

红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究^①

王冬冬^{1,2}, 高磊², 陈效民^{1*}, 彭新华^{2*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要:通过分析红壤丘陵区农田坡面 14 个 0~100 cm 剖面的土壤颗粒组成,结合研究区土壤侵蚀等相关资料,拟阐明坡面尺度土壤砂粒、粉粒和黏粒含量的空间分布特征,揭示自然条件下土壤颗粒组成在水平和垂直方向上的分布规律。结果表明:坡面尺度土壤砂粒、粉粒和黏粒均呈现出中等的空间异质性,变异系数分别介于 17.6%~23.2%、10.7%~15.8% 和 13.5%~17.0%。由于粗颗粒的沉积,花生地和橘园地均表现出坡下的砂粒含量显著高于坡上和坡中($P<0.05$),黏粒含量坡下显著低于其他坡位($P<0.05$);由于黏粒更容易随入渗过程向深层运动,两种植被类型均表现出土壤砂粒含量随深度增加而降低($P<0.05$)、黏粒含量随深度增加而增加的趋势($P<0.05$)。无论在水平方向还是垂直方向上,粉粒含量均无明显变化规律($P>0.05$)。砂粒含量随坡位和土壤深度的变化程度均大于粉粒和黏粒。植被类型及相应的耕作制度影响土壤颗粒的分布,土壤砂粒在水平方向上的运动在花生地表现得强于橘园地;橘园地土壤黏粒含量在垂直方向上的迁移速率大于花生地,而对粉粒含量的分布规律影响不大。

关键词: 土壤黏粒; 土壤砂粒; 植被类型; 坡位; 土壤侵蚀

中图分类号: S152.3

土壤颗粒是组成土壤结构体的基本单元,且为土壤质量评价的一个重要指标^[1],它影响土壤的物理、化学和生物学特性,比如,土壤颗粒组成影响土壤的保水性^[2]、保肥性^[3]和抗侵蚀能力^[4]。土壤细颗粒具有较大的比表面积,是土壤污染物和养分的主要吸附载体,土壤的粒级组成决定了土壤对养分及污染物的吸附能力,通常土壤粒径越小,其比表面积越大,对土壤养分及污染物的吸附力越强^[5]。

土壤颗粒组成含量的分布首先是由土壤母质的性质所决定^[6],但是,植被类型^[7]、气候^[8]、地形^[9]等外在因素也会影响土壤颗粒在空间上的分布格局。这些外在因素主要是通过改变土壤颗粒在空间上的位置来改变其分布。土壤颗粒的再分布是土壤中普遍存在的过程,其主要受土壤物理机制影响,在一定程度上也与土壤中化学和生物机制有关。土壤颗粒的再分布过程在土壤物质迁移和土壤发生过程中具有重要作用^[6]。研究者发现土壤养分^[10]、胶体^[11-12]和病毒^[13]等的迁移与土壤颗粒的运动轨迹之间存在重要关系。

因此,土壤颗粒的迁移机制受到研究者的关注。杜丽娜等^[14]利用土柱实验模拟了砂质多孔介质中土壤颗粒的迁移规律,发现土壤颗粒在砂质多孔介质中迁移时主要受到土壤粒径、土壤悬液浓度和多孔介质组成的影响。宋晓明^[15]通过室内土柱试验对饱和多孔介质中颗粒迁移特性进行研究,同样发现颗粒粒径、颗粒浓度、渗流方向和渗流速率均对饱和多孔介质中颗粒迁移特性产生很大影响。

但是,以往的研究多是基于室内模拟试验,虽然模拟试验便于控制边界条件,却不能完全模拟田间众多的影响因素,难以实现大尺度模拟。而田间试验由于难以控制,对土壤颗粒迁移规律的研究比较少见。李裕元^[16]在陕西富县野外生态实验站研究了天然降雨侵蚀条件下坡地表层黄绵土的颗粒组成变化,发现在坡面上土壤颗粒组成的迁移主要以粉粒和黏粒最为明显,其中粉粒主要随径流向坡下迁移并在坡下发生沉积,黏粒则主要伴随着径流而直接流失,且其流失量随着坡长和坡度的增加而逐渐增大。但是该研究主要关注土壤表层(0~5 cm)在特

基金项目:国家自然科学基金项目(41301233)和“十二五”国家科技支撑项目(2011BAD31B04)资助。

* 通讯作者(xmchen@njau.edu.cn; xhpeng@issas.ac.cn)

作者简介:王冬冬(1991—),男,安徽淮北人,硕士研究生,主要从事土壤水文过程研究。E-mail: 2013103080@njau.edu.cn

定降水事件中土壤颗粒沿坡面的迁移规律,没有涉及土壤颗粒在垂直方向上的再分布过程。

红壤是我国重要的土地资源,总面积约为 27.2 万 km^2 , 约占我国土壤总面积的 28%^[17], 红壤地区坡地大量存在,加之降水丰沛,这些导致红壤地区土壤颗粒的空间分布随时间会发生改变。因此,认识自然条件下红壤坡耕地土壤颗粒含量的空间分布特征可以加深对该地区土壤侵蚀和农业面源污染的理解。鉴于此,本研究以红壤丘陵区农业坡地为研究对象,选取当地两种典型植被类型,花生地和橘园地,通过对 14 个不同坡位 0~100 cm 剖面土壤颗粒组成含量的分析,拟明晰红壤区土壤砂粒、粉粒和黏粒含量在坡面尺度水平和垂直两个方向上的分布格局,明确坡位和植被类型对土壤颗粒再分布的交互影响,以期为研究区制定合理的土地利用规划、土地耕作制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于江西省鹰潭市孙家农田小流域(116°55'E, 28°15'N), 距离中国科学院红壤生态实验站约 4 km。孙家小流域属于中亚热带温暖湿润季风气候, 水热资源丰富, 但季节性分布严重不均。多年平均降雨量为 1 794.7 mm, 年均潜在蒸发量为 1 229.1 mm,

4—6 月份降雨约占全年降雨量的 48%, 7—9 月份的蒸发量接近全年蒸发量的 50%; 该地区多年平均日照时数为 1 868.5 h, 无霜期为 262 天, 年均气温为 17.7℃。该小流域土壤由第四纪红黏土和红砂岩发育而来, 土壤质地多为黏壤土或黏土。由于长期的生物富集化和富铁铝化过程导致该区土壤质地黏重, 通气透水性差, 土壤酸度高, 肥力低^[18]。

所选坡面为一块坡耕地, 海拔 43~50 m, 坡度约为 3°, 面积约为 3 hm^2 , 母质均为第四纪红黏土。因此, 能够排除母质对该坡面土壤颗粒组成的影响, 该坡地土壤质地空间分布上的差异主要由地形、植被类型以及人类活动等外因导致。在 20 世纪 90 年代, 该坡面由均一的茶园改为橘园和一年生的农作物(花生为主, 有些年份为红薯、西瓜, 本研究中用花生代表一年生的农作物)。并且, 植被类型在 20 多年保持稳定, 因此, 该坡面可用于分析地形和植被交互作用下, 土壤颗粒组成在空间上的迁移规律。

橘园和花生是该坡面主要的植被类型, 分别占总面积的 19% 和 79%, 其余的 2% 为橘树和花生间作(图 1)。橘树株高约为 3 m, 株行间距为 4 m×4 m, 每年 5—10 月为橘树的枝繁叶茂期。花生的种植方式为顺坡垄作, 株行间距为 0.2 m×0.3 m, 主要生育期为 4—8 月。研究区表层(0~10 cm)土壤质地为

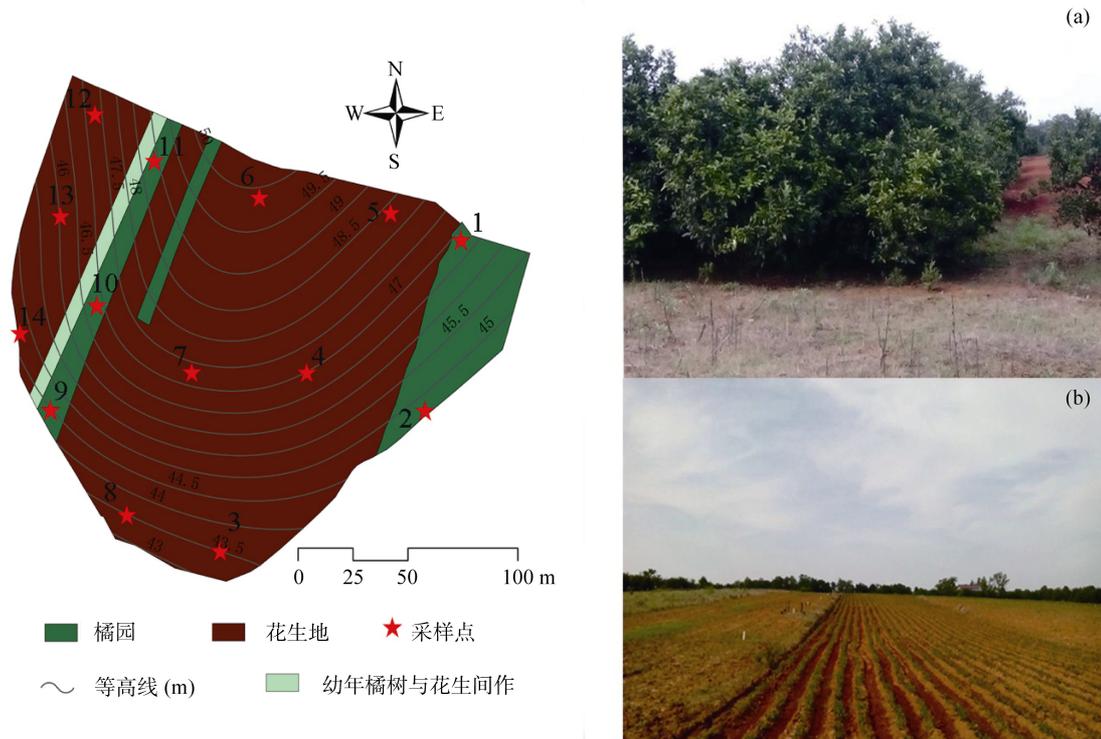


图 1 研究区采样点分布图以及橘园(a)和花生地(b)示意图

Fig. 1 The distribution of sampling sites and the schematic diagrams of citrus orchard (a) and peanut land (b)

黏壤土(美国农业部制),橘园地土壤砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 414.9、253.3 和 331.7 g/kg,花生地分别为 389.7、278.9 和 331.2 g/kg。花生地表层土壤由于人为的频繁耕作,其导水性强于橘园,表层土壤(0~10 cm)的饱和导水率分别为 2.0 和 0.2 mm/min。

1.2 数据获取与分析

在所研究坡面上,沿垂直于等高线方向布设 14 个采样点(图 1),采样点均按坡位(坡上、坡中、坡下)进行布设,其中橘园坡上和坡中各有 2 个采样点,坡下有 1 个(共 5 个),花生地不同坡位上均有 3 个采样点(共 9 个)。2014 年 5 月在每个样点上用土钻法分 6 层进行采样,采样深度分别为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm。橘园地采样点位置为距离橘树 2.5 m,花生地采样位置位于垄中部。将采集到的样品带回实验室自然风干后,过 2 mm 筛,利用沉降吸管法测定土壤颗粒组成。根据美国农业部制土壤质地分类系统的标准,按照粒径从大到小分为 3 级,分别为砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)以及黏粒(<0.002 mm)。借助 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 20.0 对数据进行统计分析,各处理间比较采用单因素方差分析(One-way ANOVA),均值的多重比较采用 Duncan 法,显著性水平设为 $\alpha = 0.05$,利用 ArcGIS10.3 和 Origin9.0 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤颗粒组成的基本统计

所选坡地土壤颗粒组成在 0~100 cm 土层的描述性统计(表 1)表明,土壤砂粒含量和黏粒含量的均值随土壤深度的增加分别呈降低和增加的趋势,而粉粒含量随深度保持相对稳定。土壤砂粒、粉粒和黏粒含量均值的变化范围分别为 342.2~400.4、263.9~271.7 和 331.6~392.4 g/kg。土壤颗粒组成和土层深度之间的线性关系(图 2)显示,砂粒和黏粒与土层深度之间分别呈显著的负相关和正相关关系,线性关系分别为: $y = -0.69x + 395.7 (R^2 = 0.85, P < 0.05)$ 和 $y = 0.70x + 336.6 (R^2 = 0.87, P < 0.05)$,而粉粒含量与土层深度无显著的线性相关性($P > 0.05$)。砂粒含量、粉粒含量和黏粒含量在空间上的变异系数分别介于 17.6%(80~100 cm)~23.2%(20~40 cm)、10.7%(40~60 cm)~15.8%(80~100 cm)和 13.5%(10~20 cm)~17.0%(20~40 cm)(表 1)。根据 Nielsen 和 Bouma^[19]的判断标准,各土壤层次土壤颗粒含量均呈现中等的空间异质性,这与 Wang 等^[20]在黄土高原地区的研究结论一致。但是,砂粒含量的异质性显著强于粉粒和黏粒含量的异质性($P < 0.05$, 单因素方差分析),这可能是由于砂粒在搬运过程中比粉粒和黏粒更容易发生沉积,而沉积的过程中会受到微地形等因素在空间上的异

表 1 不同土层深度土壤颗粒组成的描述性统计
Table 1 Effects of soil depths on the descriptive statistics of soil particle composition

土壤颗粒组成	土层深度 (cm)	最小值 (g/kg)	最大值 (g/kg)	均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 (%)
砂粒	0~10	235.8	504.3	400.4	80.3	20.0
	10~20	247.2	528.4	392.6	81.4	20.6
	20~40	208.7	497.8	360.7	84.1	23.2
	40~60	243.1	474.2	355.1	64.6	18.1
	60~80	203.5	448.2	345.3	68.5	19.8
	80~100	203.1	434.6	342.2	60.2	17.6
粉粒	0~10	224.6	349.5	269.5	37.5	13.9
	10~20	208.4	345.7	264.9	41.1	15.4
	20~40	223.2	345.3	271.7	39.2	14.4
	40~60	215.8	313.5	263.9	28.3	10.7
	60~80	215.3	341.6	271.6	37.3	13.8
	80~100	199.6	338.9	266.8	42.1	15.8
黏粒	0~10	269.7	416.4	331.6	50.5	15.1
	10~20	265.1	421.4	343.4	46.2	13.5
	20~40	250.7	455.3	369.7	63.1	17.0
	40~60	276.6	451.6	382.6	55.5	14.5
	60~80	276.3	469.2	385.3	59.3	15.4
	80~100	256.4	469.2	392.4	61.6	15.6

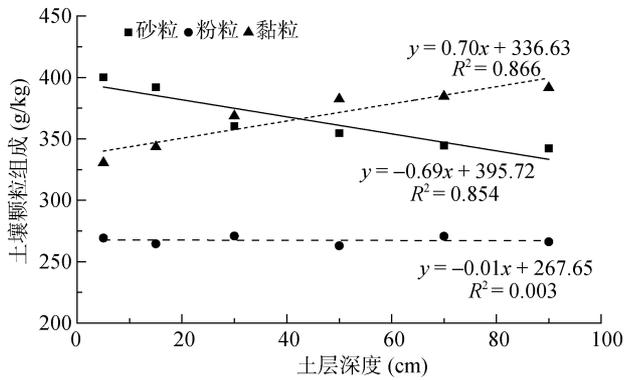


图 2 土层深度和土壤颗粒组成的相关性

Fig. 2 Correlations between soil depths and soil particle composition

质的影响。另外,砂粒和黏粒含量在空间上最强的异质性均出现在 20~40 cm 土壤层,这可能和研究区橘园和花生不同的耕作制度有关,花生地存在明显的犁底层(18~20 cm),而橘园不存在,这导致两种植被类型下,土壤黏粒在穿过 20 cm 土壤层向下迁移的难易不同,从而增加了土壤颗粒含量在 20~40 cm 土壤层的差异。另外,两种植被间不同的土壤侵蚀强度等因素对土壤质地的异质性也有影响。

2.2 土壤颗粒组成在水平方向上的分布特征

3 个坡位 0~100 cm 剖面土壤颗粒的平均含量(图 3)表明,坡位影响土壤颗粒的组成。总体来看,砂粒含量沿坡面从坡上至坡下有增加的趋势,粉粒含量和黏粒含量有减少的趋势。随坡位的变化主要是由土壤侵蚀过程中泥沙随径流的搬运和沉积作用所造成。在红壤低丘陵区高强度的农业种植模式下,人类活动是土壤颗粒再分布不可忽视的因素,比如土地翻耕等农事操作会诱发水土流失,从而改变了降水在水平运动和垂直方向运动的分配比例。红壤丘陵区坡地存在比较严重的土壤侵蚀,特别是在农地翻耕后遇到强降水的情况下^[21]。坡上由于汇流少,流速慢,径流侵蚀力较弱,地表松散的砂粒比致密的黏粒抗侵蚀力弱,首先被搬运^[22]。而随着径流的进一步汇集,在坡中,径流侵蚀力加强,大量不同粒径的表层泥沙被搬运^[23]。而到了坡下,由于径流搬运能力饱和,在遇到坡度放缓或农作物阻拦,大量粗颗粒泥沙(砂粒)开始沉积,而细颗粒(特别是黏粒)随径流进入沟道。经过长时期的积累,坡上黏粒的相对含量增加,砂粒含量降低,坡下则刚好相反。

土壤颗粒在水平方向上的分布特征受植被类型的影响。花生地土壤颗粒含量在不同坡位的差别比橘园地更大。花生地的砂粒沿坡面从上至下表现为坡上<坡中<坡下($P<0.05$),和坡上相比,坡中和坡

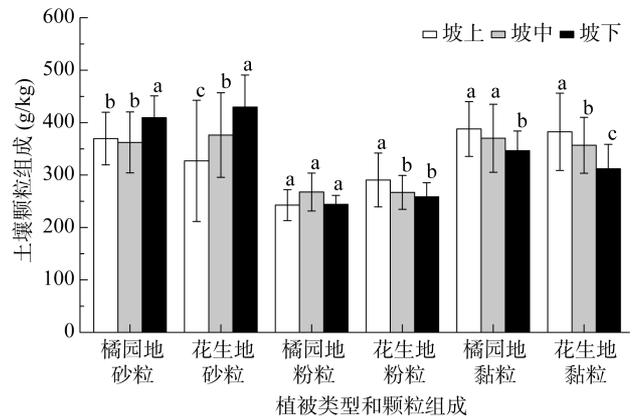
(图中小写字母不同表示同一植被不同坡位间差异显著($P<0.05$))

图 3 橘园和花生地不同坡位的土壤颗粒组成

Fig. 3 Effects of slope position on soil particle composition in citrus orchard and peanut land

下土壤砂粒含量的增加幅度分别为 15.1% 和 31.3%;粉粒含量表现为坡上显著高于坡中和坡下($P<0.05$),坡中和坡下土壤粉粒含量相对于坡上降低的幅度分别为 8.1% 和 11.0%;黏粒含量表现为坡上>坡中>坡下($P<0.05$),坡中和坡下土壤黏粒含量相对于坡上降低的幅度分别为 6.7% 和 18.4%。这也说明花生地砂粒含量随坡位的变化大于粉粒和黏粒。橘园地砂粒含量只有坡中显著低于坡下($P<0.05$),降低的幅度为 11.5%;粉粒含量在坡位之间无显著差异($P>0.05$);黏粒含量只有坡下显著低于坡中和坡上($P<0.05$),橘园地坡下黏粒含量相对于坡中和坡上降低的幅度分别为 6.4% 和 10.7%。花生地沿坡方向土壤颗粒差异大于橘园地的原因可能是:橘园地地表盖度大(约为 0.8),既有壮年橘树繁茂枝叶的遮盖,近地表又有少许杂草,地面还有枯落物覆盖(图 1a),良好的地表覆盖可以大大降低降水的侵蚀力^[24]。另外,橘园地常年基本无翻耕,其根系较发达,表层土壤有机质含量高,这些因素均有利于形成良好的土壤结构,从而大大提高橘园地的抗侵蚀能力^[25-26]。因此,同等降水和地形条件下,橘园的土壤侵蚀要远远低于以花生为代表的一年生农作物。吕玉娟等^[27]在该地区证实了这一结论,研究发现橘园地年平均泥沙侵蚀量仅为花生地的 20%。

花生地 0~100 cm 土壤颗粒组成含量的平均值在坡位之间均差异显著(粉粒含量在坡中和坡下除外),因此进一步比较了花生地 3 种坡位在不同土层深度的土壤颗粒组成的差异(表 2)。结果显示,并不是每一个土壤层次的土壤颗粒组成含量在坡位之间均存在显著差异。比如在 0~10、10~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 坡上和坡中均无显著差别($P>0.05$)。这说明,研究结果存在尺度效应,当以 0~

表 2 花生地各土壤深度不同坡位的土壤颗粒组成
Table 2 Soil particle composition in the profiles from different slop positions in peanut land

土壤颗粒组成(g/kg)	坡位	土层深度(cm)					
		0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
砂粒	坡上	364.5 ± 123.1 b	345.7 ± 111.6 b	325.7 ± 140.2 b	315.4 ± 82.2 b	302.6 ± 108.6 b	273.3 ± 68.5 b
	坡中	364.2 ± 95.5 b	362.6 ± 107.3 b	336.4 ± 87.6 ab	374.6 ± 89.5 ab	356.2 ± 65.5 ab	356.2 ± 59.7 a
	坡下	441.6 ± 59.3 a	428.7 ± 87.5 a	393.7 ± 95.7 a	400.3 ± 62.2 a	383.6 ± 57.3 a	373.3 ± 50.4 a
粉粒	坡上	289.5 ± 58.5 a	302.7 ± 49.4 a	308.4 ± 34.3 a	264.7 ± 49.7 a	268.5 ± 59.3 a	290.1 ± 44.6 a
	坡中	293.7 ± 42.3 a	269.4 ± 44.1 ab	270.3 ± 19.6 a	271.5 ± 30.4 a	271.7 ± 17.2 a	271.3 ± 46.8 a
	坡下	255.3 ± 27.4 a	244.7 ± 38.3 b	279.8 ± 62.2 a	277.5 ± 25.4 a	280.5 ± 4.4 a	261.8 ± 21.1 a
黏粒	坡上	347.8 ± 66.3 a	353.6 ± 62.1 a	367.4 ± 105.3 ab	421.3 ± 35.4 a	430.0 ± 61.5 a	437.5 ± 47.4 a
	坡中	343.3 ± 57.4 a	369.3 ± 63.3 a	394.4 ± 74.6 a	355.6 ± 60.3 b	373.0 ± 48.5 b	373.7 ± 18.3 b
	坡下	304.6 ± 47.4 a	328.4 ± 62.6 a	328.5 ± 43.7 b	323.3 ± 41.7 b	337.1 ± 53.6 b	366.5 ± 71.1 b

注：同列数据小写字母不同表示相同土层深度不同坡位间颗粒含量差异显著($P < 0.05$)。

100 cm 土壤层为研究对象时，各变量之间基本呈显著差异(图 3)，而将 0~100 cm 土层划分为 6 个土层(0~10, 10~20, 20~40, 40~60, 60~80 和 80~100 cm)分别研究时，各变量在坡位之间的差异缩小。砂粒含量在 6 个土壤层均表现出坡下显著高于坡上($P < 0.05$)；黏粒含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层深度不同坡位间均无显著性差异($P > 0.05$)。较深的土壤层(20 cm 以下)在细颗粒(黏粒)垂直运动的影响下，不同坡位间的差异不断累积，开始出现显著差异；粉粒含量在 6 个土层深度各坡位之间均无显著性差异($P > 0.05$)。一方面是由于土壤侵蚀对砂粒的搬运沉积影响更大，黏粒搬运较远，在坡面尺度沉积较少；另一方面，浅层土壤在土壤侵蚀、生物活动以及农事耕作等的共同影响下，不确定性或随机性增加，使得各重复之间差异减小。这一研究结果也暗示土壤颗粒的变化和迁移发生速率较慢，需要一个较长过程才能呈现显著性差异。由于土壤侵蚀、水分运动、农事操作等外力的作用，不同土层深度之间的土壤颗粒会发生混合，特别是在较浅的土壤层次，因此外力作用会干扰不同土壤层次之间土壤颗粒含量的差异。导致在较小的研究尺度

(10 cm 或 20 cm 尺度)表现出的差异小于较大的研究尺度(例如 100 cm 尺度)。

2.3 土壤颗粒组成在垂直方向上的分布特征

尽管表 1 和图 2 给出了土壤颗粒含量随深度变化的大概趋势，但均未考虑植被类型带来的差异。橘园和花生地在植被特征和耕作制度上的差异会导致土壤水运动规律的不同，水是土壤颗粒在垂直方向运动的主要驱动力。土壤颗粒组成的含量在垂直方向上的分布特征(表 3)显示，随土壤层深度的增加，橘园和花生地土壤黏粒含量均表现出增加的趋势。但是两种植被类型的表现有所差异，首先，6 个土壤深度土壤砂粒、粉粒和黏粒含量的极差(最大值与最小值之差)均表现为橘园地大于花生地，橘园地分别为 82.1, 22.2 和 78.1 g/kg，而花生地分别为 67.3, 17.4 和 60.3 g/kg(表 3)。其次，两种植被类型不同深度之间显著差异的组数不同，橘园地砂粒含量和黏粒含量均有 6 组之间存在显著差异，而花生地均为 5 组，而对于粉粒含量，两种植被类型在不同深度之间均无显著差异(表 3)。再次，以黏粒含量为例，相对于 0~10 cm 土壤层，橘园地 10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层的黏粒含量的增幅分别为 6.1%、

表 3 橘园地和花生地不同土层深度的土壤颗粒组成
Table 3 Soil particle composition in the profiles from citrus orchard and peanut land

土壤颗粒组成(g/kg)	植被类型	土层深度(cm)					
		0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
砂粒	橘园	419.6 ± 57.3 a	417.2 ± 38.4 a	377.2 ± 46.3 ab	340.2 ± 30.0 b	341.2 ± 55.7 b	337.5 ± 41.3 b
	花生地	406.2 ± 109.7 a	406.3 ± 106.7 a	380.3 ± 114.3 ab	380.6 ± 91.5 ab	357.3 ± 94.3 bc	339.0 ± 84.3 c
粉粒	橘园	252.7 ± 20.3 a	251.7 ± 29.6 a	244.6 ± 17.4 a	266.8 ± 12.5 a	266.4 ± 50.3 a	255.5 ± 54.7 a
	花生地	273.3 ± 42.6 a	265.8 ± 46.6 a	273.3 ± 41.5 a	263.3 ± 32.4 a	276.1 ± 31.3 a	280.7 ± 36.3 a
黏粒	橘园	330.4 ± 49.5 b	332.4 ± 15.4 b	379.0 ± 43.7 ab	392.5 ± 37.5 a	393.0 ± 59.6 a	408.5 ± 77.6 a
	花生地	321.0 ± 64.6 c	329.8 ± 57.4 bc	347.7 ± 82.6 abc	357.1 ± 66.4 ab	367.3 ± 66.5 a	381.3 ± 56.3 a

注：同行数据小写字母不同表示同一植被类型不同土层深度间差异显著($P < 0.05$)。

14.9%、18.8%、19.1% 和 23.6%，而花生地分别为 5.7%、9.7%、10.7%、14.7% 和 18.4%。可见，橘园地土壤颗粒特别是土壤黏粒含量在土壤深度上的差异强于花生地。这是因为橘园地土壤结构良好，根系发达，根系深度可达 1.1 m^[28]，而花生根系主要分布在 0~20 cm 土壤层，根孔的存在会增加土壤的入渗性能^[29]，从而导致径流系数减小^[27]，水分的垂直运动发达。而土壤水的运动会驱动细颗粒向下迁移，随着时间的积累，深层土壤的黏粒含量会逐渐提高，砂粒含量的比例会有所降低。因此，橘园地土壤颗粒特别是土壤砂粒和黏粒在垂直方向上的差异强于花生地。

3 结论

1) 土壤颗粒含量在 0~100 cm 各土壤层均呈中等的空间异质性，砂粒含量的空间异质性强于粉粒和黏粒。砂粒含量与土壤深度呈显著的负相关($P<0.05$)，黏粒含量与之呈显著的正相关($P<0.05$)，而粉粒含量在不同深度之间无显著差异($P>0.05$)。

2) 在水平方向上，坡位影响土壤颗粒含量的分布。总的说来，从坡上到坡下砂粒含量升高，粉粒和黏粒含量降低，砂粒变化的幅度大于后两者。并且坡位与土壤颗粒含量之间的关系与植被类型有关，土壤侵蚀更剧烈的花生地，其土壤颗粒在沿坡方向上的再分布过程强于橘园。另外，土壤颗粒含量在坡位之间的差异受研究尺度影响，以 0~100 cm 土壤层次为研究对象，各变量在坡位之间基本都呈现显著差异($P<0.05$)，而将 0~100 cm 划分为 6 个土层分别研究时，大部分土壤层不同坡位之间差异不再显著($P>0.05$)。

3) 在垂直方向上，尽管橘园和花生地土壤黏粒含量随深度增加均呈增加的趋势，砂粒含量均呈降低的趋势，但是土壤颗粒含量在垂直方向上的分布在两种植被类型之间表现不同，土壤颗粒特别是黏粒含量在垂直方向上的差异橘园地强于花生地，这表明前者的土壤颗粒含量在垂直方向上的迁移速率大于花生地。

参考文献：

[1] 陈晓燕. 不同尺度下紫色土水土流失效应分析[D]. 重庆: 西南大学, 2009

[2] 张景略, 苗付山. 黄泛平原不同质地土壤的持水特性[J]. 土壤学报, 1985, 22(4): 350-356

[3] 田佳倩, 周志勇, 包彬, 等. 农牧交错区草地利用方式导致的土壤颗粒组分变化及其对土壤碳氮含量的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 601-610

[4] 张振国. 土壤抗侵蚀指标的建立及初步应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010

[5] 马毅杰. 苏南水稻土的比表面及其主要影响因素的研究[J]. 土壤, 1987, 19(5): 245-248

[6] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 66-94

[7] 夏江宝, 顾祝军, 周峰, 等. 红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 9-15

[8] 朱丽东, 谷喜吉, 叶玮, 等. 洞庭湖周边地区第四纪红土粒度特征及环境意义[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 13-22

[9] 毛丽丽, 于静洁, 张一驰, 等. 黑河下游土壤的细土颗粒粒径组成和质地类型的空间分布规律初步研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 52-58

[10] 田坤, Huang C H, 张广军. 土壤溶质迁移至地表径流过程的室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 97-102

[11] Zhuang J, Tyner J S, Perfect E. Colloid transport and remobilization in porous media during infiltration and drainage[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1): 112-119

[12] Zhuang J, Goeppert N, Tu C, et al. Colloid transport with wetting fronts: Interactive effects of solution surface tension and ionic strength[J]. Water Research, 2010, 44(4): 1 270-1 278

[13] Jin Y, Chu Y, Li Y. Virus removal and transport in saturated and unsaturated sand columns[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, 43(2): 111-128

[14] 杜丽娜, 邵明安, 魏孝荣, 等. 砂质多孔介质中土壤颗粒的迁移[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 49-57

[15] 宋晓明. 渗透作用下多孔介质中颗粒迁移特性试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014

[16] 李裕元. 坡地土壤磷素与水分迁移试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2002

[17] 王明珠, 张佳宝, 赵春生. 赣东北低丘红壤区水资源的特点及其综合开发利用[J]. 江西农业学报, 1996, 8(1): 47-58

[18] Xu R K, Zhao A Z, Li Q M, et al. Acidity regime of the red soils in a subtropical region of southern China under field conditions[J]. Geoderma, 2003, 115(1-2): 75-84

[19] Nielsen D, Bouma J. Soil Spatial Variability[C]. Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA in Las Vegas, Pudoc, Wageningen, Netherlands, 1985

[20] Wang Y, Shao M, Gao L. Spatial variability of soil particle size distribution and fractal features in water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China[J]. Soil Science, 2010, 175(12): 579-585

[21] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46-50

[22] 陈晓燕, 牛青霞, 周继, 等. 人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2010(5): 163-168

[23] 王晓燕, 尹洁. 坡面小区土壤流失过程中粒径组成变化及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010(4): 113-118

[24] 唐寅. 紫色丘陵区坡耕地土壤侵蚀特征及植被覆盖与管理因子研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012

- [25] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34–37
- [26] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J]. 土壤学报, 2014, 52(4): 806–815
- [27] 吕玉娟, 彭新华, 高磊, 等. 红壤丘陵岗地区坡地产流产沙特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 19–23
- [28] 韩湘云, 景元书, 李根. 低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2 368–2 374
- [29] 陈致富, 魏天兴, 赵健, 等. 陕北风蚀水蚀交错区不同植被下土壤入渗性能差异性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 232–235

Spatial Distribution Characteristics of Soil Particle Composition of Slope Land Red Soil Region, China

WANG Dongdong^{1,2}, GAO Lei², CHEN Xiaomin^{1*}, PENG Xinhua^{2*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences),
Nanjing 210008, China)

Abstract: The soil particle composition of 14 soil profiles(0–100 cm)in red soil hilly region was investigated along a slope. The spatial distribution of soil particle composition in both horizontal and vertical direction was analyzed combining with the related data, e.g. soil erosion. The objectives of the present study were to clarify the spatial distribution characteristics of soil sand, soil silt and soil clay under the slope scale, and to reveal the migration law of them in two directions under natural conditions. Results showed that sand, silt and clay contents exhibited moderate spatial heterogeneity, with coefficient of variation changing between 17.6% and 23.2%, 10.7% and 18.8%, 13.5% and 17.0%, respectively. Due to the deposition of coarse particles, higher sand content was observed in bottom slope than top and middle slope in both peanut and citrus orchard land ($P < 0.05$). The clay content in bottom slop was, however, significantly lower than other slop position ($P < 0.05$). Soil sand content decreased whereas the clay content increased with increasing soil depth ($P < 0.05$) for both vegetation types, mainly due to the movement of more clay particles with the infiltration process of soil water. The silt content did not change significantly in both horizontal and vertical directions. Sand content had stronger variation among slope positions and soil depths than silt and clay contents. In addition, the distribution of soil particles were also affected by vegetation types and cropping systems. The migration of soil sand along the slope was more significant in peanut land than in citrus orchard. The migration rate of clay in the vertical direction was stronger for citrus land than peanut land. However, vegetation types and cropping systems had little effects on the distribution of soil silt content.

Key words: Soil clay; Soil sand; Vegetation type; Slope position; Soil erosion