质、农业、环境等学科领域研究的重要内容之一,分形理论作为土壤研究的一种有效工具,在土壤结构、土壤特性及土壤空间变异规律等方面得到广泛应用^[6-13]。其中,土壤颗粒分形维数不仅能够表征土壤颗粒分布特征和土壤质地均匀程度,还可以反映土壤侵蚀程度,土壤颗粒分形维数影响因素的诸多研究表明,分形维数与土地利用方式、植被类型、母质特征等密切相关^[3,14-19]。

大型水库消落带遭受周期性淹没一出露变化带来的极端干湿交替作用,其土地利用、植被、土壤特性在短期内发生较大变化,上述水土环境的变化和特殊的水动力条件可能导致消落带土壤表层颗粒的重新分布,进而引起土壤颗粒组成的空间变异^[20-23]。目前利用土壤颗粒分形维数探讨陆地坡面土壤性状的研究较多^[24-26],但针对紫色土尤其是周期性淹水出露过程影响下的水库消落带土壤颗粒组成特征研究较少。因此,本文以三峡水库消落带紫色土为研究对象,探讨近 10 a 来周期性淹水作用下其土壤颗粒组成空间分异,探讨土壤颗粒体积分形维数与海拔高程、土层深度、颗粒体积含量间的相关性,为消落带土壤侵蚀过程机理研究和水土保持措施优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区腹地重庆市忠县石宝镇库段(107°32′—108°14′E, 30°03′—30°35′N),地势较为平坦,呈典型的丘陵地貌。属亚热带季风气候区,年均气温 18.2℃,年均降水量 1 172.1 mm,雨热同期,降雨多集中在 5—9 月^[27]。区域内出露岩层为第四系残积土层及侏罗系中统沙溪庙组砂泥岩,主要土壤类型为紫色土,在中国土壤系统分类中属于正常新成土,为易蚀性土壤^[28]。受人为清库和初期淹水的影响,消落带现有植被以一年生和多年生草本植物为主,主要为空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)和苍耳(*Xanthium sibiricum*)等^[27]。

1.2 土壤样品采集

2016 年 9 月水库蓄水前在忠县石宝镇共和村库段选取生境类型相似的紫色土岸坡,布设样地采集土壤样品,样地内的土地利用类型在人为清库前为旱地,淹水后为以狗牙根为主的草地。为表征消落带不同海拔高程土壤所受库水压力、淹水时间和干湿循环幅度等明显的空间分异特点,本文以 5 m 为间隔,分别在 150 m,155 m,160 m,165 m,170 m,175 m 和 180 m 布设样地,每个海拔设置 3 个样地,采集上层(0—10 cm)和下层(10—20 cm)的土壤,其中以未淹水海拔高程 180 m 的土壤作为对照,样地概况见表 1。每个样地用五点采样法采集 1 kg 左右土壤样品并混合均匀,带回实验室,挑去其中的石块和粗根等杂物,自然风干后经过研磨、过筛等前处理,用于室内测试分析。

表 1 不同水位高程样地概况

高程/m	淹水	年淹水	最大淹水	主要植被 类型	覆盖度/ %	坡度/ (°)
	年限/年	时间/天	深度/m			
150	10	297	25.05	狗牙根、空心莲子草	63	5~9
155	10	257	20.05	狗牙根、空心莲子草	63	4~8
160	8	224	15.05	狗牙根、苍耳	66	4~7
165	8	172	10.05	狗牙根、马唐、苍耳	67	4~7
170	8	116	5.05	狗牙根、苍耳	69	4~7
175	6	3	0.05	狗牙根、马唐	70	3~5
180	0	0	0	狗牙根、马唐	72	3~5

注:淹水年限是指从开始三峡水库试验性蓄水(2006 年)至采样年(2016 年)的年限。

1.3 样品测定与指标计算

土壤颗粒组成采用 MasterSize 2000 型激光粒度分析仪测定,根据美国制划分标准将土壤粒径分为以下 7 个级别,0~0.002,0.002~0.05,0.05~0.1,0.1~0.25,0.25~0.5,0.5~1,1~2 mm,其中砂粒为 0.05~2 mm,粉粒为 0.002~0.05 mm,黏粒为<0.002 mm。

土壤颗粒分形维数采用体积分形维数表示^[29],将以上 7 个粒径数据带入以下公式进行计算:

$$\frac{V(r < R)}{V_T} = \left(\frac{R}{\lambda_V}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: r 为土壤颗粒粒径(mm); R 为某区间的代表粒径,通常用该区间上下限的算术平均值表示; $V(r < R)$ 表示为粒径小于 R 的累计体积; V_T 为土壤颗粒的总体积(%); λ_V 为所有粒径的上限,数值上等于最大粒径值; $V(r < R)/V_T$ 为粒径小于 R 的累积体积百分比; D 为粒径分布的体积分形维数。

公式(1)与杨培岭等^[30]及 Tyler 等^[31]所建立的质量分形维数计算公式在表达上类似,但不同的是此公式用体积代替质量,从而完美避开需做不同粒径具有相同密度的假设,使得此公式更加符合实际情况,所得结论更具说服力。

为方便计算时,两边需同时建立对数表达式,公式如下:

$$\lg \left[\frac{V(r < R)}{V_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{R}{\lambda_V} \right) \quad (2)$$

对公式(2)进行线性回归后,得到拟合的直线斜率,该斜率为公式中的 $3-D$,从而求出 D 值。

2 结果与分析

2.1 不同海拔高程上的土壤颗粒组成

由图1可知,消落带各海拔高程土壤中粉粒含量均为最高,占土壤颗粒的 72.6%~86.5%;其次是砂粒含量,含量最少的为黏粒,占比为 2.13%~3.44%。土壤黏粒、粉粒和砂粒含量在不同海拔高程上均有显著差异($p < 0.01$)。总的来看,粉粒含量与海拔高程呈正相关关系,随着海拔高程的增加,土壤粉粒含量逐渐增大,其中 150~165 m 区间增长速度较快,之后增长速度减缓;而砂粒含量与海拔高程呈负相关关系,随着海拔梯度的增加,土壤砂粒含量逐渐减小,减小速度先快后慢,其中 175 m 高程土壤砂粒含量为 150 m 高程土壤砂粒含量的 41.3%。黏粒含量与海拔梯度的关系由图1可看出,在 150~165 m 区间上,随着海拔高程的增加,黏粒含量逐渐增加,但增长幅度较小,在 165 m 黏粒含量达到最高后增长停滞,随后黏粒含量趋于平稳,变动较小。中值粒径介于 10.6~20.36,并与海拔高程呈负相关关系,随着海拔的增大,中值粒径不断减小。

未淹水对照样地(海拔 180 m)粉粒含量占比最大,占比为 88.18%;黏粒含量占比最小,为 3.65%;相较于消落带土壤,180 m 高程对照样地土壤粉粒、黏

粒含量均达到最大,分别增加 5.76%~35.10%和 1.89%~17.62%;而砂粒含量达到最小,相较于消落带土壤减少 26.38%~205.95%。同时,海拔 180 m 中值粒径最小,为 10.6。

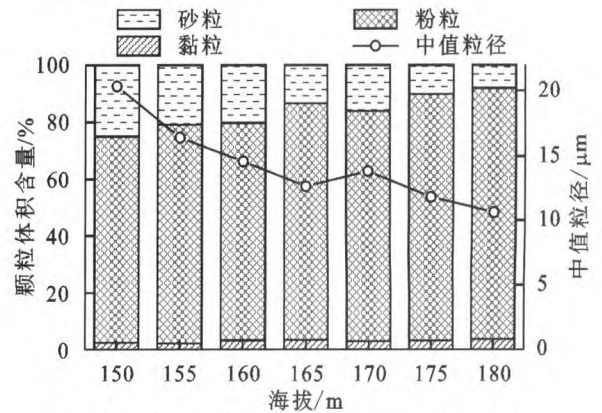


图1 不同高程土壤各颗粒体积含量分布特征

2.2 不同土层间的土壤颗粒组成

土壤颗粒体积含量在土层间无显著差异($p > 0.01$),但同一海拔高程内,0—10 cm 黏粒、粉粒含量均小于 10—20 cm 土层;0—10 cm 土层砂粒含量大于 10—20 cm 土层(图2)。从黏粒含量来看,0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤黏粒含量均在 165 m 处达到最大,分别为 3.52%与 3.61%,最小值分别出现在海拔 150 m 与 155 m 处,与最大值分别相差 58.68%与 32.01%。从粉粒含量来看,两层土壤粉粒含量均在 175 m 达到最大,分别为 86.17%与 86.87%,最小值出现在海拔 150 m 与 160 m 处,与最大值分别差 22.85%与 11.57%。与黏粒、粉粒含量相反,0—10 cm 和 10—20 cm 土层土壤砂粒含量最大值均出现在低海拔区域,分别在海拔 150 m (32.06%)与 155 m (19.93%)处,而最小含量均出现在海拔 175 m 处,与最大含量分别相差 72.43%与 62.40%。对照组 180 m 两层土壤颗粒变化规律与其他高程一致,0—10 cm 土层的黏粒、粉粒含量均小于 10—20 cm 土层的黏粒、粉粒含量,而 0—10 cm 土层的砂粒含量大于 10—20 cm 土层的砂粒含量。

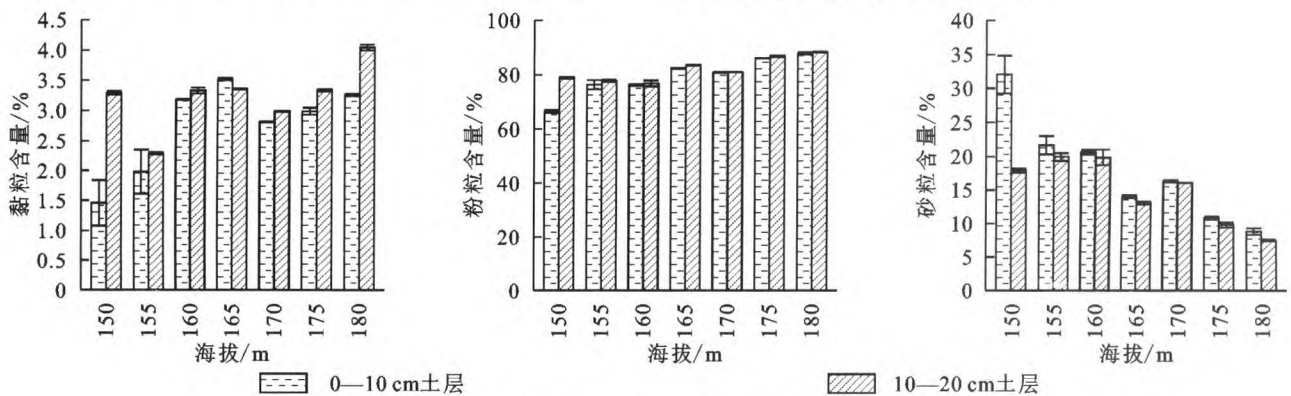


图2 0—10 cm, 10—20 cm 土层土壤各颗粒体积含量分布特征

2.3 土壤体积分形维数空间分布特征

土壤体积分形维数在不同海拔高程上具有显著差异($p=0.008<0.01$),其中 150 m 与 155 m 海拔土壤体积分形维数最小,均为 2.50;160~175 m 体积分形维数次之,介于 2.54~2.58;180 m 对照样地土壤体积分形维数最大,为 2.59。海拔高程与土壤体积分形维数的线性回归关系表明(图 3),土壤颗粒体积分形维数与海拔高程呈正相关关系,随高程增加,土壤颗粒体积分形维数呈线性上升趋势,其中 R^2 为 0.74。

0—10 cm 土层土壤颗粒体积分形维数的最小值、最大值、均值分别为 2.45,2.58,2.54,均小于 10—20 cm 土层土壤(分别为 2.51,2.60,2.56),上下两层土壤颗粒体积分形维数的变异系数分别为 1.90,1.02,均属于弱变异性,离散程度较低。可见,土壤体积分形维数在不同土层上无显著性差异($p=0.212>0.01$),即土层深度对土壤体积分形维数的影响不显著。

2.4 体积分形维数与土壤颗粒体积分数的关系

土壤颗粒体积分数与体积分形维数的线性关系见

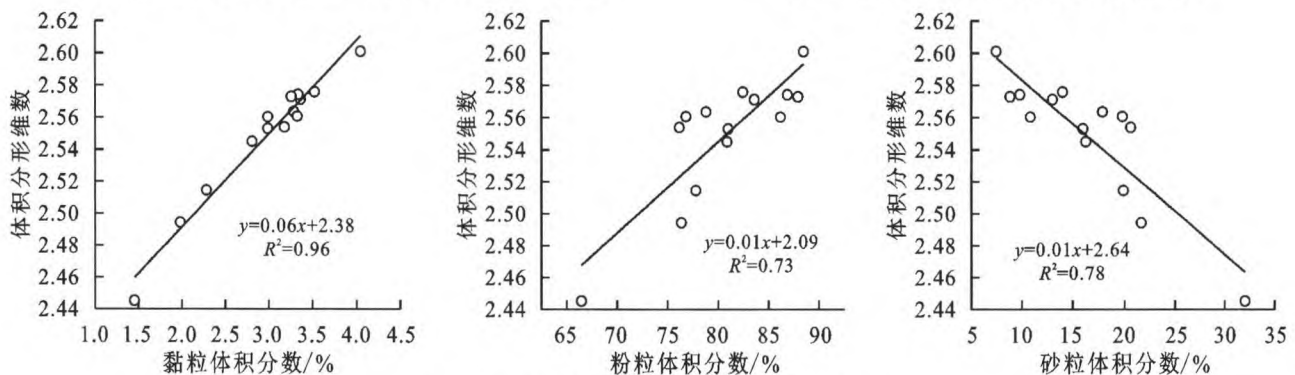


图 4 各颗粒体积分数与体积分形维数的关系

3 讨论

消落带环境的特殊性不利于保持土壤结构的稳定性,土壤颗粒组成存在明显的空间分异,总体来看,三峡水库消落带土壤颗粒组成分形维数随海拔升高而增大,最大值出现在 165 m 处(图 3),表明此海拔的土壤侵蚀程度较其他海拔更低。研究表明消落带土壤侵蚀速率的波动模式与特定水位停留时间的波动模式一致,且最低和最高海拔附近的停留时间明显长于其他海拔^[32],侵蚀强度也高于其他海拔,因此 165 m 高程上的土壤侵蚀程度较其他海拔的土壤侵蚀更小,与本研究结论相似。同时,本研究发现,体积分形维数在各海拔区间的大小依次为:160~165 m 海拔区间、170~175 m 海拔区间、150~155 m 海拔区间,即 160~165 m 海拔区间上土壤黏粒、粉粒含量最多,出现这种规律的原因可能与消落带上复合侵

图 4,结果表明,黏粒体积分数与体积分形维数呈显著正相关($p<0.01$),即随着黏粒体积分数的增加,土壤颗粒体积分形维数增大;粉粒体积分数与体积分形维数呈正相关,且正相关性极显著($p<0.01$)。而砂粒与体积分形维数呈显著负相关($p<0.01$),即随着砂粒含量增大,体积分形维数减小。在相关性强度上,黏粒与体积分形维数的线性相关性最强($R^2=0.96$),即体积分形维数对黏粒含量的变化最敏感,其次是砂粒($R^2=0.78$),粉粒与体积分形维数的线性相关性最弱($R^2=0.73$)。

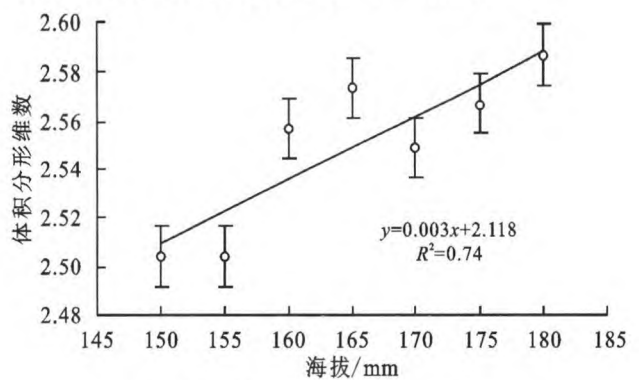


图 3 不同高程土壤颗粒体积分形维数

蚀营力下发生的搬运—沉积过程有关。消落带上部(170~175 m)主要以降雨径流侵蚀为主,其表层土壤的细小颗粒在降雨冲刷过程中被水流搬运,逐渐在消落带中部(160~165 m)沉积,使得粘、粉粒含量在消落带中部增多而在消落带上部减少;同时,消落带下部(150~155 m)淹水时间相对较长、淹水频率较高,土壤所受水位变动的影响较大,加之强烈的波浪侵蚀,易发生土壤侵蚀,导致表层细颗粒被水冲刷,随水流迁移至下游地区后逐渐沉积,导致消落带土壤颗粒组成的空间变异。

研究表明,土壤体积分形维数一定程度上可以反映水土流失的程度^[33],体积分形维数越小就越易发生水土流失。消落带样地周边区域的相关研究表明^[34],忠县石宝镇紫色土坡耕地表层 0—20 cm 土壤体积分形维数介于 2.64~2.66,均高于本研究中消落带草地表层土壤体积分形维数,同时本次研究中未淹

水区(180 m)土壤颗粒的体积分形维数大于消落带内部区域,因此可以表明消落带比周围地区更易发生水土流失,相关研究发现消落带内土壤侵蚀模数高于周围环境 16 倍^[35],水土流失程度更高,与本次研究结论相似。造成这种差异的原因可能是水库消落带与陆地环境不同,经历反复淹水过程,使得消落带原有植被消亡或减少,逐渐由多年生植被转为一年生植被,植被固土能力减弱,土壤抗侵蚀性能降低,且在周期性淹水—落干过程中受到多营力复合侵蚀^[35]、坡面泥沙输移等过程的影响,造成土壤细颗粒和营养物质大量流失,砂粒含量增多,土壤体积分形维数减小。而研究区域三峡水库消落带属于河谷气候,在暴雨和高温的作用下,土体含水量易发生饱和—不饱和—饱和的快速变化,且反复淹水改变土壤理化性质,土壤黏聚力和抗剪强度下降^[36];淹没期的波浪侵蚀、落干期的降雨径流,以及由重力或机械力控制的堤岸坍塌等不同类型的侵蚀共同作用,易造成消落带水土流失程度较其他地区更高^[37]。

土壤颗粒组成分形特征可反映土壤质地均匀程度和土壤侵蚀程度,且因土地利用类型或方式的不同而异,比如,林地、草地等非耕作土壤的体积分形维数分别为 2.783, 2.894, 低于坡耕地(2.963)等耕作土壤^[16],表明林地的土壤结构更好,主要原因为林地、草地根系发育较好,具有较好的群落结构,丰富的根系不仅有良好的固土作用,同时大量的凋落物也为微生物的生长提供养分使其分泌大量物质,促进土壤颗粒间的粘结,提高土壤结构的稳定性。而坡耕地由于长期的人为耕作导致土壤结构和植物根系遭受破坏,同时由于周期性的翻耕使得根系难以在短时间恢复,造成有机质对土壤颗粒的粘结作用不明显,因此坡耕地土壤以细颗粒为主。

4 结论

(1) 消落带表层 0—20 cm 土壤粒径以粉粒为主,占土壤颗粒的 72.6%~86.5%,其次是砂粒含量,最小的为黏粒含量;对照组 180 m 海拔高程上,粉粒含量占比最大,占比为 88.18%;黏粒含量占比最小,为 3.65%,相较于其他高程,180 m 海拔高程粉粒、黏粒含量分别增加 5.76%~35.1%和 1.89%~17.62%,砂粒含量减少 26.38%~205.95%;同时 180 m 内部土壤颗粒占比差异较大,粗化情况明显。

(2) 消落带土壤颗粒组成在海拔上的变化趋势为黏粒含量、粉粒含量与海拔梯度呈正比关系(黏粒

增长幅度较小),砂粒含量与海拔梯度大体呈反比关系,其中 175 m 高程土壤砂粒含量为 150 m 高程土壤砂粒含量的 41.3%;同时,土壤颗粒组成在不同海拔高程存在较大差异($p < 0.01$),但在土层深度上无显著差异($p > 0.01$)。

(3) 海拔高程、土层深度与土壤体积分形维数的关系为:土壤颗粒体积分形维数在不同海拔高程具有明显异质性,且与海拔高程呈正相关,总变化趋势为随着高程增加,土壤颗粒体积分形维数呈线性上升趋势($R^2 = 0.74$);不同土层之间具有弱变异性($C_v < 2$),土层深度对体积分形维数的影响不显著($p > 0.05$)。

(4) 土壤颗粒体积分形维数与黏粒、粉粒含量的关系均呈显著正相关($p < 0.01$),即随着黏粒、粉粒含量的增加,土壤颗粒体积分形维数呈线性增长趋势,而体积分形维数与砂粒含量呈显著负相关;在相关性强度上,黏粒与体积分形维数的线性相关性最强,其次是砂粒,相关性最弱的为粉粒。

参考文献:

- [1] Wei Y, Wu X, Cai C. Splash erosion of clay-sand mixtures and its relationship with soil physical properties: The effects of particle size distribution on soil structure [J]. *Catena*, 2015, 135: 254-262.
- [2] 毛东雷,蔡富艳,方登先,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J].*土壤学报*, 2018, 55(1): 88-99.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].*土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241.
- [7] 段世航,崔若然,江荣风,等.激光衍射法测定土壤粒径分布的研究进展[J].*土壤*, 2020, 52(2): 247-253.
- [8] 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.
- [9] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature* [M]. New York: Wh Freeman, 1982.
- [10] Wang J, Zhang J, Feng Y. Characterizing the spatial variability of soil particle size distribution in an underground coal mining area: An approach combining multi-fractal theory and geostatistics [J]. *Catena*, 2019, 176: 94-103.
- [11] Campbell P, Abhyankar S. Fractals, form, chance and

- dimension[J]. *The Mathematical Intelligencer*, 1978, 1(1):35-37.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 徐冰, 陈亚新, 郭克贞. 半干旱草地土壤颗粒分形维数及空间变异特征[J]. *水利学报*, 2007, 000(S1):696-700.
- [15] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤颗粒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.
- [16] 张海廷, 时延庆. 山东省不同土地利用方式土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1):126-131, 138.
- [17] 任冉冉, 夏江宝, 张淑勇, 等. 黄河三角洲贝壳堤灌草群落的土壤颗粒分形特征[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(3):48-58.
- [18] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(3):507-515.
- [19] 程先富, 赵明松, 史学正, 等. 兴国县红壤颗粒分形及其与环境因子的关系[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12):76-79.
- [20] 李姍泽, 邓玥, 施凤宁, 等. 水库消落带研究进展[J]. *湿地科学*, 2019, 17(6):689-696.
- [21] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(7):1236-1244.
- [22] Bao Y H, Gao P, He X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150:14-24.
- [23] Li J L, Bao Y H, Wei J. Fractal characterization of sediment particle size distribution in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(9):2028-2038.
- [24] 程杰, 王欢元, 解建仓, 等. 不同配比下复配土的土壤颗粒组成、分形维数与质地变化特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2):30-34.
- [25] 童春元, 李钢铁, 卢立娜, 等. 杨树低效林下土壤粒径分布与分形特征[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5):308-315.
- [26] 杜雅仙, 樊瑾, 李诗瑶, 等. 荒漠草原不同植被微斑块土壤粒径分布分形特征与养分的关系[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(11):3716-3724.
- [27] Zhang S J, Tang Q, Bao Y H, et al. Effects of seasonal water-level fluctuation on soil pore structure in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(10):107-121.
- [28] He X B, Bao Y H, Nan H W, et al. Tillage pedogenesis of purple soils in southwestern, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6(2):205-210.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Bao Y H, He X B, Wen A B. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir[J]. *Catena*, 2018, 169:128-139.
- [33] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation of soil porosity and soil water properties: I. Theory[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(5):1231-1238.
- [34] 巨莉, 文安邦, 郭进, 等. 三峡库区不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5):234-237.
- [35] 贺秀斌, 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4):160-168.
- [36] 鲍玉海, 贺秀斌. 三峡水库消落带土壤侵蚀问题初步探讨[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6):190-195.
- [37] Bao Y H, Tang Q, He X B, et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Hydrology Research*, 2015, 46(2):212-221.