

DOI: 10.5846/stxb201311272828

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素——以黄土丘陵沟壑区为例. 生态学报, 2015, 35(14): 4625-4632.

Zhao M Y, Zhao W W, Liu Y X. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: a case study in the Loess Hilly-gully area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4625-4632.

不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因素 ——以黄土丘陵沟壑区为例

赵明月^{1,2}, 赵文武^{1,2,*}, 刘源鑫^{1,2}

1 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学, 北京 100875

2 北京师范大学 资源学院, 北京 100875

摘要: 土地利用方式和环境因子是影响土壤粒径的重要因素, 尺度不同其影响效应差异明显。研究不同尺度表层土壤粒径与土地利用、环境因子的关系对评价黄土丘陵沟壑区土壤物理性质具有积极意义。选择黄土丘陵沟壑区安塞集水区和沐浴小流域作为研究区, 探讨两个尺度上表层土壤粒径含量、分布特征及其与土地利用类型和环境因子的关系。研究结果表明: (1) 研究区域内表层土壤颗粒主要为砂粒和粉粒, 在小流域和集水区尺度上, 各粒径百分含量属于中等变异, D 值为弱变异, 但随着研究区由沐浴小流域变化到安塞集水区, 粒径和 D 值的空间变异性均有所提高; (2) 尺度不同, 土地利用对土壤粒径的影响效应不同, 在沐浴小流域不同土地利用类型的砂粒含量从高到低依次为荒草地>农用地>林地>灌木林地>园地, 在集水区的变化顺序依次为荒草地>灌木林地>林地>农用地>园地, 粉粒含量的次序均与砂粒相反, 小流域土壤粒径分形维数 D 依次为灌木林地>荒草地>林地>园地>农用地, 在安塞集水区为灌木林地>荒草地>农用地>林地>园地; (3) 在沐浴小流域和安塞集水区, 土壤颗粒分形维数与土壤砂粒、黏粒百分含量呈极显著正相关关系, 与土壤粉粒百分含量呈极显著负相关关系, 且砂质壤土 D 值高于壤土和粉壤土; (4) 在沐浴小流域, 植被盖度、相对海拔和坡位相对于土地利用类型、坡向和坡度对土壤粒径影响较大; 而在安塞集水区植被盖度、土地利用类型和坡度对土壤粒径影响较大。

关键词: 土地利用; 环境因子; 土壤粒径; 分形维数; 尺度

Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: a case study in the Loess Hilly-gully area

ZHAO Mingyue^{1,2}, ZHAO Wenwu^{1,2,*}, LIU Yuanxin^{1,2}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The land use types and environmental factors have a great significance on soil particle size distribution (PSD). However the effects are different in different scales. Research on the relationship between topsoil particle size distribution and land use & environmental factors can provide a basis for assessing topsoil physical properties in loess hilly-gully area. The study was conducted in the Muyu small watershed and the Ansai catchment in the loess hilly area of the Loess Plateau in China, and the comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales were carried out. The research results showed that: (1) The topsoil in the loess hilly-gully areas of the Loess Plateau are mainly composed of sand and silt in both small watershed and catchment. The percentage of each particle size is medium spatial variability, and the spatial variability of D is far below of the particle size. But it appears clearly that the spatial variabilities

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41390462, 41171069)

收稿日期: 2013-11-27; 网络出版日期: 2014-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoww@bnu.edu.cn

are scale dependent and it increases with the increase of study area. (2) The effects of land use types on soil particle size are different at two scales. The sand content varied with land use in the order: grassland > farmland > woodland > shrub land > orchard land in the Muyu small watershed, and grassland > shrub land > woodland > orchard land > farmland in the Ansai catchment. The silt content varied with land use in the opposite order of the sand content. The D value varied with land use in the order: shrub land > grassland > woodland > orchard land > farmland in the Muyu small watershed, and shrub land > grassland > farmland > woodland > orchard land in the Ansai catchment. (3) In both Muyu small watershed and the Ansai catchment, D is very significant positive correlation with the soil sand content and clay content, significant negative correlation with soil silt content, and D value is much higher in the sandy loam than that in the loam and silt loam. (4) Vegetation cover, altitude and position have more influence on the soil particle size than other factors in the Muyu small watershed, while vegetation cover, land use, and slope influence the soil particle much more greatly in the Ansai catchment.

Key Words: land use; environmental factors; soil particle size; fractal dimension; scale

尺度是指在研究某一物体或现象时所采用的空间或时间维,往往以粒度和幅度来表达。尺度效应不仅依赖于事物的本身,而且与整个环境或背景有关^[1-4]。土壤由不同粒级土粒组成,各粒级的含量差异很大。土壤粒径分布(PSD)影响土壤的水力特性、土壤肥力状况以及土壤侵蚀等,是土壤重要的物理特性之一^[5-8]。由于成土母质、气候、地形、植被和人类干扰程度不同,不同尺度的土壤性质存在空间变异性。在较大尺度上,土壤主要受母质、气候、地形等因子的控制;在较小尺度上,主要受土壤特性、植被覆盖、微立地以及干扰的影响^[9-10]。其中,土地利用方式和环境因子是影响土壤粒径的重要因素^[11-13]。目前,国内外土壤粒径空间变异性的研究已有很多文献^[14-18],但是在不同空间尺度上讨论土壤粒径的空间分布还较为少见。从不同尺度上探讨土壤粒径的含量和空间变异性,分析表层土壤粒径含量及其与环境因子的关系,有利于从不同尺度系统把握土壤粒径的空间变异特征及影响因素。

黄土高原地区地形破碎,土地利用类型复杂多样,土壤侵蚀程度差异较大。对于该地区土壤物理性质的研究较多,但主要集中于特定区域不同土地利用类型下土壤的物理性质差异研究,而忽略不同尺度间的对比分析。本研究选择黄土丘陵沟壑区安塞集水区和集水区内的沐浴小流域,从两个尺度上分析土壤粒径与环境因子的关系,以期为黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀的防治和土地利用结构调整提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安塞集水区和沐浴小流域地处黄土高原腹地($108^{\circ}5'44''$ — $109^{\circ}26'18''$ E, $36^{\circ}30'45''$ — $37^{\circ}19'3''$ N),地形地貌复杂多样,梁峁起伏、沟壑纵横,属典型的黄土丘陵沟壑区。该区域属中温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 8.8°C ,年平均降水量 505.3 mm ,其中 74%集中在 6—9 月。集水区面积 1334.00 km^2 ,属于强度水土流失区,也是西北典型的生态环境脆弱区。土壤以黄绵土为主,约占总面积的 95%。土壤成土母质主要有黄土和洪积冲积两大类,黄土土层深厚,质地组成以粉沙为主,抗蚀能力低。沐浴小流域位于安塞县郝家坪乡,面积 1.30 km^2 ,是安塞集水区的典型小流域。该小流域地处安塞集水区中游,土地利用方式以农耕地、林地、荒草地、灌木林地为主,农耕地面积较小且分布零散,总体人为干扰较少。

1.2 土壤采样

根据土地利用、地形、土壤特征等因素,综合考虑流域水系分布与道路可达性,经实地踏勘于 2012 年 7、8 月在安塞集水区和沐浴小流域分别选取了 79、35 个采样点。每个样点内设置 5 个重复随机采样。土壤粒径采用比重计法测定。样点分布情况见图 1^[19],样点的土地利用类型和坡位分布情况见表 1。

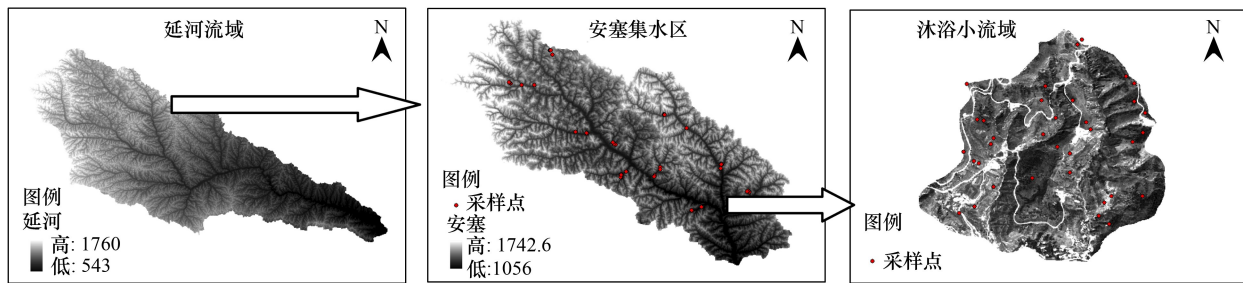


图 1 研究区位置示意和采样点分布图

Fig.1 Location of study area and the distribution of sampling sites

表 1 采样点在土地利用类型及坡位上的分布

Table 1 The distribution of sampling sites under different land use and slop positions

土地利用类型与坡位 Land use types and slope position	小流域尺度 Small watershed scale	集水区尺度 Watershed scale
灌木林地 Shrubland	4	11
林地 Woodland	13	24
园地 Orchard	1	5
荒草地 Grassland	14	24
耕地 Farmland	3	15
上坡 Upslope	10	22
中上坡 Upper slope	8	12
中坡 Middle slope	7	12
中下坡 Middle-lower slope	4	13
下坡 Down slope	6	20

1.3 分形维数计算与统计分析

杨培玲等^[20]将 Katz 的计算方法进行了改进,通过粒径分布与对应的重量分布相联系,提出了用粒径重量分布资料表征的土壤分维模型。本研究根据此模型,计算方法如下:

假定由大于某一粒径 R_i ($R_i > R_{i+1}$, $i=1,2,3,\dots,i$) 的土粒构成的体积 $V(r > R_i)$ 可表示为:

$$V(r > R_i) = C_v [1 - (R_i/\lambda_v)^{3-D}] \quad (1)$$

式中, R_i 是特征尺度, C_v , λ_v 是描述颗粒形状、尺度的常数。

当 $R_i = 0$ 时, (1) 式变为计算全部土壤颗粒总体积 V_T , 即 $V(r > R_i) = V_T = C_v$

当 $R_i = R_{\max}$ ($R_{\max}$ 为最大粒径) 时, $\lambda_v = R_{\max}$

因此有:

$$\frac{v(r > R_i)}{v_r} = 1 - \left[\frac{R_i}{R_{\max}} \right]^{3-D} \quad (2)$$

调整(2)式可得:

$$\frac{v(r < R_i)}{v_r} = \left[\frac{R_i}{R_{\max}} \right]^{3-D} \quad (3)$$

对上式两边同时取对数,即可得到土壤颗粒组成的分形维数计算公式:

$$\lg\left(\frac{v(r < R_i)}{v_r}\right) = (3 - D) \lg\left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right) \quad (4)$$

对于某一土壤各级粒径的土粒含量进行整理,并以 $\lg\left(\frac{v(r < R_i)}{v_r}\right)$ 为纵坐标, $\lg\left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)$ 为横坐标作图,得

到直线的斜率即为 $3-D$, 即可得到土壤分形维数 D 。

采用 SPSS 18.0 对表层土壤容重和粒径进行描述性统计分析, 采用 CANOCO 4.5^[20-21] 对土壤分形维数、粒径和土地利用及环境因子之间的关系进行典范对应分析 (CCA)^[22]。CCA 分析需要两个矩阵, 其一是物种数据矩阵, 即本研究中的土壤粉粒含量、砂粒含量、黏粒含量和分形维数 D , 其二是环境因子数据矩阵, 即本研究中的土地利用类型和环境因子。

2 结果与分析

2.1 不同尺度土壤粒径和土壤颗粒分形维数特征分析

对土壤粒径和分形维数进行描述性统计 (表 2)。由表 2 可知, 研究区域内表层土壤颗粒以砂粒和粉粒为主, 其中沐浴小流域的土壤砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 50.27%、38.83% 和 10.89%; 安塞集水区表层土壤砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 46.20%、43.06% 和 10.74%。在小流域和集水区尺度上, 各粒径百分含量空间差异性不大, 属于中等变异 ($10\% < CV < 100\%$), 但随着研究区由小流域到集水区, 变异性增加。

根据粒径分级及公式 (2—4), 对粒径进行分形维数的计算, 得到土壤 PSD 分形维数 D 值。沐浴小流域 D 值介于 1.86—2.55 之间, 平均值为 2.14, 变异系数为 7.01; 安塞集水区 D 值介于 1.71—2.55 之间, 平均值为 2.09, 变异系数为 7.66。在不同研究尺度 D 值均属于弱变异性, 但随着研究区由沐浴小流域到安塞集水区, 各粒径含量和 D 值的空间变异系数均有增加。

表 2 土壤粒径和分形维数的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil particle size and fractal dimension

统计值 Statistics	尺度 Scales	样本数 Sample number	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	D
平均值 Average	沐浴	35	50.27	38.83	10.89	2.14
	安塞	79	46.20	43.06	10.74	2.09
最小值 Minimum	沐浴	35	28.76	11.59	7.84	1.86
	安塞	79	22.75	10.2	6.25	1.71
最大值 Maximum	沐浴	35	78.76	61.59	14.45	2.55
	安塞	79	82.75	63.6	15.45	2.55
标准差 Standard deviation	沐浴	35	10.5	10.45	1.59	0.15
	安塞	79	12.62	12.08	2.07	0.16
变异系数 Coefficient of variation	沐浴	35	20.89	26.91	14.35	7.01
	安塞	79	27.32	28.05	19.32	7.66

2.2 不同土地利用类型的土壤粒径分布与分形特征

不同土地利用类型的土壤粒径和分形维数见表 3。由表 3 可知, 不同土地利用类型下的砂粒含量在沐浴小流域含量从高到低依次为: 荒草地 > 农用地 > 林地 > 灌木林地 > 园地, 在集水区的次序为: 荒草地 > 灌木林地 > 林地 > 农用地 > 园地; 在两个研究区粉粒含量在不同土地利用类型下的次序均与砂粒相反。黏粒含量变化幅度不大。在沐浴小流域, 灌木林地的 D 值最高 (2.18)、荒草地其次 (2.17)、农用地最低 (2.09), D 值从高到低依次为灌木林地 > 荒草地 > 林地 > 园地 > 农用地。在安塞集水区, 依然是灌木林地的 D 值最高 (2.11), 园地最低 (2.06), 从高到低依次为灌木林地 > 荒草地 > 农用地 > 林地 > 园地。

土壤理化性质的变异大部分由土地利用类型变化引起, 许明祥等^[13] 在对黄土丘陵沟壑区土壤理化性质空间变异性研究中, 发现土地利用类型可以解释 97% 的土壤质量指标的变异性, 即土地利用类型是黄土丘陵区土壤理化性质变异的主导因子。在本研究中, 不同土地利用类型结合植被盖度, 在不同尺度上对表层土壤分形维数的影响作用不同。随着研究区由小流域到集水区, 不同土地利用类型的分形维数 D 是降低的。总体趋势是: 植被盖度大, 分形维数越高。研究区的样本土壤中黏粒含量均 < 15%, 属于砂质土壤。这类土壤砂

粒含量较高,透水性好,保蓄性差。灌木林地和荒草地砂粒含量高于灌木林地和林地,这是由于林地和灌木林地通过冠层截留降低降雨侵蚀力影响水土流失,加上枯枝落叶层对表层土壤的保护,表层土壤中细颗粒含量较多,砂粒含量较低。

表 3 不同尺度土地利用类型的土壤粒径分布和分形维数

Table 3 Soil particle size distribution and fractal dimension of different land use types at different scales

土地利用类型 Land use types	尺度 Scales	砂粒含量/% Sand content	粉粒含量/% Silt content	黏粒含量/% Clay content	<i>D</i>
农用地 Farmland	安塞	47.00	42.88	10.13	2.09
	沐浴	46.75	43.66	9.58	2.10
荒草地 Grass land	安塞	47.41	41.87	10.72	2.10
	沐浴	52.54	36.51	10.95	2.17
园地 Orchard	安塞	41.18	46.46	12.36	2.07
	沐浴	42.83	43.94	13.23	2.17
灌木林地 Shrubland	安塞	44.21	44.14	11.65	2.11
	沐浴	51.50	37.05	11.45	2.18
林地 Woodland	安塞	46.45	43.17	10.38	2.06
	沐浴	48.83	40.38	10.79	2.11

研究区农用地主要种植玉米,由于人为干扰剧烈,虽然有施肥投入,但由于频繁土壤耕作和收获等因素影响,土壤表层疏松、水土流失严重,进而导致砂粒与粉粒的含量比较高,而黏粒含量比较低。灌木林地、林地和荒草地的土壤机械组成表现出较大的尺度差异,在小流域,灌木林地的砂粒含量占 51.50%,远高于粉粒含量 37.05%,而在集水区尺度上,砂粒含量和粉粒含量分别为 44.21% 和 44.14%;在小流域,林地的砂粒含量为 48.83%,高于粉粒含量 40.38%,在集水区尺度,砂粒和粉粒含量分别为 46.45% 和 43.17%;在小流域,荒草地的砂粒和粉粒含量分别为 52.54% 和 36.51%,集水区分别为 47.41% 和 41.87%。

黏粒含量的变异性较低,采样点中园地的黏粒含量最高,灌木林地和荒草地的黏粒含量高于林地和农用地。集水区林地、灌木林地以及荒草地发育较好,且在集水区西南和东北部有大量封育林场,荒草地植被覆盖度也较高。一方面由于山坡上部冲刷而来的细土粒在林地沉积,另一方面林地、灌木林地和荒草地表层植被覆盖度大,枯枝落叶和有机质含量丰富,腐殖化作用明显,具有明显的保持水土和改良土壤结构功能,所以黏粒含量较高。园地土壤机械组成的尺度差异不明显,这可能与小流域园地采样不足有关。

2.3 不同尺度表层土壤颗粒的分形维数与土壤粒径的关系

从分形维数的计算过程可知,*D* 值与土壤颗粒粒径由大到小的累积含量有关,为了进一步探寻土壤颗粒体积分形维数与土壤颗粒组成之间的关系,对土壤颗粒体积百分含量与分形维数进行 Pearson 相关性分析。分析表明,在沐浴小流域和安塞集水区,土壤颗粒体积分形维数与土壤砂粒、黏粒百分含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与土壤粉粒百分含量呈极显著负相关关系($P<0.01$)。

表 4 土壤分形维数 *D* 与粒径含量的相关性

Table 4 Correlation analysis between fractal dimension and soil particle size

尺度 Scales	<i>D</i> 值与砂粒含量 Pearson 相关性 Pearson correlation between <i>D</i> -value and sand content	<i>D</i> 值与粉粒含量 Pearson 相关性 Pearson correlation between <i>D</i> -value and silt content	<i>D</i> 值与黏粒含量 Pearson 相关性 Pearson correlation between <i>D</i> -value and clay content
沐浴 Muyu	0.836	-0.906	0.432
安塞 Ansai	0.737	-0.830	0.372

为深入揭示 *D* 值与各粒径的关系,将 3 个粒径含量与 *D* 值进行多元逐步回归分析。小流域 *D* 值与粉粒(x_1)、砂粒(x_2)、黏粒(x_3)回归方程为 $D = 5.918 - 0.5x_1 - 0.37x_2$,模型检验达到极显著水平, $R^2 = 0.987$ 。偏

回归系数显著性检验结果表明, D 与常数、砂粒、粉粒的偏相关关系显著, 粉粒含量对 D 值的影响大于砂粒的影响。集水区 D 值的回归方程为 $D = 2.161 - 0.12x_2 + 0.41x_3$, 模型检验达到极显著水平, $R^2 = 0.980$ 。偏回归系数显著性检验表明, D 与常数、粉粒、黏粒的偏相关关系显著, 粉粒含量对 D 值的影响大于黏粒含量。

进一步分析 D 值与土壤粒径含量的关系, 按照美国农业部土壤质地分类三角图标法, 将土壤样品进行质地划分, 采集样点的土壤类型为粉壤土、壤土和砂质壤土。对不同质地土壤 D 值进行统计分析。结果表明, 在沐浴小流域, 粉壤土、壤土和砂质壤土的 D 值平均数分别为 1.872、2.100 和 2.255, 安塞集水区分别为 1.934、2.089 和 2.227。采集样品中, 土壤颗粒黏粒含量平均值为 10.74%, 粒径含量以粉粒和砂粒为主。 D 值与砂粒含量正相关, 砂质壤土 D 值高于壤土和粉壤土。这种变化在沐浴小流域和安塞集水区的表现是一致的。这与在陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径的相关研究结论是基本一致^[12,23-24]的。但也有研究^[14,17]认为黏粒含量与 D 值相关性最强。在本研究中, 土壤黏粒含量较低, 且变异性小, 因此与 D 值的相关性也较弱。

2.4 不同尺度下土壤粒径与环境因子的关系

利用单因素方差分析不同环境因子对粒径含量和分形维数 D 的相关性(表 5)。进一步进行 CCA 分析的结果见图 2。

CCA 分析中, 环境因子用箭头表示, 箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性, 箭头连线的长度代表着某个环境因子与土壤粒径分布之间相关程度的大小, 连线越长, 说明相关性越大。反之越小。箭头连线和排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小, 夹角越小, 相关性越高; 反之越低。

由图 2 可知, D 值与砂粒、黏粒含量正相关, 且与砂粒相关性高于黏粒; D 值与粉粒含量负相关。由环境因子之间的关系可知, 在小流域坡度和土地利用类型对粒径和 D 值的影响表现出微弱负相关, 即随着坡度增加, 土地利用类型对土壤粒径的影响增大, 但随着研究区由小流域变化到集水区, 这种相关性消失。在小流域坡度和坡向对粒径和 D 值的影响表现出较强的负相关, 即随着坡度增加, 坡向对小流域的影响作用减弱; 在集水区也表现出了相同的趋势。

表 5 土壤粒径、分形维数与环境因子的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil particle size, fractal dimension and environmental factors

粒径与分形维数 Soil particle size and fractal dimension	尺度 Scales	相对海拔 Relative altitude	坡度 Slope	坡向 Aspect	植被盖度 Vegetation coverage	坡位 Slope position	土地利用方式 Land use types
D	沐浴	0.173	-0.156	-0.067	0.116	0.127	-0.226
	安塞	-0.017	-0.042	-0.036	0.272	0.023	-0.095
砂粒 Sand	沐浴	0.037	0.075	-0.119	0.034	0.098	-0.079
	安塞	-0.018	0.011	-0.012	0.125	0.048	-0.123
粉粒 Silt	沐浴	-0.066	-0.013	0.114	-0.047	-0.109	0.068
	安塞	0.023	-0.006	0.012	-0.146	-0.040	0.099
黏粒 clay	沐浴	0.193	-0.327	0.034	0.090	0.071	0.080
	安塞	-0.023	-0.031	0.003	0.096	-0.059	0.169

根据土壤粒径与环境因子的关系(图 2)可知, 在小流域, 土地利用和地形因子对土壤粒径的总体影响差异较小, 植被盖度、相对海拔和坡位相对于土地利用类型、坡向和坡度对土壤粒径影响较大; 安塞集水区植被盖度、土地利用类型和坡度对土壤粒径影响较大。在两个研究区砂粒含量和坡度、坡位均表现为正相关, 与坡向、土地利用类型负相关; 粉粒则相反。且砂粒和粉粒含量均与相对海拔和植被盖度的相关性较弱。但随着研究区由小流域到集水区, 各含量与各环境因子的相关性大小不同。小流域植被盖度对粒径的影响较大, 这是由于植物枯枝落叶的分解能够增加土壤有机质, 改善土壤结构, 植物根系也能较好的保持土壤, 改善其结构。但由于小流域面积小, 土地利用类型差别不大, 因此对土壤粒径影响较小。随着研究区由小流域到集水区, 植被盖度和土地利用类型对土壤粒径的影响作用明显高于地形因子。这说明在集水区尺度, 土地利用类

型和植被盖度是影响土壤粒径的主要因素,这与很多研究的结果是一致的^[11,25]。地形因子中,坡位在小流域中对土壤粒径含量影响较大,坡度在集水区影响较大。小流域的坡位与土壤颗粒性质关系密切,研究区易发生土壤流失,从坡上冲刷下来的细土粒易沉积在坡下^[25];以往研究^[26]也表明,坡下部沉积带比坡上部侵蚀带的粉粒含量高,砂粒和黏粒含量低。在较大的集水区尺度,相对海拔对集水区的影响很小,这是由于研究区为丘陵沟壑区、地形破碎,相对海拔和坡度等地形因子共同影响局地水热平衡及土壤侵蚀过程,坡度因子对粒径的影响占主导作用。

3 结论

(1) 沐浴小流域的土壤砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 50.27%, 38.83% 和 10.89%; 安塞集水区表层土壤砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为 46.20%, 43.06% 和 10.74%。沐浴集水区 D 值分布在 1.86—2.55 之间, 平均值为 2.14, 安塞集水区 D 值分布在 1.71—2.55 之间, 平均值为 2.09。研究区由沐浴小流域到安塞集水区, 各粒径百分含量和 D 值的空间变异性增强。在小流域尺度, 土壤质地的空间变异性较小, 而在集水区尺度, 土壤属性的变异性有所增加。

(2) 沐浴小流域不同土地利用类型的砂粒含量从高到低依次为: 荒草地>农用地>林地>灌木林地>园地, 集水区的次序为: 荒草地>灌木林地>林地>农用地>园地。粉粒含量的次序均与砂粒相反。不同土地利用类型土壤粒径分形维数 D 从高到低排序, 在沐浴小流域表现为灌木林地>荒草地>林地>园地>农用地, 在安塞集水区依次为灌木林地>荒草地>农用地>林地>园地。

(3) 小流域 D 值与粉粒(x_1)、砂粒(x_2)、黏粒(x_3) 回归方程为 $D = 5.918 - 0.5x_1 - 0.37x_2$, 集水区 D 值的回归方程为 $D = 2.161 - 0.12x_2 + 0.41x_3$ 。 D 值与粉粒极显著负相关, 与黏粒正相关, 且随着研究区尺度的增加, 正相关性增强。按质地进行分析, 在沐浴小流域, 粉壤土、壤土和砂质壤土的 D 值平均数分别为 1.872、2.100 和 2.255, 安塞集水区分别为 1.934、2.089 和 2.227。采集样品中, 土壤颗粒黏粒含量平均值为 10.74%, 粒径含量以粉粒和砂粒为主。 D 值与砂粒含量正相关, 砂质壤土 D 值高于壤土和粉壤土。这种变化在沐浴小流域和安塞集水区的表现是一致的。

(4) 土壤性质的变异性是不同尺度地形、土壤母质、土地利用及人为活动等多种因子综合作用的结果。黄土丘陵沟壑区地貌类型多样、地形破碎, 不同坡位、坡向、海拔影响水热条件和土壤物质的再分配。其中, 在小流域, 植被盖度、相对海拔和坡位对土壤粒径影响较大; 在安塞集水区植被盖度、土地利用类型和坡度对土壤粒径影响较大。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001: 16-41, 202-236.
- [2] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 常禹, 李团胜. 景观生态学. 北京: 科学出版社, 2003: 5-6, 130-131.
- [3] Wu J G. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder. Canadian Journal of Remote Sensing, 1999, 25(4): 367-380.
- [4] 傅伯杰, 赵文武, 张秋菊, 刘宇. 黄土高原景观格局变化与土壤侵蚀. 北京: 科学出版社, 2014: 2-4

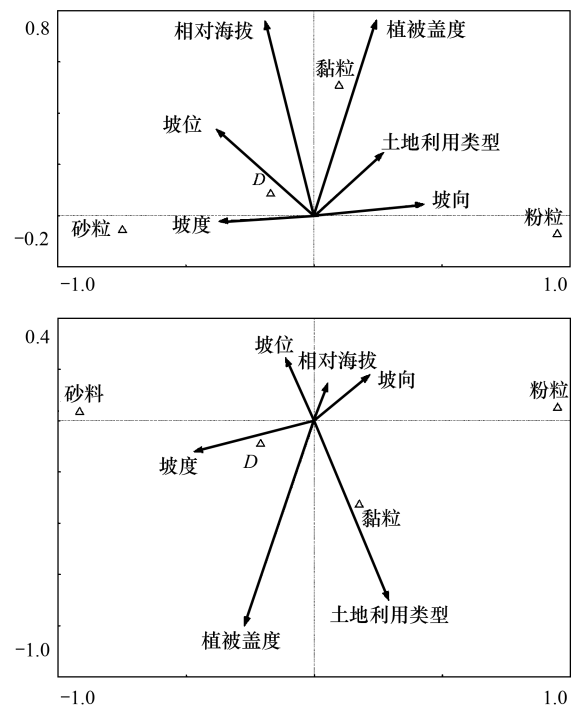


图2 沐浴小流域(上)和安塞集水区(下)土壤颗粒和环境因子关系的二维排序图

Fig.2 The two-dimensional CCA ordination diagram of soil particle size, fractal dimension and environmental factors in the Muyu small watershed area (up) and the Ansai catchment (down)

- [5] Giménez D, Perfect E, Rawls W J, Pachepsky Y. Fractal models for predicting soil hydraulic properties: a review. *Engineering Geology*, 1997, 48 (3/4): 161-183.
- [6] Huang G H, Zhang R D. Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal mode. *Geoderma*, 2005, 127(1-2): 52-61.
- [7] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3/4): 305-315.
- [8] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 赵文武, 汪亚峰. 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. *生态学报*, 2007, 27(7): 3081-3089.
- [9] Gui D W, Lei J Q, Zeng F J, Mu G J, Zhua J T, Wang H, Zhang Q. Characterizing variations in soil particle size distribution in oasis farmlands—A case study of the Cele Oasis. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, 51(11-12): 1306-1311.
- [10] Xu G C, Li Z B, Li P. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China. *Catena*, 2013, 101: 17-23.
- [11] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 曹红霞, 闫慧敏. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征. *土壤学报*, 2005, 42(2): 336-339.
- [12] 董莉丽, 郑粉莉. 陕北黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布分形特征. *土壤*, 2010, 42(2): 302 - 308.
- [13] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 409-417.
- [14] 郭中领, 符素华, 王向亮, 张学会. 北京地区地表土壤分形特征研究. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 154-158.
- [15] 曾宪勤, 刘和平, 路炳军, 王秀颖, 杨威. 北京山区土壤粒径分布分形维数特征. *山地学报*, 2008, 26(1): 65-70.
- [16] 缪驰远, 汪亚峰, 魏欣, 徐霞, 石文. 黑土表层土壤颗粒的分形特征. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 1987-1993.
- [17] 张秦岭, 李占斌, 徐国策, 张铁钢, 黄萍萍, 张洋. 丹江鹦鹉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. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 244-249.
- [18] 王富, 贾志军, 董智, 李红丽, 甄宝艳, 孙明高, 张卫平. 不同生态修复措施下水库水源涵养区土壤粒径分布的分形特征. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 113-117.
- [19] 赵明月, 赵文武, 钟莉娜. 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应分析: 以陕北黄土丘陵沟壑区为例. *生态学报*, 2014, 34(5): 1105-1113.
- [20] 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. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1896.
- [21] Leps J, Smilauer P. *Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [22] 张金屯. *数量生态学*. 北京: 科学出版社, 2003.
- [23] 邓良基, 林正雨, 高雪松, 张世熔. 成都平原土壤颗粒分形特征及应用. *土壤通报*, 2008, 39(1): 38-42.
- [24] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征. *生态学报*, 2004, 24(1): 71-74.
- [25] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异. *地理学报*, 2002, 57(5): 587-594.
- [26] Martined-Mena M, Williams A G, Ternan J L, Fitzjohn C. Role of antecedent soil water content on aggregates stability in a semi-arid environment. *Soil & Tillage Research*, 1998, 48(1-2): 71-80.