

伊犁河谷新垦绿洲表层土壤粒度特征

靳建辉^{1,2}, 李志忠^{1,2,3}, 凌智永³, 马鹏^{1,2}, 吴美榕^{1,2}, 齐升吉^{1,2}

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态省部共建
国家重点实验室, 福建 福州 350007; 3. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 在新疆维吾尔自治区伊犁河谷察布查尔县农林示范区采集表层土壤样品 84 个, 测试分析了土壤粒度组成和粒度参数, 结合示范区土地利用现状, 采用空间异质性方法研究了新垦绿洲表层土壤的粒度变化规律及其影响因素。结果表明, 研究区表层土壤机械组成以粉沙和黏粒为主, 其中粉沙和黏粒含量属于弱至中等变异强度; 由东南向西北, 平均粒径表现为振荡变小的趋势, 频率曲线依次为正偏、近对称、负偏的空间格局。母质、地貌等结构性因素是控制研究区表层土壤粒径空间分布的主要因素, 人为的农林垦殖活动等随机性因素加剧了示范区表层土壤粒径的结构变化。其中, 低洼区表层土壤粒度组成中的黏粒含量增加, 土壤板结现象加重, 诱发了土壤次生盐渍化, 这是新垦荒地资源可持续利用必须重视和解决的农业生态问题。

关键词: 粒度特征; 表层土壤; 空间分异; 伊犁河谷; 新疆维吾尔自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)06-0007-05

中图分类号: S157

Spatial Distribution of Surface Soil Particles in a Newly Reclaimed Area in Ili Valley

JIN Jian-hui^{1,2}, LI Zhi-zhong^{1,2,3}, LING Zhi-yong³, MA Peng^{1,2}, WU Mei-rong^{1,2}, QI Sheng-ji^{1,2}

(1. School of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecosystem (Fujian Normal University), Fuzhou, Fujian 350007, China; 3. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: Aiming at the problem of soil salinization existed inside oasis, grain-size of 84 typical samples in Ili Valley, Xinjiang Uighur Autonomous Region was tested. Spatial variability of soil salinity in topsoil and its relationship with landscape structure were studied in combination of geo-statistics methods. Results showed that mechanical composition of topsoil was mainly composed of silt and clay. Variation degree of silt and clay contents changed from the weak to the medium. Averaged diameter was gradually decreased and frequency curve exhibited a pattern with positive excursion, nearly symmetric excursion, and negative excursion from east to west. Structural factors like parent material and landform were the main factors which control the spatial distribution of surface soil particles. Random factors like irrigation and tillage intensified the spatial distribution of surface soil particles. It is the most important agro-ecological problem that percentage content of silt was increased in mechanical composition of sag area. Soil hardening and secondary salinization were intensified in the sustainable utilization process of newly cultivated oasis resource.

Keywords: grain size characteristic; surface soil; spatial distribution; Ili Valley; Xinjiang Uighur Autonomous Region

20 世纪末以来, 土壤空间异质性研究在我国得到很大发展, 主要表现为地统计学和地理信息系统应用到土壤科学上来^[1-3]。胡克林等^[3], 赵庚星等^[9], 连纲等^[12] 选取我国中东部不同地域, 分别对农田土壤养分的空间异质性进行了深入研究。王奇瑞等^[7],

张玉铭等^[13] 分别以济源市和栾城县为试区, 研究了太行山山前坡地不同土地利用方式下土壤水分和土壤养分的时空变异特征。于婧等^[8] 对江汉平原典型区农田土壤全氮空间变异的多尺度套合进行了探索。苑小勇等^[10] 采用传统统计、地统计及地理信息系统

收稿日期: 2010-05-08

修回日期: 2010-06-07

资助项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目“伊犁河谷水土流失综合治理关键技术开发与研究”(2007BAC15B07); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目“近 30 年来伊犁塔克尔莫乎尔沙漠动态变化研究”(200821103)

作者简介: 靳建辉(1981—), 男(汉族), 山西省晋城市人, 硕士, 助教, 主要从事干旱区环境演变研究。E-mail: geojih@fjnu.edu.cn.

通信作者: 李志忠(1962—), 男(汉族), 四川省绵阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事风沙地貌与第四纪环境演变研究。E-mail: lizzfz@163.com.

相结合的方法,初步研究了北京市平谷区农用地土壤有机质含量的空间分布规律及其影响因素。陈涛等^[11]通过两个时期在杭州市东郊传统蔬菜基地取样分析,用空间自相关全局 Moran' s I 系数、地统计以及分维系数等空间分析方法研究了土壤重金属 Pb 和 Cu 的时空变异特征。上述研究主要从土壤 pH 值、重金属、土壤水分、土壤有机质、全氮、全磷及速效氮、磷等土壤养分的空间分异规律进行研究,为区域土地资源合理利用和土壤科学量化研究作出了有益探索。

伊犁河谷南岸新垦区为“十一五”国家科技支撑计划项目农林示范区之一,地处伊犁河南岸和中天山西端的乌孙山北麓的倾斜平原区,近 10 a 来在人为耕作灌溉影响下逐步发育为各类年轻的绿洲土壤,但尚未开展土壤理化性质研究。本研究在对示范区表层土壤粒度组成进行空间分异性分析的基础上,阐释示范区表层土壤粒度组成的空间变化规律,并探讨影响新垦区土壤粒度空间变异结果的结构因素和随机性因素,揭示研究区土壤粒度空间变异的主要原因,进而为研究区土壤侵蚀和水土保持工作提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区新疆维吾尔自治区伊犁河谷属于温带大陆性干旱气候。年均气温 7.9℃,年较差 35.2℃,年平均日较差 15.6℃。年降水量中山带为 300~400 mm,倾斜平原地带为 300 mm,阶地在 150~250 mm 之间。降水量南多北少,东多西少。农业气象灾害较多,主要表现为干旱、冻害、干热风、大风和冰雹等形式。示范区地处伊犁谷地南岸阶地和乌孙山北麓洪积冲积扇扇缘过渡带,面积约为 0.6 km²。地理坐标为 80°31'—81°43'E, 43°17'—43°57'N。地势南高北低,由东南向西北倾斜,自东向西成带状隆起分布在伊(宁)昭(苏)公路以西,海拔 640~670 m,东南高,西北低。

研究区地带性土壤为灰钙土,部分区域为盐化灰钙土或草甸灰钙土。其中,示范区东部未开垦荒地上主要分布着盐化草甸土,且地表有白色盐霜淀积,在微地形的高处盐分含量较多。植被以芦苇(*Phragmites communis*)、怪柳(*Tamarix*)、马兰(*Kalimeris indica*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris Thunb*)为主,并伴生碱蒿(*Artemisia anethifolia*)、矾松(*Limonium gmelinii*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)等。覆盖度在 80%左右。示范区中部和北部区域主要分布着暗色草甸土,未开垦前,地表植被茂密,以禾草科牧草

为主,总覆盖度在 80%~95%,且无盐渍化现象。开垦后主要依靠地下水灌溉种植农作物,主要特点表现为土温较低,杂草较多,存在着盐渍化的威胁,且有机质含量较开垦前有所降低。示范区西部及西北部主要为潮土,该区域在较长时间的灌溉耕作措施和施肥制度的影响下,土壤熟化程度较高,且该区域有部分发生盐化现象,生成盐化潮土,地表有硫酸盐类的白色盐霜生成,但多为轻度盐化。

1.2 材料与方法

2009 年 10 月对示范区新垦土地耕作情况进行野外考察。根据研究目的和示范区大小,以 80 m×80 m 为单元确定采样数,将示范区均匀划分为 84 个小区,每小区布置一个采样点,利用测绳并结合 GPS 定点的方法进行采样,每个采样点在 30 cm×30 cm 的区域对角线法、深度 0—15 cm 混合采样,得到表层土壤样品 84 个。

粒度实验在福建师范大学湿润亚热带山地生态省部共建国家重点实验室培育基地完成。样品在测试前处理为:(1)去除有机质:约 1 g 的样品放入 100 ml 的烧杯中,加入约 5 ml 10%的 H₂O₂ 并加热使其充分反应;(2)去除碳酸钙:加入 5 ml 10%的 HCl,加热使其充分反应;(3)中和:给烧杯注满蒸馏水后静置 24 h,再抽取蒸馏水,重复几次直至溶液呈中性为止;(4)分散:加入 5 ml 0.05 N 的(Na₂PO₃)₆ 进行分散。正式上机测试前,超声波振荡 3~5 min 防止胶结。采用英国 Malvern 公司生产的 Master Sizer-2000 激光粒度分析仪对所有样品进行测量。测量范围 0.02~2 000 μm,重复测量误差小 2%。采用美国土壤粒径分级标准分为 3 级:黏粒(<2 μm),粉粒(2~50 μm)和砂粒(>50 μm)。

土壤样品粒度参数特征值(均值、标准差、峰度、偏度和变异系数等)依据 Folk 和 Woodl^[13] 公式计算,采用 SPSS 13.0 统计软件进行统计分析。土壤粒度组成的空间异质性主要采用地统计分析,半方差函数的拟合主要采用 GS⁺(version 9.0)软件分析,土壤粒度特征的空间插值分析采用 Surfer 9.0 软件的 Kriging 插值法进行分析。

2 分析与讨论

2.1 土壤粒度总体特征

伊犁河谷农业示范区土壤质地较轻,多属粉(砂)土、粉(砂)壤土。总体特征为:土壤粒径变化范围介于 0.32~709.63 μm;中值粒径(*M_d*)介于 5.33~7.06 Φ;分选系数(*S_o*)介于 1.34~1.68 之间,标准偏差(*σ_i*) 在 1.50~2.47 之间变化,分选较差至分选差;

峰度(K_c)范围为0.95~1.23,介于中等(正态)至尖锐之间;偏度(SK_1)变化范围为-0.25~0.14,在负偏至正偏之间变化。其中,黏粒含量5.32%~15.08%,粉粒63.83%~87.76%,砂粒含量3.23%~30.47%之间。这反映了伊犁河谷农业示范区表层土壤物质来源的多样性和人为农林耕作灌溉活动的影响。

从表1可知,示范区不同土壤粒级含量的偏度值有较大差异,黏粒和砂粒为正偏,粉粒为负偏。黏粒百

分含量的峰度呈现尖锐形态,粉粒和砂粒含量的峰度为平坦形态。黏粒、粉粒和砂粒百分含量的变异系数($C_v/\%$)在6%~40%之间。其中,粉粒含量的变异系数为6.56%,近于弱变异强度,黏粒和砂粒百分含量皆属于中等变异强度。相对来说,砂粒的变异系数最大,达到39.19%。3者的变异系数相差较大,说明不同粒级的土壤粒径受到不同外部环境条件的控制,如示范区土壤母质的属性、原始地形以及当地的水热条件等。

表1 伊犁河谷农业示范区表层土壤不同粒级百分含量统计特征

| 土壤粒级 | 平均值 | 标准差 | 最小值 | 最大值 | 变异系数 $C_v/\%$ | 峰度(K) | 偏度(S) | 正态检验 K-S | 双尾检验 相伴概率 |
|------|-------|------|-------|-------|------------------|-----------|-----------|-------------|--------------|
| 黏粒 | 8.10 | 1.80 | 5.32 | 15.08 | 22.22 | 2.17 | 1.14 | 0.769 | 0.595 |
| 粉粒 | 77.28 | 5.07 | 63.83 | 87.76 | 6.56 | -0.15 | -0.44 | 1.050 | 0.220 |
| 沙粒 | 14.62 | 5.73 | 3.23 | 30.47 | 39.19 | -0.05 | 0.51 | 0.668 | 0.764 |

从黏粒和粉砂百分含量的空间分布特点看(图1),表层土壤粒度分布模式及其空间变异比较复杂。示范区东北部土壤黏粒含量出现高值区,西部黏粒含量普遍偏少,同时靠近扇缘溢出带的区域也出现2~3个次高值区,呈现若干个封闭的等值曲线。总体来看,示范区北部的黏粒含量皆高于中心地带,并表现出北高南低,东多西少的基本格局,低洼区土壤黏粒含量较高。可能反映了洪积扇南高北低的原始地形起伏和由南向北碎屑物质的机械沉积分异对示范区土壤机械组成变化的影响,人为农林耕作灌溉则增强了示范区内部土壤机械组成的空间异质性。研究区南部的洪积扇扇缘溢出带经过长期的深耕晒垡,黏粒物质也有所增加。

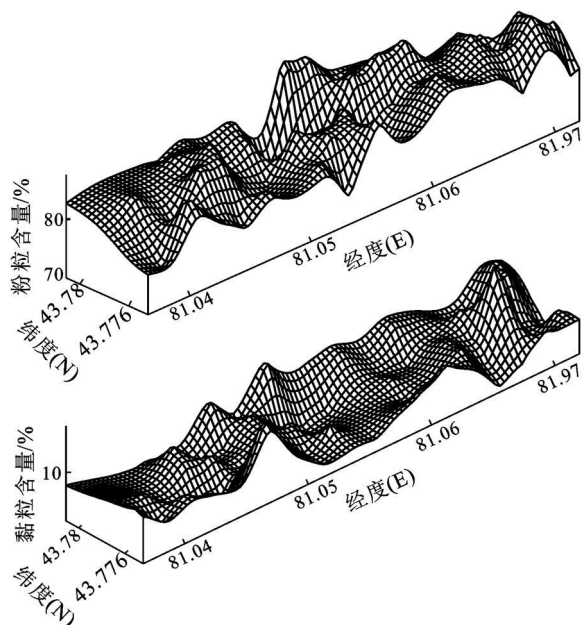


图1 伊犁河谷农业示范区表层土壤典型粒级含量分布

2.2 土壤粒度频率曲线特征

从频率曲线特征分析,不同地点表层土壤的粒度特征差异也较大(图2)。东部以及北部地带(81.055°—81.072°E)的表层土壤粒度频率曲线呈现正偏单峰和正偏弱多峰形态(图2a),土壤分选性较差,峰值偏向粗粒一侧,以粗组分为主。主峰为粒径2~160 μm 的颗粒组成;次峰由0.32~2 μm 的黏粒和160~700 μm 砂粒组成,含量较低。这是就地风化成壤产生粉砂,加上少量冲洪积碎屑和远缘搬运的黏土粉尘颗粒混合而成。中部偏西区域(81.045°—81.055°E)的表层土壤粒度频率曲线表现为近对称的正态弱多峰曲线(图2b),土壤颗粒组成分选较好。主峰由粒径1.4~116 μm 的颗粒组成,主峰值集中在15~56.4 μm 之间,两个次峰由粒径0.32~1.4 μm 的黏粒和116~400 μm 的砂粒组成,且包含少量500~700 μm 的粗砂颗粒。西部及南部地带(81.037°—81.045°E)的表层土壤粒度频率曲线表现出负偏的弱多峰形态(图2c),主峰由粒径1.46~158 μm 的颗粒组成,峰值在20~35.6 μm 之间,两个次峰由0.36~1.46 μm 的黏粒和156~400 μm 的砂粒颗粒组成,含量均较低,以细粒颗粒为主,分选较差。总体来看,示范区表层土壤粒度频率曲线特征从东至西,从北到南呈现正偏—近对称—负偏的空间分布格局。由此可知,在示范区尺度上,母质、地形、水动力、植被盖度等成土条件对表层土壤粒度组成有较明显影响。

2.3 土壤粒度的空间异质性分析

从表1单样本的K-S正态分布检验值以及对应的双尾检验相对概率来看,3级土壤粒径百分含量皆符合正态分布的K-S检验条件,描述性统计与正态分布检验的结果满足变异函数的要求,可直接用于

变异函数分析。根据土壤样品的黏粒、粉粒和砂粒 3 级粒径统计特征值,应用 GS^+ (version 9.0) 软件分别

进行半方差计算,所得 3 级粒径百分含量的半方差拟合模型及其特征参数见表 2。

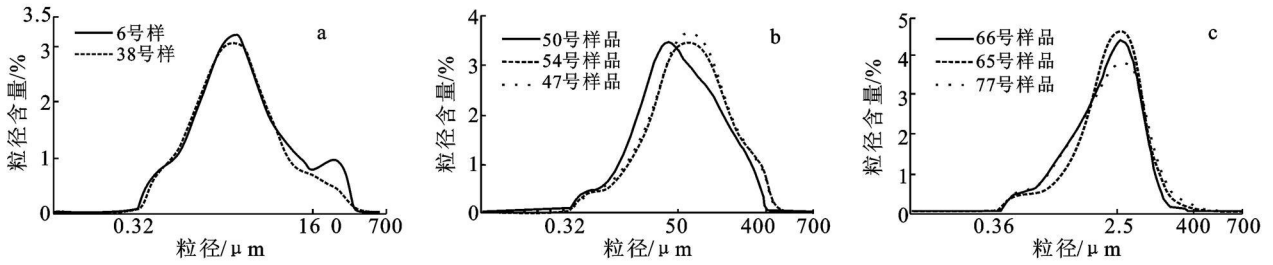


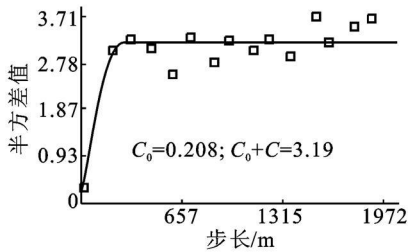
图 2 伊犁河谷农业示范区不同土壤样品的粒度频率曲线

表 2 伊犁河谷农业示范区表层土壤不同粒级百分含量的半方差分析及拟合结果

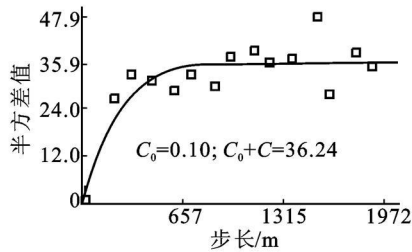
| 土壤粒级 | 模型类型 | 基底值 (C_0) | 基台值 ($C_0 + C$) | 结构性方差 (C) | 基底效应 $C_0 / (C_0 + C)$ | 变程 (R) | 决定系数 (R^2) | 残差平方和 (RSS) |
|------|---------|------------------|----------------------|------------------|---------------------------|---------------|-------------------|--------------------|
| 黏粒 | 高斯模型(G) | 0.208 | 3.19 | 2.983 | 0.065 2 | 209 | 0.856 | 1.30 |
| 粉粒 | 指数模型(E) | 0.010 | 28.20 | 28.190 | 0.000 4 | 528 | 0.777 | 176 |
| 砂粒 | 指数模型(E) | 0.100 | 36.24 | 36.140 | 0.002 8 | 566 | 0.775 | 331 |

一般来说,模型拟合的好坏直接决定空间结构分析的可靠性,可用决定系数(R^2)和残差平方和(RSS)来判断模型拟合程度。残差平方和(RSS)越小,决定系数(R^2)越大,说明理论模型对实验半变异函数的拟合效果越好。本研究中土壤样本网距均在变异函数的变程(R)之内,符合地统计分析要求。通过模型比较说

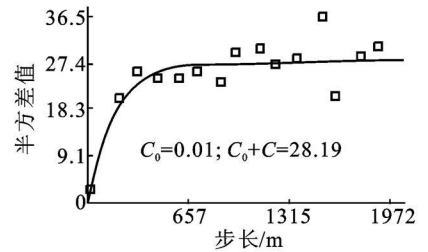
明,新垦绿洲土壤各个粒径百分含量均有较好的半方差结构,拟合程度均较好,决定系数分别达到0.856, 0.777, 0.775。其中,黏粒含量的实际变异函数值与高斯模型(Gaussian model)的拟合效果最好(图 3a),粉粒和砂粒含量的实际变异函数值与指数模型(exponential model)的拟合效果最好(图 3b, 图 3c)。



a 土壤黏粒半方差高斯模型



b 土壤粉粒半方差指数模型



c 土壤砂粒半方差指数模型

图 3 土壤各粒级半方差拟合模型

研究表明,空间异质性的自相关部分(SH_A)和随机部分(SH_R)可通过变异函数分析定量化。变程(R)范围内的 SH_A 在尺度上对应中尺度, SH_R 出现在小尺度上,由基底值(nugget) C_0 表示,即基底值(C_0)表示随机变异的大小。结构性方差 C 表示由结构性因素所引起的变异分量。基台值($C_0 + C$)表示系统内的总变异。基底效应可以表明空间相关程度^[14]。从表 2 可以看出,3 级土壤粒径百分含量的 C_0 值均为正值,但数值较低,说明来自采样、取样间隔内自然过程变异以及实验产生的误差较小。3 级土壤粒径百分含量在空间上的随机变异分别为 6.52%, 0.04% 和 0.28%,说明在 80 m 以下小尺度

上的随机变异 SH_R 很小,但在 80 ~ 1 000 m 尺度上,由空间自相关引起的 SH_A 分别达到 95.48%, 99.94% 和 99.72%。因此,可以认为在研究区尺度上 3 级土壤粒径含量的空间变异性主要由自相关部分 SH_A 引起,基底效应值均表现为强烈的空间相关性。其中,粉粒含量的空间相关性最高,说明样点间的差异主要来自于气候、母质、地形、土壤类型等结构性因素的影响,随机性因素如灌溉、施肥、土地利用等人为活动使得土壤粒度特征的空间相关性增强,这与示范区的实际符合。表 2 可以看出,黏粒、粉粒和砂粒和变程(R)分别是 209, 528 和 566 m,均包含在示范区范围(东西:1 050 m; 南北:600 m)之内,在尺度上是有效的。

图4a,图4b,图4c分别是土壤黏粒、粉粒、砂粒在不同方向的半方差图。通过计算可以看出,南北向采样点半方差拟合度不如东西向,土壤黏粒含量在E—W(0°),S—N(90°)两个方向上的拟合度优于NW—SE(45°),NE—SW(135°)两个方向上的拟合度。土壤粉粒和砂粒含量在S—N(90°),NW—SE(45°)两个方向上优于E—W(0°),NE—SW(135°)两

个方向上的拟合度。受示范区南部乌孙山北麓洪积冲积平原地势起伏的影响,沉积物粒径由洪积扇中南部向北部扇缘带逐渐变细。地处扇缘向伊犁河谷过渡带的示范区也呈现南高北低的平缓起伏变化,从东南向西北沉积物粒径由粗变细,其中3级土壤百分含量表现出不同的各向异性,可能受微地形起伏的坡度、坡向、土地利用类型等因素影响。

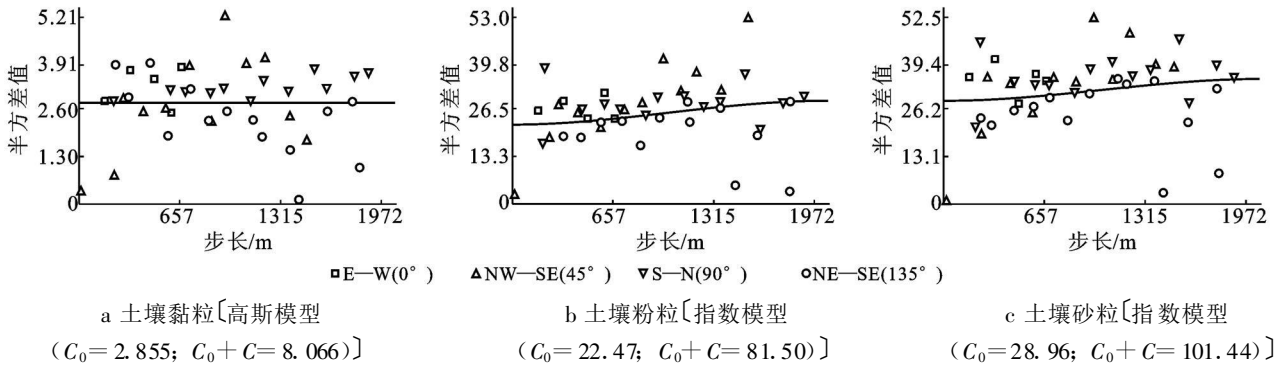


图4 土壤各粒级空间变异的各向异性

3 结论

(1) 伊犁河谷示范区表层土壤机械组成以黏粒、粉砂和砂为主。土壤质地较轻,多属粉(砂)土、粉(砂)壤土,各采样点土壤粒度组成具有不同程度的变化。其中,粉砂百分含量的变化属于弱变异强度,黏粒和砂粒百分含量皆属中等变异强度。由东南向西北,土壤粒度频率曲线依次出现正偏、近对称、负偏的空间格局。

(2) 伊犁河谷农业示范区表层土壤粒径空间分布受到多方面因素的影响和制约。总体表现出自南向北、从东向西振荡减小的趋势。研究显示,示范区表层土壤粒度的空间分异受结构性因素和随机性因素的双重影响,且结构性因素是影响空间分异的主导因素,随机性因素增强了土壤粒度的空间分异性。结构性因素主要受由南向北缓斜变化的下伏洪积扇原始地形,以及由南向北机械分异变细的成土母质等条件控制。研究区西北方向靠近山前洪积—冲积倾斜平原区,成土母质为洪积—冲积性黄土,是上游风化物和黄土及黄土状物经洪水搬运沉积而成。因此上游风化物成分的黄土及黄土状物的比例,对倾斜平原的土质以及土壤粒度组成有着决定性的影响。研究区东南方向接近乌孙山区和丘陵区,山区山体主要为古生代的花岗岩所组成,还有石炭系的石岩、灰岩喷发凝灰岩及更老的地层组成。成土母质主要为冰积物、残积物和坡积物。土层较薄,细土物质较少,多粗骨物质。另外山前堆积的灰棕色砂质黄土状物越接近山区土壤物质越粗,

母质碎屑越多,形成了质地较粗的土壤类型。另外,土壤粒度组成的纵向和横向复杂变异,还受到洪积扇表面原始的横向梁地和槽型地相间起伏变化的地形影响。横向梁地的粒度组成较粗,槽型地土壤粒度组成较细,黏粒含量较多。同时随机性因素如灌溉、施肥、土地利用方式等人为农业活动增强了土壤粒度的空间相关性。在不同土地利用方式下,人为耕作灌溉措施等随机性因素导致土壤粒度组成的空间异质性增强,土壤砂粒含量随着土地种植年限增加有降低的趋势,而粉砂和黏土含量有增加的趋势。

(3) 新垦荒地绿洲土壤粒度特征的空间分异也受到洪积扇表层水动力条件和植被覆盖状况的影响。比较周边表层土壤粒度组成特点,在最近10a人为灌溉耕作活动的影响下,示范区表层土壤结构趋向优化,但新垦土壤低洼区域土壤黏粒含量明显增加、土壤板结现象逐步加重,助长了土壤次生盐渍化过程,已经影响到示范区土地资源的可持续利用。这是今后新垦土地资源开发过程必须高度重视的问题。今后对土壤剖面粒度组成变化进行空间分异研究,有助于更好地了解人类活动与土壤理化性质演变的关系,也是深入研究的方向之一。

[参考文献]

- [1] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, et al. Biological feedbacks in global desertification [J]. Science, 1990, 247: 1043-1048.

(转第16页)

(3) 随着施肥水平的上升, 小麦产量也在一定范围内呈增加趋势, 以中氮肥中有机肥处理产量最高, 且这一处理的土壤过氧化氢酶活性和土壤脱氢酶活性也均为最高, 说明在一定范围内土壤酶活性的提高有利于小麦产量的提高。这可能是由于肥料的施入提高了土壤酶活性, 促进了土壤养分的转化和速效养分的增加, 为小麦生长提供了充足的营养, 从而增加了籽粒产量^[18]。

[参 考 文 献]

- [1] 周修冲, 刘国坚, Portch S. 平衡施肥在广东“三高”农业中的作用[J]. 广东农业科学, 1998(1): 32-34.
- [2] 朱宝国, 于忠和, 王囡囡, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(1): 97-100.
- [3] 葛晓光, 张恩平, 高慧, 等. 长期施肥条件下菜田—蔬菜生态系统变化的研究(II): 土壤理化性质的变化[J]. 园艺学报, 2004, 31(2): 178-182.
- [4] Mersi W, Schinner F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodinitrotetrazolium chloride[J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11: 216-220.
- [5] Mijangos I, Perez R. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 40: 100-106.
- [6] 沈善敏. 中国土壤肥力[J]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 111-151.
- [7] 马宗斌, 熊淑萍, 何建国, 等. 氮素形态对专用小麦中后期根际土壤微生物和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1544-1551.
- [8] Polesskaya O G, Kashirina E I, Alekhina N D. Changes in the activity of antioxidant enzymes in wheat leaves and roots as a function of nitrogen source and supply[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51: 615-620.
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 323-325.
- [10] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 268.
- [11] Visser S, Parkinson D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: Soil microorganisms[J]. American Journal of Alternative Agriculture, 1992, 7: 33-37.
- [12] 任祖淦, 陈玉水, 唐福钦, 等. 有机无机肥料配施对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(3): 279-283.
- [13] 郑洪元, 张德生. 土壤动态生物化学研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 173-265.
- [14] 郭天财, 宋晓. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 110-114.
- [15] 滕应, 黄昌勇, 龙健, 等. 铅锌银尾矿污染区土壤酶活性研究[J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 551-555.
- [16] 高瑞, 吕家珑. 长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1): 143-145.
- [17] 郝建朝, 吴沿友, 连宾, 等. 土壤多酚氧化酶性质研究及意义[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 470-474.
- [18] 张电学, 韩志卿, 李东坡, 等. 不同促腐条件下秸秆还田对土壤微生物量碳氮磷动态变化的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1903-1908.

(上接第 11 页)

- [2] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1501-1511.
- [3] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间异质性特征[J]. 农业工程学报, 1999, 9(3): 33-38.
- [4] 贾艳红, 赵传燕, 南忠仁, 等. 黑河下游地下水波动带土壤盐分空间变异性研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 420-430.
- [5] Webster R, Oliver M A. Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey[M]. Oxford England: Oxford University Press 1990.
- [6] 李海滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.
- [7] 王奇瑞, 谭晓风, 高峻. 太行山山前坡地不同土地利用方式下土壤水分的时空变异特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 100-110.
- [8] 于婧, 聂艳, 周勇, 等. 江汉平原典型区农田土壤全氮空间变异的多尺度套合[J]. 土壤学报, 2009, 40(5): 938-944.
- [9] 赵庚星, 李秀娟, 李涛, 等. 耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 55-58.
- [10] 苑小勇, 黄元仿, 高如泰, 等. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 70-76.
- [11] 陈涛, 施加春, 刘杏梅, 等. 杭州市城乡结合带蔬菜地土壤铅铜含量的时空变异研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 608-615.
- [12] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测: 以陕西省横山县为例[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 577-584.
- [13] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 31-65.
- [14] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 1-200.