

祁连山区土壤砂粒含量剖面分布模式及其影响因素*

李璇^{1,2} 杨帆^{1,2} 李德成^{1,2} 张甘霖^{1,2†}

(1 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)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 祁连山区是西北黑河流域的水源, 理解祁连山区土壤颗粒组成的剖面分布模式及其与环境要素之间的关系, 有助于进一步定量理解土壤中水、肥、气、热的运移和开展颗粒组成/质地的三维制图。以2012—2013年获取的深度 ≥ 1 m的69个代表性土壤剖面为对象, 分析了含量变异最大的砂粒的剖面分布模式及其与海拔、坡度、坡向、年均降水、平面曲率、剖面曲率、地形湿度指数、NDVI、土地利用、成土母质等环境变量之间的关系。结果表明: 祁连山区砂粒含量的剖面分布模式可分为均一型、递增型、递减型、先增后减型、先减后增型和不规则型六类, 但其很难用单一的环境变量来定量预测, 其根源在于祁连山区成土母质复杂多样, 加上复杂的地貌地形、土地利用等导致母质易发生运移而产生不连续性; 对应复杂山区的土壤颗粒剖面分布模式的定量预测, 还需从复合环境变量的角度进行深入的探索研究。

关键词 土壤颗粒组成; 砂粒含量; 剖面垂直分布; 环境变量; 祁连山

中图分类号 S152; S159 **文献标识码** A

颗粒组成是土壤的一个重要的物理特征^[1], 与水、肥、气、热、微生物的运移和活动有密切联系, 影响土壤肥力、质量和作物产量^[2-4]。在土壤颗粒组成方面已有较多的研究^[5-6], 如钟继洪等^[7]研究发现广东红壤颗粒组成主要受成土母质的影响; 张世文等^[8]研究表明县域尺度海拔、成土母质、土地利用、水域分布对土壤颗粒组成均有影响。很多研究表明地形地貌、水热条件、母质类型、人为活动对土壤颗粒组成有影响^[9-10], 在空间分布上可能呈现出特定的规律性和结构性^[11]。

了解土壤属性的剖面分布模式是建立更为精确的深度函数和提高三维预测和制图精度的基础。近年来, 土壤属性的三维空间变异与制图得到了高度关注^[12-13], 如基于土壤有机质含量的剖面分布特征建立相应的深度函数^[14], 然后利用土壤-景观模型预测其三维空间分布^[15-16]。土壤颗粒组成

的剖面分布模式主要受母质类型影响, 也与地貌地形、土地利用以及物质迁移导致的母质不连续性有关。如王冬冬等^[17]分析了不同植被类型坡上、坡下的土壤颗粒组成的垂直分布特征, Schaetzl等^[18]利用土壤颗粒含量剖面变化特征来判别沉积物发育的水稻土的母质连续性。

我国西北黑河流域是近年来的热点研究区域, 其上游祁连山区是整个流域的水源地。祁连山区海拔梯度大, 地形地貌、成土母质、土地利用、土壤类型复杂多样^[19], 其颗粒组成的剖面分布模式极有可能也是多种多样。有关祁连山区土壤颗粒组成的研究已有报道^[20-21], 但涉及其剖面分布模式的甚少。为此, 本文以2012—2013年在祁连山区调查采样的代表性土壤剖面为研究对象, 分析其颗粒组成剖面垂直分布模式, 探讨其与环境变量之间的关系, 旨在服务于更精确地理解土壤的水分运移以

* 国家自然科学基金(41371224和41130530)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41371224, 41130530)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 李璇(1991—), 女, 黑龙江鹤岗人, 硕士研究生, 农业资源利用专业。E-mail: lixuan@issas.ac.cn

收稿日期: 2016-11-28; 收到修改稿日期: 2017-01-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-02-21

及蓄水能力和进行更精确的颗粒组成的三维预测与制图。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山区 ($96^{\circ}41' \sim 101^{\circ}00'E$, $37^{\circ}30' \sim 40^{\circ}05'N$) 位于青藏高原东北部, 面积约 $30\,000\text{ km}^2$, 其海拔梯度大, 介于 $3\,000 \sim 4\,500\text{ m}$; 气候垂直变异明显, 一般山前低山属荒漠气候, 年均气温 6°C 左右, 年均降水量约 150 mm ; 中山下部属半干旱草原气候, 年均气温 $2 \sim 5^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $250 \sim 300\text{ mm}$; 中山上部为半湿润森林草原气候, 年均气温 $0 \sim 1^{\circ}\text{C}$, 年均降水量 $400 \sim 500\text{ mm}$; 亚高山和高山属寒冷湿润气候, 年均气温 -5°C 左右, 年均降水量约 800 mm ; 地貌地形多样, 有高山冰川、高中低山、台地、湖盆、谷地; 成土母质复杂多样, 有混有风积黄土的冰碛物、残积物、坡积物、沟谷堆积物、洪积-冲积物、冲积物等; 植被类型随着海拔的上升依次为草原化荒漠、山地草原、森林草原、灌丛草甸、高寒荒漠和永久寒冻带; 土壤类型也多种多样, 但主要是寒冻锥形土和寒冻新成土。

1.2 代表性土壤剖面样点布设与调查采样分析

代表性样点布设基于目标采样方法, 综合考虑了气候 (年均气温和降雨量)、地形地貌、海拔、成土母质、土地利用、土壤发生学类型等, 共布设了 99 个代表性样点 (图 1)。野外调查采样于 2012 年和 2013 年 7—8 月进行, 样点的剖面挖掘和观察描述依据《土壤描述与采样手册》¹⁾, 土壤样品采集依据剖面形态学特征划分发生层后进行。

土壤颗粒组成的测定采用激光粒度仪法 (BECKMAN COULTER LS230)^[22-23], 粒度分级采用 USDA 制, 其中, 黏粒 $< 0.002\text{ mm}$, 粉粒为 $0.05 \sim 0.002\text{ mm}$, 砂粒为 $2 \sim 0.05\text{ mm}$, 粒级含量以百分含量表示^[1]。

1.3 环境变量数据来源

样点的经纬度和海拔信息在野外由手持式 GPS 测定获取, 年均气温和年均降水量基于 $1\,000\text{ m}$ 分辨率的全国性气候数据 (<http://www.cams.cma.gov.cn>) 求取, 坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、地形湿度指数的信息来源于 30 m 分辨率 STRM DEM 数据 (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>) 基于 ArcGIS 10.1 和 SAGA GIS 平台获取, 土地利用类型通过野外调查获取, 成土母质类型通过野外调查观察和地质岩性图提取结果获取。

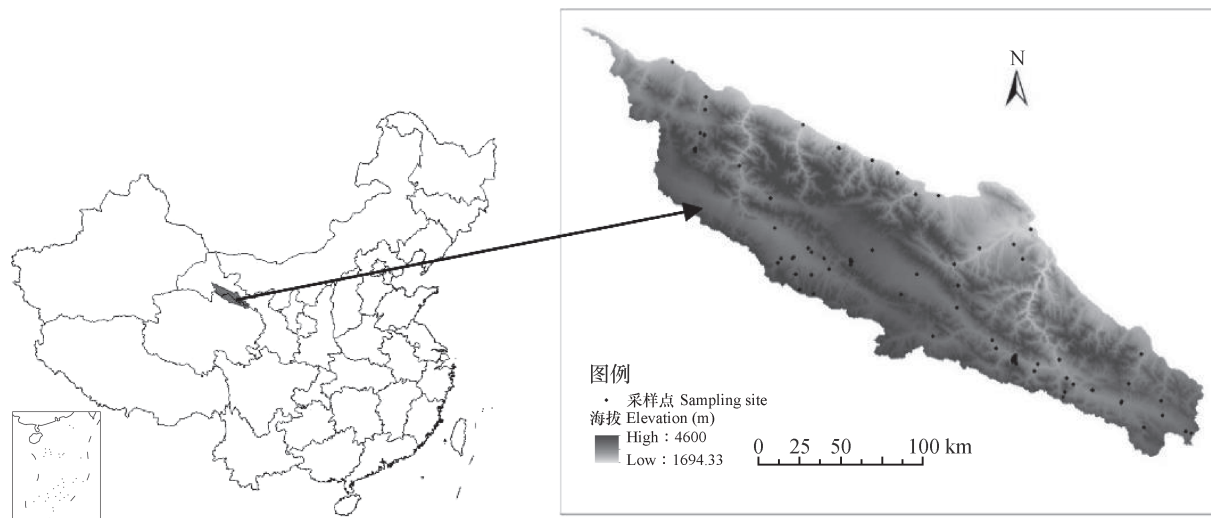
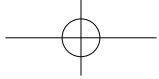


图1 祁连山区剖面点分布图

Fig. 1 Distribution of profiles and sampling sites in the Qilian Mountain

1) 张甘霖, 李德成. 土壤描述与采样手册. 南京: 科学出版社 (待版)



1.4 土壤颗粒组成层次标准化处理

由于测定的颗粒组成是基于发生层,不同剖面划分的层次数目和各层次的深度不一,因此获取的剖面层次深度需要标准化处理(0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm、30~60 cm、60~100 cm),方法如下:

$$PC_{t,b} = \sum_{i=1}^n PC_i \times H_i \quad (1)$$

式(1)中, $PC_{t,b}$ 为标准化层次 $t-b$ 的某一粒级的含量, t 、 b 分别代表该层次的顶部深度和底部深度; n 代表剖面 and 发生层数目, PC_i 代表发生层 i 的某一粒级的含量, H_i 代表 i 层的深度在标准化层次 $t-b$ 中所占的比例。

由于调查采样99个样点中,有30个样点的剖面深度 ≤ 60 cm,可能深度偏浅,为确保分析结果的可靠性,本文只对其余的剖面深度 ≥ 1 m的69个标准化样点进行剖面分布模式分析。

1.5 数据分析

不同粒级含量的标准化分层处理在Microsoft Excel 2013中进行,其剖面分布模式的制图和统计分别在Origin 8和IBM SPSS 20.0中进行。利用R软件进行进一步的数据统计分析,利用随机森林法^[24]分析环境变量与土壤颗粒组成剖面分布模式之间的关系。

2 结 果

2.1 土壤颗粒组成垂直分布模式

为全面反映祁连山区土壤颗粒组成特征,表1展现了99个样点剖面经过层次标准化后的不同粒级含量的统计特征。可以看出,祁连山区土壤以粉粒最多,平均含量在60%左右;黏粒最少,平均含量在12%左右;砂粒居中,平均含量在26.5%左右。这种粒级组成的特点是由于祁连山区成土母质主要为风积黄土(以粉粒为主,黏粒含量最低)和岩石风化物(由于祁连山区低温干燥环境,风化成的细土主要是砂粒)。考虑到砂粒的变异系数(42%~50%)明显高于粉粒(17%~25%)和黏粒(24%~28%),其剖面分布的分异应更为明显,本文选用砂粒含量研究土壤颗粒组成的剖面分布模式(69个深度 ≥ 1 m剖面)。

对69个样点砂粒含量的剖面垂直分布特征进行比较分析后,将其划分为六种类型(见图2):(1)均一型(各层次间砂粒含量差异幅度 $< 7\%$);(2)递增型;(3)递减型;(4)先增后减型;(5)先减后增型;(6)不规则型(随着深度的增加,砂粒含量变化趋势复杂,呈“S”

表1 不同层次土壤颗粒组成含量的统计特征

Table 1 Soil particle size composition at different normalized horizons

粒级 Particle size	深度 Depth (cm)	样点个数 Sample No.	最小值 Minimum	最大值 Maximum	中值 Mid	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variable (%)
黏粒 Clay	0~5	99	4.7	18.9	11.7	11.5	2.8	24
	5~15	99	3.2	18.9	11.8	11.8	2.9	25
	15~30	98	1.8	24.6	12.2	12.0	3.4	28
	30~60	81	4.5	27.4	12.1	12.0	3.2	27
	60~100	69	3.5	35.3	11.7	12.1	4.5	37
粉粒 Silt	0~5	99	30.8	79.2	62.2	60.0	10.1	17
	5~15	99	24.9	75.5	61.4	59.6	10.8	18
	15~30	98	16.5	76.1	61	58.4	12.7	22
	30~60	81	18.7	75.3	61	57.8	12.8	22
	60~100	69	11	74.6	59.3	55.8	13.9	25
砂粒 Sand	0~5	99	8.2	64.4	26	28.4	11.8	42
	5~15	99	8.3	71.8	25.8	28.6	12.8	45
	15~30	98	10.2	81.6	27	29.6	14.9	50
	30~60	81	11.3	76.4	26.9	30.3	14.3	47
	60~100	69	11.3	85.6	26.9	32.1	16.0	50

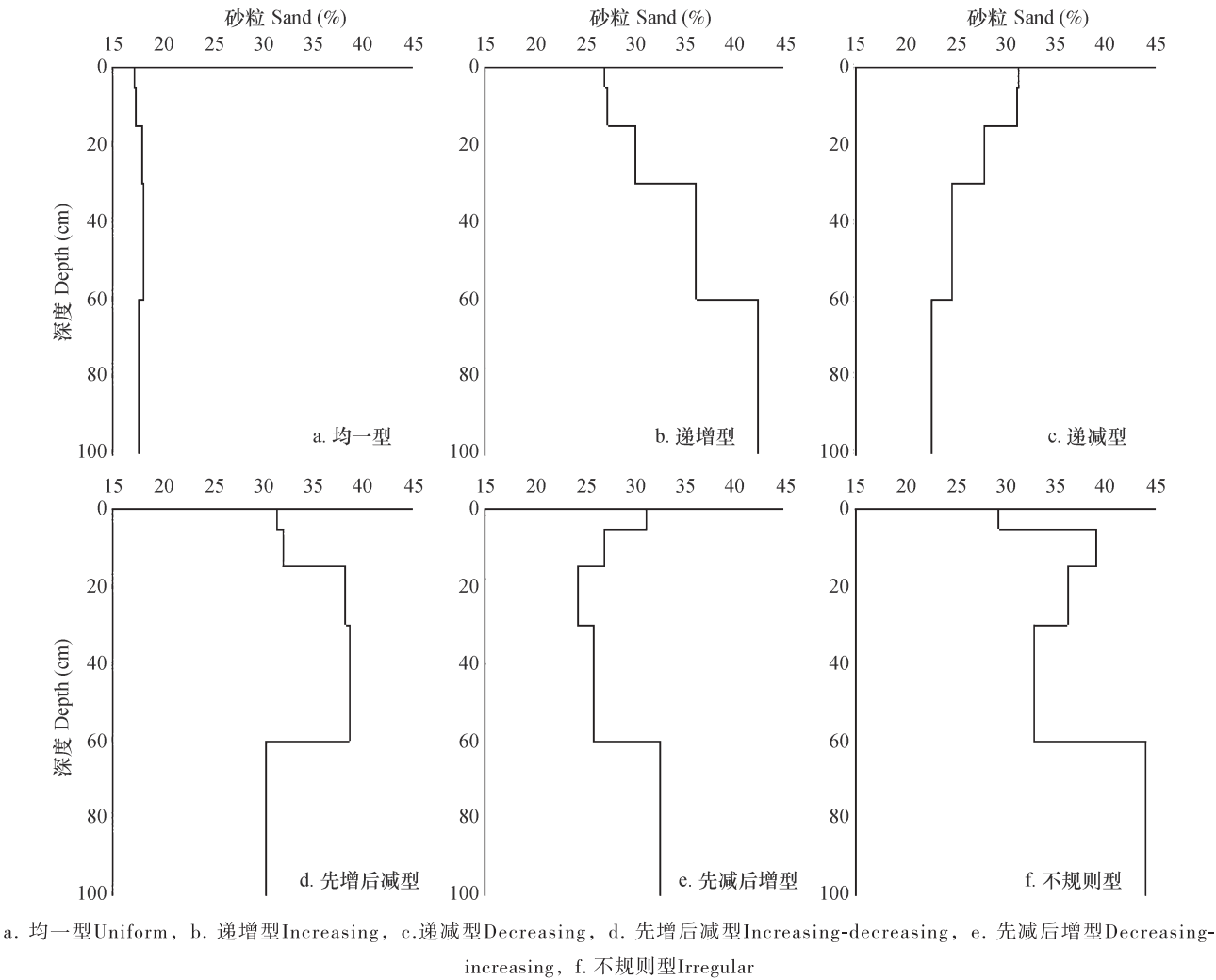


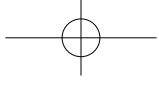
图2 祁连山区土壤砂粒含量剖面垂直分布模式

Fig. 2 Profile vertical distribution modes of soil sand content in the Qilian Mountains

表2 不同深度砂粒含量剖面分布模式的变异系数

Table 2 Variation coefficients of sand profile distribution modes relative to depth (%)						
深度 Depths (cm)	均一型 Uniform	递增型 Increasing	递减型 Decreasing	先增后减型 Increasing-decreasing	先减后增型 Decreasing-increasing	不规则型 Irregular
0 ~ 5	22	30	16	27	30	21
5 ~ 15	25	33	19	28	31	21
15 ~ 30	26	38	21	29	32	13
30 ~ 60	26	34	24	27	35	19
60 ~ 100	29	35	20	29	32	26

型或反“S”型)。其中，递增型的分布模式样点最多，有24个样点，占34.8%；随后依次是均一型、递减型、先减后增型、先增后减型和不规则型，分别有12、11、10、7和5个样点，分别占17.4%、15.9%、14.5%、10.1%和7.2%。表2中给出了各个分布模式不同深度的变异系数，递减型的变异性最小（16%~20%），递增型和先减后增型的变异性最大（30%~35%），均一型和先增后减



型的变异系数分别为22%~29%和27%~29%。

2.2 砂粒含量剖面分布模式与环境变量/因素之间的关系

将环境变量分为可量化的与不可量化的两类,前者包括海拔、坡度、坡向、年降水、地形湿度指数、平面曲率、剖面曲率,后者包括土壤类

型、土地利用、成土母质(表3)。对可量化环境变量做显著性差异分析和随机森林建模,分析砂粒剖面分布模式与环境变量的量化关系;而对不可量化的环境变量进行统计,与可量化的环境因素综合进行分析。

从分析中可以看出,可量化的环境变量在

表3 砂粒含量剖面分布模式的环境要素分配

Table 3 Distribution of environmental factors relative to sand profile distribution mode

环境变量 Environmental variables	均一型 Uniform	递增型 Increasing	递减型 Decreasing	先增后减型 Increasing-decreasing	先减后增型 Decreasing-increasing	不规则型 Irregular
成土母质 Parental material	坡积物 洪积物	坡积物 冰碛物 冲积物	坡积物 冲积物	坡积物 洪积物 冰碛物	洪积物 冰碛物 坡积物	坡积物 冰碛物 洪积物
土地利用 Land use	草地 林地	草地	草地	草地	草地	草地
土壤类型 Soil type	雏形土 均腐土	雏形土 干旱土	雏形土 均腐土	雏形土 干旱土	雏形土 均腐土	雏形土

各剖面分布模式之间的差异性并不显著。随机森林模型对预测砂粒含量剖面分布模式的准确率也仅有30%,这表明难于利用易获取的环境变量来预测土壤颗粒组成的剖面分布模式。

综合表3的分析表明,6种分布模式主要分布在3 000~3 500m的高山草原景观,部分均一型和递增型分布在2 000~2 500m的河滩-农田灌溉景观,6种分布模式的成土母质均以坡积物为主,递增型和先减后增型受洪积、冲积影响也较大,冰碛物主要分布在递增型中;土壤类型中均一型以雏形土和均腐土为主,递增型以雏形土和干旱土为主,其他类型主要是雏形土。研究表明分布模式在上述景观环境下均分布较为广泛,可以认为各模式在不可量化的环境因素之间差异性不大。

2.3 砂粒含量不同剖面分布模式的典型案例

前文分析结果表明难于利用单一的环境变量来预测砂粒含量剖面垂直分布模式,这实际上揭示了祁连山区土壤颗粒组成受众多环境因素的综合影响。下面选择每种分布模式下典型的剖面案例进行具体分析。

均一型分布模式的土壤物源基本是单一黄土,因此其砂粒含量低且变幅小。图3a为该模式的一个典型剖面,其分布于祁连山东部靠近宽阔河道的一

个平缓低洼地段,为远程冲积搬运来的黄土细颗粒在接近静水环境下沉积而成,故砂粒含量低,且通体差异甚小。

递增型分布模式一个明显特点是土体上部主要是黄土物质,但下部砾石明显增多,如图3中b和c,图3b的母质为洪积-冲积物,其颗粒组成不仅受黄土和岩石风化物的双重影响,也受土壤物质运移的影响,往下由于重力的影响,搬运来的石砾(粒径>2mm)和粗砂粒逐渐增多,形成了递增型分布模式。图3c其土体上部为黄土物质,下部为砾石较多的坡积物,因此也形成了递增型分布模式。

递减型分布模式的一个明显特点是土体下部以黄土物质为主,但上部受较粗的运移物影响,如图4a位于山脚下部的洼地,土体较为潮湿,细粒物质易随水入渗下移,而土体上部不断接收新的风积黄土和运移的物质,故而形成递减型分布模式。图4b位于山坡中部的平缓地段(坡度<2°),下部为堆积黄土,上部不断接收新的风积黄土和坡积来的物质,因此也呈现递减型分布模式。

图4c为先增后减型、图4d先减后增型的典型剖面,图4c位于高山坡下部,母质为不同时期的坡积物,土体上部和下部砾石较少,而中部砾石较多,因此呈现先增后减型分布模式。图4d位于高原洪积

扇扇缘，成土母质为洪积物，上部不断受坡积物的影响，中部为风积黄土，下部为含砾石的洪积物，因此也呈现先减后增型分布模式。

不规则型分布模式的形成主要是由于土体受多次坡积或洪积的影响，如图5a位于高山坡地中部，多次受到坡地上部侵蚀或塌陷下来物质的影响，由于不同时期的砾石和细土颗粒组成不同，形成土-石大致交替排列的土体，故而呈现不规则型的分布模式。图5b位于山脚坡底，土体下部为砂粒含量较低的老埋藏表层，上部为不同时期的坡积物，因此也形成了不规则型分布模式。

图3中a、b两个剖面的母质主要为洪积物、冲积物，然而两个剖面所在地的地形地貌有很大的差别，前者位于平缓低洼地段，而后者位于山坡坡麓，它们受到洪积、冲积等作用后沉积下来的颗粒组成差别非常大，因此形成了不同的剖面分布模式；图3c和图4c的母质均为坡积物，虽然它们均是经历了多次的坡积作用，但由于该地区的岩石风化物类型复杂，每一次坡积物的来源和种类均是不同的，因此即使母质相同，受岩石风化物的影响，其剖面分布模式也是复杂多变的。

3 讨 论

土壤颗粒组成剖面分布模式主要受控于成土母质类型及其连续性。一般而言，母质连续的剖面，其颗粒组成的剖面分布模式较为简单，多趋向均一型；但成土母质不连续的剖面，其颗粒组成分布模式往往较为复杂。祁连山区土壤的成土母质主要为风积黄土和岩石风化物，黄土和岩石风化物共同决定了其颗粒组成剖面分布模式。黄土颗粒组成上粉粒为主，砂粒次之，黏粒最少^[25]；在祁连山区岩石矿物组成复杂多样，有83%的剖面含有砾石（主要类型为钙质岩、钙性变质岩、砾岩或砾质岩、花岗片麻岩、红砂岩、蛇绿岩、橄榄石等）。由于祁连山区海拔高，气温和土壤温度低，岩石风化主要为缓慢的物理风化^[26]，风化物以粗颗粒为主。岩石风化物的矿物类型对土壤颗粒组成的影响较大，但对冰碛物、坡积物、洪积物母质的样点野外观察结果表明，同一剖面往往会多种岩石类型混杂，其包含的矿物类型复杂多样，因此难于依据其矿物类型进行系统的对比分析。

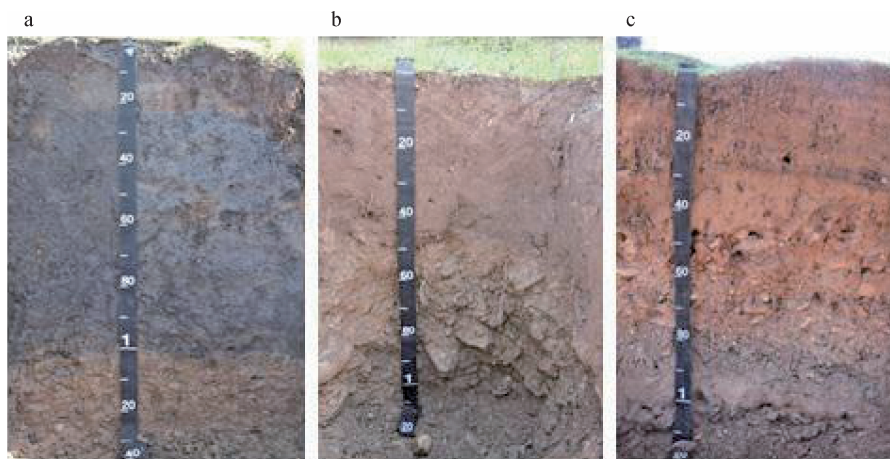


图3 均一型（a）和递增型（b，c）代表性剖面照

Fig. 3 Profiles typical of uniform (a) and increasing types (b, c) of mode

一般而言，祁连山坡上部，坡度较陡，细土易流失，土体中砾石和粗的砂粒较多；而山坡中部的局部洼地、山坡坡麓或沟谷地段，易于集聚土壤物质，土体较厚，层次较多，物质来源较为复杂，其颗粒组成的剖面分布模式也可能较为复杂。均一型的剖面主要分布在地势较为平坦的地区，受坡积、

洪积、冲积作用影响较小；递增型和递减型多为二元母质，主要分布在山坡中部，受坡积作用影响较大；先增后减型、先减后增型和不规则型为多元母质，主要分布在山坡底部或者洪积扇、冲积平原上，物源较为复杂，其分布模式也较为复杂多变。

对某些土壤属性剖面分布模式的研究已有很

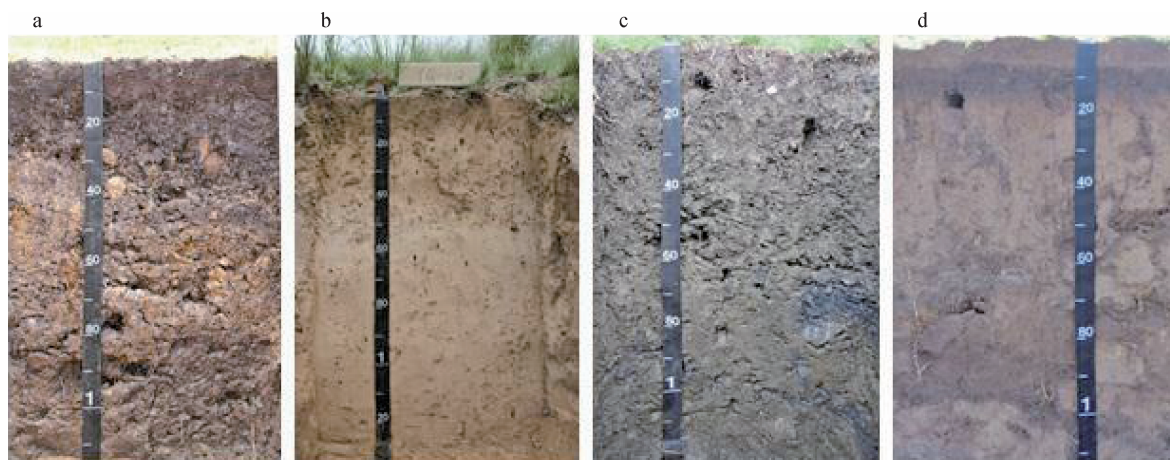


图4 递减型 (a, b)、先增后减型 (c) 和先减后增型 (d) 代表性剖面照

Fig. 4 Profiles typical of decreasing (a, b), increasing-decreasing (c) and decreasing-increasing types (d) of mode

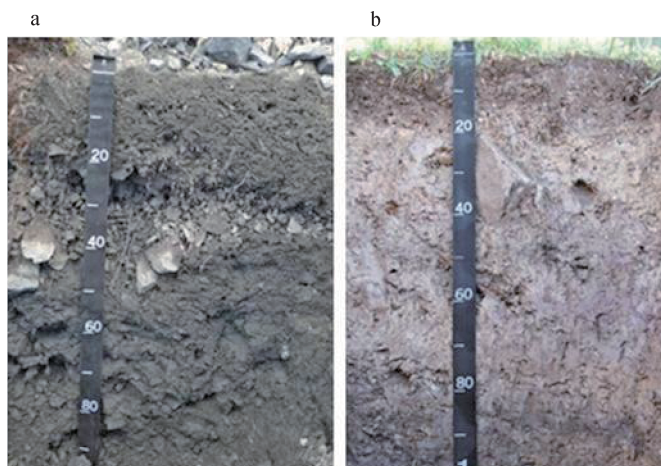


图5 不规则型 (a, b) 代表性剖面照

Fig. 5 Profiles typical of irregular type (a, b) of mode

多, 其中由于土壤有机质的分布规律最为明显, 因此对于有机质的剖面分布的研究也是最多的, 并且已广泛的应用于三维制图中^[27]。然而已有的土壤颗粒组成预测研究主要针对颗粒组成的含量^[28], 很少涉及其剖面分布模式, 仅有少部分的研究利用典型剖面分析土壤颗粒组成剖面分布模式与有限环境因素之间的关系^[17]。而选择复杂高山地区的研究就更少了, 其根本原因之一应是其土壤颗粒组成的影响因素多样性及其空间分布的复杂性, 造成其定量预测存在很大的难度。

本研究进一步表明, 虽然湿润祁连山区在大尺度上存在较为明显的景观类型分带^[29-30], 但综合来看, 由于成土母质类型多种多样, 海拔梯度大, 地形起伏强烈, 导致的母质不连续现象较为普遍,

这也决定了其土壤颗粒组成剖面分布复杂多样, 在空间分布上也是错综复杂, 这使得利用单一的环境变量很难精确预测土壤颗粒组成的剖面分布模式。这种情况下需要探索复合环境变量, 这也是我们下一步要进行的工作。

4 结 论

祁连山区土壤颗粒组成以粉粒为主, 砂粒含量变异最大。以砂粒为例探讨祁连山区土壤颗粒组成的剖面分布模式, 砂粒含量剖面分布模式可分为均一型、递增型、递减型、先增后减型、先减后增型、不规则型6种类型。分析砂粒的剖面分布模式与海拔、坡度、坡向、年均降水、平面曲率、剖面

曲率、地形湿度指数、土地利用、成土母质等环境变量之间的关系, 可量化的环境变量在各剖面模式之间的差异并不显著, 随机森林模型对预测砂粒剖面分布模式的准确率低, 但砂粒剖面分布模式受成土母质类型和母质连续性等环境因素的综合影响, 其空间分布错综复杂, 单一的环境变量很难有效定量预测土壤颗粒组成剖面分布模式, 需要进一步探索复合环境变量的有效定量预测。

参考文献

- [1] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2005
Huang C Y. Soil science (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [2] 谭军, 钟继洪, 骆伯胜, 等. 广东坡地红壤颗粒组成状况的研究: III. 土壤颗粒组成与土壤理化性质的关系. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7 (2): 102—105
Tan J, Zhong J H, Luo B S, et al. Research on the characteristics of particle composition of red soils in Guangdong. II. Relationship between soil particle composition and physic-chemical properties (In Chinese). Tropical and Subtropical Soil Sciences, 1998, 7 (2): 102—105
- [3] 沈思渊, 席承藩. 淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系. 土壤学报, 1990, 27 (1): 34—42
Shen S Y, Xi C F. Soil water retention and its relationship with particle size distribution in north Anhui Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1990, 27 (1): 34—42
- [4] Muhammad N, Lasantha H, Per M, et al. Spatial variability of microbial richness and diversity and relationships with soil organic carbon, texture and structure across an agricultural field. Applied Soil Ecology, 2016, 103: 44—55
- [5] Tairone P L. Particle size distribution of oxisols in Brazil. Geoderma Regional, 2016, 7: 216—222
- [6] Mcbratney A B, Santos M M, Minasny B. On digital soil mapping. Geoderma, 2003, 117 (1/2): 3—52
- [7] 钟继洪, 张秉刚, 林美莹, 等. 广东坡地红壤颗粒组成状况的研究: II. 土壤颗粒组成的空间分异. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7 (2): 98—101
Zhong J H, Zhang B G, Lin M Y, et al. Research on the characteristics of particle composition of red soils in Guangdong. II. The spatial variation of soil particle composition (In Chinese). Tropical and Subtropical Soil Sciences, 1998, 7 (2): 98—101
- [8] 张世文, 黄元仿, 苑小勇, 等. 县域尺度表层土壤质地空间变异与因素分析. 中国农业科学, 2011, 44 (6): 1154—1164
Zhang S W, Huang Y F, Yuan X Y, et al. The spatial variability and factor analyses of top soil texture on a county scale (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44 (6): 1154—1164
- [9] Wei S G, Dai Y G, Liu B Y, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China. Geoderma, 2012, 171/172: 85—91
- [10] 孙艳俊, 张甘霖, 杨金玲, 等. 基于人工神经网络的土壤颗粒组成制图. 土壤, 2012, 44 (2): 312—318
Sun Y J, Zhang G L, Yang J L, et al. Mapping of soil particle composition based on artificial neural network (In Chinese). Soils, 2012, 44 (2): 312—318
- [11] 张娜, 张栋良, 屈忠义, 等. 内蒙古河套灌区区域土壤质地空间变异分析—以解放闸灌域为例. 干旱区资源与环境, 2015, 29 (12): 155—163
Zhang N, Zhang D L, Qu Z Y, et al. The spatial variation of soil texture in Hetao irrigation district in Inner Mongolia (In Chinese). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29 (12): 155—163
- [12] He Y, Hu K L, Chen D L, et al. Three dimensional spatial distribution modeling of soil texture under agricultural systems using a sequence indicator simulation algorithm. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71 (1): 24—31
- [13] 陈冲, 胡克林, 贺勇. 农田土壤质地空间分布的三维随机模拟及其不确定性评价. 土壤, 2013, 45 (2): 319—325
Chen C, Hu K L, He Y. 3-D stochastic simulation and uncertainty assessment of soil texture at field scale (In Chinese). Soils, 2013, 45 (2): 319—325
- [14] Liu F, David G R, Song X D, et al. A similarity-based method for three-dimensional prediction of soil organic matter concentration. Geoderma, 2015, 263: 254—263
- [15] Liu F, Zhang G L, Sun Y J, et al. Mapping the three-dimensional distribution of soil organic matter across a subtropical hilly landscape. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (4): 1241—1253
- [16] Emilien A J, Michael S, Nicolas P A, et al. High resolution characterization of the soil organic carbon depth profile in a soil landscape affected by erosion. Soil & Tillage Research, 2016, 156: 185—193
- [17] 王冬冬, 高磊, 陈效民, 等. 红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究. 土壤, 2016, 48 (2): 361—367
Wang D D, Gao L, Chen X M, et al. Spatial distribution characteristics of soil particle composition of slope land red soil region, China (In Chinese). Soils, 2016, 48 (2): 361—367
- [18] Schaetzl R J. Lithologic, discontinuities in some soils

- on drumlins: Theory, detection, and application. *Soil Science*, 1998, 163 (163) : 570—590
- [19] Yang F, Zhang G L, Yang J L, et al. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3086—3093
- [20] Veit N, Frank L, Georg S, et al. Late quaternary Aeolian sand deposition sustained by fluvial reworking and sediment supply in the HEXI corridor —An example from northern Chinese drylands. *Geomorphology*, 2015, 250: 113—127
- [21] Yang R M, Liu F, Zhang G L, et al. Mapping soil texture based on field soil moisture observations at a high temporal resolution in an oasis agricultural area. *Pedosphere*, 2016, 26 (5) : 699—708
- [22] 杨艳芳, 李德成, 杨金玲, 等. 激光衍射法和吸管法分析黏性富铁土颗粒粒径分布的比较. *土壤学报*, 2008, 45 (3) : 405—412
- Yang Y F, Li D C, Yang J L, et al. Comparison between laser diffraction and pipette methods in analyses of PSD of clayey ferrisol (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (3) : 405—412
- [23] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012
- Zhang G L, Gong Z T. *Soil survey laboratory methods* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012
- [24] Ließ M, Glaser B, Huwe B. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: Comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 2012, 170 (3) : 70—79
- [25] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤 (第二版). 北京: 科学出版社, 1990
- Hseung Y, Li Q K. *Soil of China (2nd Vesion)* (In Chinese). Beijing, Science Press, 1990
- [26] 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤. 北京: 中国农业出版社, 1997
- Agricultural Resources Division Office of Qinghai Province. *Soil of Qinghai (In Chinese)*. Beijing, China Agriculture Press, 1997
- [27] 杨帆, 黄来明, 李德成, 等. 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素. *土壤学报*, 2015, 52 (6) : 1226—1236
- Yang F, Huang L M, Li D C, et al. Vertical distributions of organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6) : 1226—1236
- [28] Yang R M, Zhang G L, Yang F, et al. Precise estimation of soil organic carbon stocks in the northeast Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2016, 6
- [29] 卢玲, 李新, 程国栋, 等. 黑河流域景观结构分析. *生态学报*, 2001, 21 (8) : 1217—1224
- Lu L, Li X, Cheng G D, et al. Analysis on the landscape structure of the Heihe River Basin, Northwest China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (8) : 1217—1224
- [30] 马国泰. 黑河流域景观生态特征分析研究. *河西学院学报*, 2003, 2: 42—46
- Ma G T. The research of landscape ecological of Heihe Basin (In Chinese). *Journal of Hexi University*, 2003, 2: 42—46

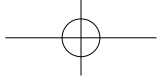
Mode of Profile Distribution of Soil Sand Content and Its Affecting Factors in the Qilian Mountains

LI Xuan^{1, 2} YANG Fan^{1, 2} LI Decheng^{1, 2} ZHANG Ganlin^{1, 2†}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objective】The Qilian Mountains is the main water head of the Heihe River Valley in Northwest China. To balance the need of water between socio-economic development and natural ecology protection, it is very important to understand the hydrology and other scientific basis of water management. Situated at the headwater area of the basin, soil properties especially soil physical properties such as particle size distribution in the Qilian Mountains have significant impacts on hydrological processes. Mode of profile distribution (PDM) of soil particle size composition and its relationships with various environmental factors



were discussed in an attempt to further understand quantitatively the transport of water, nutrient, gas and heat in soil and to develop 3D predication and mapping of soil particle size distribution. 【Method】 A total of sixty-nine soil profiles $\geq 1\text{m}$ in depth typical of the Qilian Mountains were investigated and soil samples collected from layers of the profiles for fractionation of clay, silt and sand fractions with the laser diffraction method. Sand fraction, the most variable one, was selected to study mode of its vertical distribution in the profile and its relationships with environmental factors, including elevation, slope, aspect, annual mean precipitation, plan curvature, profile curvature, terrain wetness index, land use and parent materials. 【Result】 Results show that the sand fraction in that region had 6 PDMs, i.e., uniform, increasing, decreasing, increasing-decreasing, decreasing-increasing and irregular, which were little related to any quantifiable environmental factors. We predicted the PDM with random forest, the accuracy was low. It is difficult to predict the PDM with quantifiable environmental information. 【Conclusion】 Because of the diversity of soil forming parent materials and complex landform and land relief in the Qilian Mountains, migration and discontinuity of parent materials often occurs as a result of land use. So it is difficult to predict PDM quantitatively only with single environmental variables, and therefore, its essential to explore in depth the issue from the angle of composite environmental variables.

Key words Soil particle size composition; Sand content; Profile vertical distribution; Environmental factor; the Qilian Mountains

(责任编辑：檀满枝)