

坡耕地黑土有机碳空间异质性及其格局

方华军^{1,2}, 杨学明¹, 张晓平¹, 梁爱珍^{1,2}

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 在 250 m × 100 m 研究区域上以 10 cm 间隔网格采样, 用地球同步技术卫星自动聚焦水准仪测定采样点位置及坡度, 用重铬酸钾—硫酸容量法测定 SOC 含量。用地统计学理论(半方差函数及 Kriging 插值)对 SOC 数据进行分析, 结果表明坡耕地 SOC 在不同方向上存在很大的空间异质性。不同土层 SOC 的空间相关性存在很大的差异, 随着土壤深度增加空间相关性减弱, 主要原因是土壤发生因素, 尤其是地形因素起着决定性作用。施肥, 纵向打垄及耕翻等土壤管理方式降低了 SOC 空间的相关性, 使其随机性增强, SOC 呈均一化方向发展。用克立格(Kriging)插值法绘制坡耕地 SOC 含量分布图, 发现 SOC 含量与地形及土壤发生过程尤其是土壤再分布过程密切相关。坡肩部位侵蚀最为严重, SOC 含量最低; 坡度相似的坡顶和坡背 SOC 含量相近。就整个研究区来看, 高含量的 SOC 转变为中等含量和低含量的 SOC, 充分揭示 SOC 在量上的变化机理。

关键词: 土壤有机碳; 半方差函数; 克立格插值; 土壤侵蚀; 黑土

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2005)03—0020—05

中图分类号: S158

Spatial Heterogeneity and Pattern of Black Soil Organic Carbon of Sloping Field

FANG Hua-jun, YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, LIANG Ai-zhen

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS,

Changchun 130012, Jilin Province, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: We collected soil samples from an area of 250 m × 100 m and determined location of sample and slope using Geostationary Technology Satellite Auto focus, the content of SOC were analyzed by method of $K_2CrO_7-H_2SO_4$ capacity. The data were analyzed based on Geostatistics method (Semivariance and Kriging interpolation) and the conclusion showed that SOC of sloping field had strong spatial heterogeneity at different aspect. There were an obvious spatial correlation among SOC of different soil layers, and the correlation weaken with soil depth increase. The reason may be soil-forming factors especially landform play a crucial role; soil management such as fertilization, ridge vertical to contour line and cultivation decreased this correlation and increased its randomness, which made SOC tend to uniformity. The content of SOC had a strong relationship with landscape units and soil forming process especially soil redistribution based on distribution maps of SOC produced by Kriging interpolation. The content of SOC at shoulder-slope was lowest because of serious erosion; summit and back-slope had similar content of SOC due to similar slope. The mechanism of SOC change at the whole study area was put forward, namely SOC with high content was changing into SOC of middle and low content.

Keywords: soil organic carbon; semivariance; Kriging interpolation; soil erosion; black soil

土壤有机碳(SOC)是土壤肥力的核心物质,通过影响土壤物理、化学、生物性质影响土壤肥力。土壤侵蚀一方面造成侵蚀的景观部位 SOC 含量减少,同时迁移的 SOC 在低洼的景观部位发生累积。与土壤侵蚀过程相对应, SOC 含量变化通过土壤团聚体的破坏和重新形成来影响土壤侵蚀和温室气体 CO₂ 的释放。为了弄清楚土壤再分布过程对大气 CO₂ 的净

效应,需要研究不同景观单元 SOC 的空间分布特征。SOC 作为土壤的一个特性值,是一个不均一和变化的连续体,即使在土壤质地相同的区域内, SOC 在不同空间位置上也具有明显差异,即 SOC 存在明显的空间变异性。经典 Fister 统计方法在研究土壤属性的变化时通常假定研究对象是纯随机变量,可以无限次重复实验或大量观测,样本之间完全独立且服从正

收稿日期: 2004-04-11

资助项目: 中国科学院国外杰出人才支持项目(K09Z3); 国家自然科学基金(40271108 和 40471125)

作者简介: 方华军(1978—), 男(汉族), 安徽巢湖人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀和土壤有机碳方面的研究。E-mail: hua junfang78@hotmail.com; hua junfang@yahoo.com.cn.

态分布。近年研究表明许多土壤参数在一定范围内存在空间相关性^[1-2]。因此仅运用经典的 Fister 统计方法已不能满足土壤空间异质性研究的需要。

地统计学是近几十年来发展起来的一门新的空间分析方法,适于区域化变量空间分布特征的描述。并且地统计学提供了一种最优的空间插值方法,它是基于对空间结构特征充分认识的基础上,优于其它插值方法(如几何插值、趋势面分析、普通滑动平均等),广泛应用于土壤和生态因子分布图的绘制^[3-5]。

近年来对 SOC 空间分异及影响因素的研究多集中于平坦区域不同土地利用方式和土壤管理措施方面^[6-7],而对坡耕地土壤侵蚀和再分布过程引起的 SOC 空间分异研究较少。本文根据地统计学理论和方法(半方差函数和 Kriging 插值),分析东北黑土典型漫岗地形 SOC 在小尺度上的空间分异,用以说明土壤侵蚀和再分布过程对 SOC 空间分异的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样区位于东北黑土区的中部,行政区属于吉林省德惠市松花江镇西南 5 km 的沫石河小流域(44°43'N, 125°51'E)。研究区为中温带半湿润气候,年均温 4.4℃,年均降水 528.3 mm,降水主要集中在 6—8 月。研究区面积 84 855.6 m²。采样区位于小流域的北坡,地形为典型的漫岗台地,包括各种典型的地貌类型:坡顶、坡肩、坡背、坡脚和坡足。利用日本 Topcon 公司生产的地球同步技术卫星自动聚焦水准仪 GTSAF601 (Geostationary Technology Satellite Auto focus 601) 进行采样点位置和坡度的测量,得出坡顶坡度在 0°~4.08°,平均 2.6°;坡肩坡度最大,2.44°~5°,平均为 3.53°;坡背在 0.82°~3.47°,平均为 2.23°;坡脚和坡足部位坡度最小,在 0°~2.35°之间,平均为 1.14°。土壤属于典型黑土亚类中的中层黑土。采样区为农田,玉米连作、顺向打垄和耕翻一直是该区的主要土壤管理方式。

1.2 采样点布设,土壤采样及分析

在 250 m × 100 m 范围内的典型黑土坡耕地上,以 10 m 间隔进行规则网格采样。利用直压式取土器(内径为 5 cm)取表层 30 cm 土壤,取出的土柱分为 0—10、10—20 和 20—30 cm 层。每层采样数为 168 个,共 504 个土样。土壤样品磨碎过 100 目筛, SOC 含量用重铬酸钾—硫酸容量法测定。

1.3 数据分析

许多学者对半方差函数及克里格插值理论都作了详细的描述^[8-10]。本文应用 STATISTICA 6.0

统计软件对数据进行 Kolmogorov—Smirnov (K—S) 正态检验和基本统计分析,以 GS + for windows 5.0 地统计学软件包进行半方差计算和半方差图的绘制。为了定量地确定研究对象的空间自相关性以及空间内插计算,GS + 软件提供了 5 种数学模型即线性模型、带阈值的线性模型、球面模型、指数模型和高斯模型供半方差图拟合选择。

在此基础上利用 Sufer 7.1 软件进行块段克里格(block Kriging)插值。半方差函数 $\gamma(h)$ 一般有 3 个重要参数:块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)和变程(a)。另外分维数(D)也是评价区域化变量变异程度的一个重要参数。

2 结果与讨论

2.1 数据的正态分布检验和最大分析尺度的确定

半方差函数通过测定区域化变量分隔等距离的样点间的差异来研究变量的空间相关性和空间结构。进行空间相关分析的变量必须满足正态分布,并且由随机抽样的方式而获得。数据的非正态分布会使方差函数产生比例效应,抬高基台值和块金值,降低估计精度,使某些潜在的特征表现不明显,甚至会掩盖其固有的结构^[8]。

为了检验这些实验数据是否符合半方差函数分析的条件,我们用 Kolmogorov—Smirnov (K—S) 正态分布检验概率(P_{K-S})对它们进行了检验。检验时取显著性水平 $\alpha = 0.05$,若 $P_{K-S} > 0.05$,则认为数据服从正态分布。由表 1 可以得出,0—10、10—20 和 20—30 cm 层 SOC 含量在 0.05 水平上都表现正态分布,并且下面 2 层数据优于 0—10 cm 层。另外数据还表现出 SOC 平均含量由表层向下减少,10—20 cm 土层变异最小,20—30 cm 土层有机碳含量变异最大。这主要与测定区域耕作措施和种植制度有关,20 cm 以下土壤受耕作活动影响微弱,原始土壤的高变异得以继承。

用规则网格采集土壤样品,样点间的最大长度是给定的,随着间隔距离 h 的增大,点对的数量 $N(h)$ 逐渐变小,并且某些依赖变量不再对 $\gamma(h)$ 有贡献。因此作为统计量, $\gamma(h)$ 应该有一定的范围限定。一般认为当 $\gamma(h)$ 取样线长度的 1/3 或 1/2 时, $\gamma(h)$ 才具有统计意义上的代表性;同时,步长 h 不能小于相邻两点间的最小距离^[10]。

故本研究在应用这个方法进行分析时,取样点距离的一半,即 12 个距离单位 120 m 作为最大分析尺度。取步长为 1 个距离单位 10 m,这样就可划分为 11 个距离段。

表 1 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—30 cm 土层有机碳描述性统计

土层深度/cm	平均值	标准差	离差系数/%	最大值	最小值	偏度 S_k	峰度 K_u	P_{K-S}
0—10 cm	1.39	0.15	10.79	1.80	0.64	-0.30	2.74	0.055
10—20 cm	1.27	0.12	9.69	1.62	1.01	0.33	-0.18	0.067
20—30 cm	1.17	0.19	15.82	1.81	0.72	0.24	0.95	0.065

2.2 表层 SOC 含量的空间异质性

区域化变量的结构分析是以变异函数模型为基础,这也是变异函数的主要功能之一。球形半方差函数表明的是聚集分布,它的空间结构是当样点间隔距离达到变程之前时,样点的空间依赖性随样点的距离增大而逐渐减低。指数型与球形模型类似但其基台值是渐变线,非水平状直线,其半方差函数表明数据是中等程度的聚集分布,空间依赖范围超过研究尺度。随机分布中的 (h) 随距离没有一定规律的变化,为完全随机或均匀的数据, (h) 呈直线或者稍有斜率,块金值等于其基台值,这就表明在抽样尺度下没有空间相关性。由表 2 可以看出,这 3 层土壤 SOC 的基台值远远大于块金值,表明在全方向上 SOC 具有明显的空间结构。0—10 cm 土层 SOC 半方差函数与步长 h 的关系符合指数模型,而 10—20 cm 和 20—30 cm 土层 SOC 半方差函数与步长 h 关系符合球状模型,并且随着步长 h 的增大,差异也逐渐增大。0—10, 10—20 和 20—30 cm 这 3 个土壤层的变程分别为 42.3, 49.1 和 69.1 m, SOC 变异范围随深度增加而增大,超过变程范围有机碳区域化变量空间相关性不存在。

块金方差与基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 反映的是随机因素引起的空间异质性 SH_R 占总空间异质性的百分比。如果这个值较大,相应块金效应就较小,说明在小尺度空间中被研究对象变化较小,亦说明当前的采样密度对于所进行的研究是足够的。块金值、块金

方差与基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 随深度的增加,说明随机因素对空间异质性的贡献沿深度增加(表 2),分别占总空间异质性的 15.2%, 36.67% 和 43.24%,并且主要表现在 10m 以下的小尺度范围内。如果比例 $< 25\%$, 说明变量具有强烈的空间相关性;比例在 $25\% \sim 75\%$ 之间,变量具有中等的空间相关性;比例 $> 75\%$ 时,变量空间相关性很弱^[11]。可见,0—10 cm 层 SOC 具有强烈的空间相关性,而 10—20 cm 和 20—30 cm 层 SOC 具有中等程度的相关性,空间相关性随深度增加减弱,随机性增强。说明了表层 20 cm 土壤受土壤侵蚀及再分布的影响,坡脚和坡足等沉积部位表层土壤来源于坡上部位,有机碳含量较低。20 cm 以下影响减弱。

分维数 D 的大小表示变异函数的曲率。变量 D 值之间的比较可以确定空间异质性程度^[12]。一般分维数 D 越大,它所表现的空间分布越复杂^[13]。

由表 2 可以看出 20—30 cm 土层的 SOC 含量明显比 0—10 cm 和 10—20 cm 土层的 SOC 含量分布趋向于简单,这种趋势在图 2 也可以看出。空间结构的变化可以描述为:上层 SOC 含量受土壤耕作及土壤侵蚀作用的影响,其分布为较大尺度聚集型,随着土壤深度的增加,土壤耕作及土壤侵蚀作用对 SOC 含量的影响减弱,其分布转化为大尺度上随机型分布。

R^2 和 R_{SS} 是用来说明模型对被研究对象的解释效率。可见越往下层 SOC 的变异函数越接近球状模型。

表 2 各向同性下不同土层 SOC 变异函数理论模型及相关参数

土层深度/cm	理论模型	C_0	$C_0 + C$	$C_0/(C_0 + C)$	a	D	R_{SS}	R^2
0—10	指数模型	0.0038	0.025	0.1520	42.3	1.938	1.81E-05	0.76
10—20	球状模型	0.0055	0.015	0.3667	49.1	1.932	2.42E-05	0.57
20—30	球状模型	0.0160	0.037	0.4324	69.1	1.905	1.77E-05	0.93

为研究半方差函数在不同方向上的特点,即各向异性,对不同方向的半方差函数也进行计算。计算时将全方位平均分为 4 个角度: 0° , 45° , 90° 和 135° 分别代表东—西,东北—西南,南—北,西北—东南方向。同样根据表 3 各向异性模型可以看出,变程和 $C_0/(C_0+C)$ 随深度的变化和各向同性相同,空间自相关

性随深度增加而减弱。另外,由图 1 可知南—北 (90°) 方向即顺坡方向,与垄向平行,其半方差随空间距离 h 的增大呈指数递增,无基台值和变程,表明土壤侵蚀和再分布过程在 SOC 空间分异中起着主导作用。东—西 (0°) 方向上 SOC 半方差函数基本上符合球状模型,有基台值和变程,表现出与全方向相似的

空间相关性和变异特征。SOC 的空间相关性随土壤深度减弱,随机性增强。这是因为 SOC 分布是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。结构性因素如气候、母质、地形、土壤类型等可以导致 SOC 强的空间相关性。而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土壤养分的空间相关性减弱,朝均一化方向发展。表层 SOC 空间相关性较强,可能的原因是土壤侵蚀及迁移的土壤物质在不同地貌部位发生再分布。另外,土壤侵蚀导致侵蚀区土壤水分及养分条件比沉积区差,进而影响归还到土壤中的植物残体数量和有机碳含量。其它 2 个方向表现强烈的随机性。

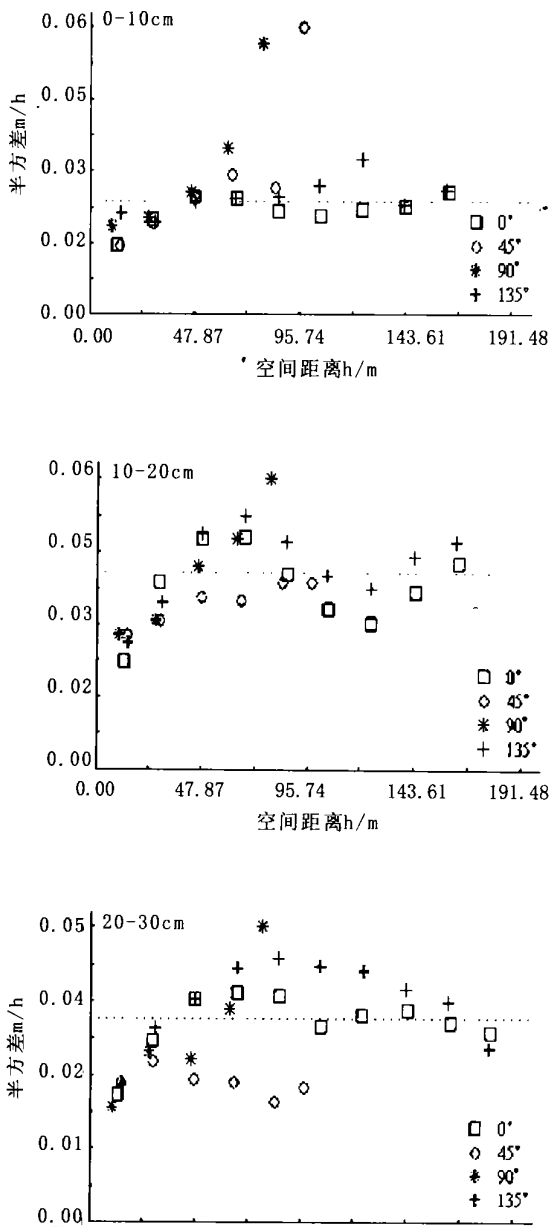


图1 不同土层 SOC 在 4 个方向上的半方差变异函数

2.3 坡耕地表层 SOC 空间分布格局

土壤特性的空间变异性,取决于土壤母质的性质和地形位置,并与气候、降雨和农业措施等有关^[14]。地形影响水热条件和成土物质的再分配,因而不同地形位置有着不同的土壤特性。通过块段 Kriging 插值后,我们发现 0—10, 10—20 和 20—30 cm 这 3 个土层的 SOC 含量表现出相似的变化趋势(图 2),即坡肩部位 SOC 含量最低,其次为坡脚和坡足,坡顶和坡背 SOC 含量较大。这是因为坡肩位于坡顶和坡背的转折点,坡度最大,土壤侵蚀也最为强烈,SOC 大量流失;同时也与该部位长期恶劣的土壤条件(如水分、温度及营养元素)有关。坡顶和坡背坡度相近,因坡度相似的位置土壤特性趋于一致^[15],SOC 含量比较相近。坡脚和坡足部位的 SOC 含量低于坡顶部位,正好说明其表层土壤物质来源于坡上部位的侵蚀物质,同时说明坡上部位暴露出较低的土壤层次;另外,因坡脚和坡足部位的水分和温度条件优于侵蚀部位,所以 SOC 易于累积,比坡肩部位略高。

0—10 cm 层 SOC 等值线较密,SOC 梯度变化明显。随着土壤深度的增加,SOC 含量等值线变得稀疏,说明 SOC 随土壤深度增加变异逐渐减小。这与半方差函数中参数 $C_0 / (C_0 + C)$ 的变化趋势相一致。我们将 SOC 含量分为高含量 (> 1.5%), 中等含量 (1% ~ 1.5%) 和低含量 (< 1%) 3 个等级。由表 4 可以看出,高含量的 SOC 随深度增加下降,而中等含量的 SOC 先增加后下降,低含量 SOC 有增加的趋势。这种现象说明耕层 SOC 变化可能是由高含量的 SOC 正在转变为中等含量的有机碳,同时低含量 SOC 也表现有增加的趋势。

3 结论

基于经典统计学和地统计学理论基础上的坡耕地黑土有机碳空间分布特征研究发现,不同土层深度 SOC 都表现明显的空间相关性,说明 SOC 作为土壤属性之一,不是纯随机变量,是具有随机性和结构性的区域化变量。SOC 在不同方向上的半方差函数表明,随土壤深度增加,空间自相关性减弱,随机性增强。说明结构性因素如土壤发生因素中的气候、地形等起着决定性作用,但人类活动的影响也不可忽视,它降低了空间的相关性,使 SOC 含量朝着均一化的方向发展。不同方向上自然因素和人为因素作用存在很大差异,南—北方向上农民纵向打垄加剧了土壤再分布,该方向上 SOC 的空间变异完全为土壤再分布过程所控制;而东—西方向上 SOC 的空间变异则为土壤发生因素所引起。用 Kriging 无偏最优插值

绘制坡耕地 SOC 的分布图,发现地形和土壤再分布过程 SOC 分布的主导因子, SOC 含量变化是高含量有机碳转变为中等含量的有机碳和低含量的有机碳,充分揭示 SOC 在量上的变化过程。

表 3 各向异性下不同土层有机碳变异函数理论模型及相关参数

土层深度/cm	理论模型	C_0	$C_0 + C$	$C_0 / (C_0 + C)$	变程 a_1	变程 a_2	RSS	R^2
0—10	线性模型	0.015	0.083	0.181	407.3	407.3	3.33E-03	0.503
10—20	线性模型	0.011	0.037	0.297	454.4	454.4	4.02E-04	0.497
20—30	线性模型	0.026	0.076	0.342	515.5	515.5	1.47E-03	0.494

表 4 SOC 含量随深度变化的空间分布格局

土层深度/cm	>1.5%SOC 面积/m ²	百分比/%	1%~1.5%SOC 面积/m ²	百分比/%	<1%SOC 面积/m ²	百分比/%
0—10 cm	4 138.75	14.03	25 309.82	85.78	58.16	0.20
10—20 cm	367.13	1.24	29 139.60	98.76	0.00	0.00
20—30 cm	344.63	1.17	24 142.04	81.82	5 364.69	18.18

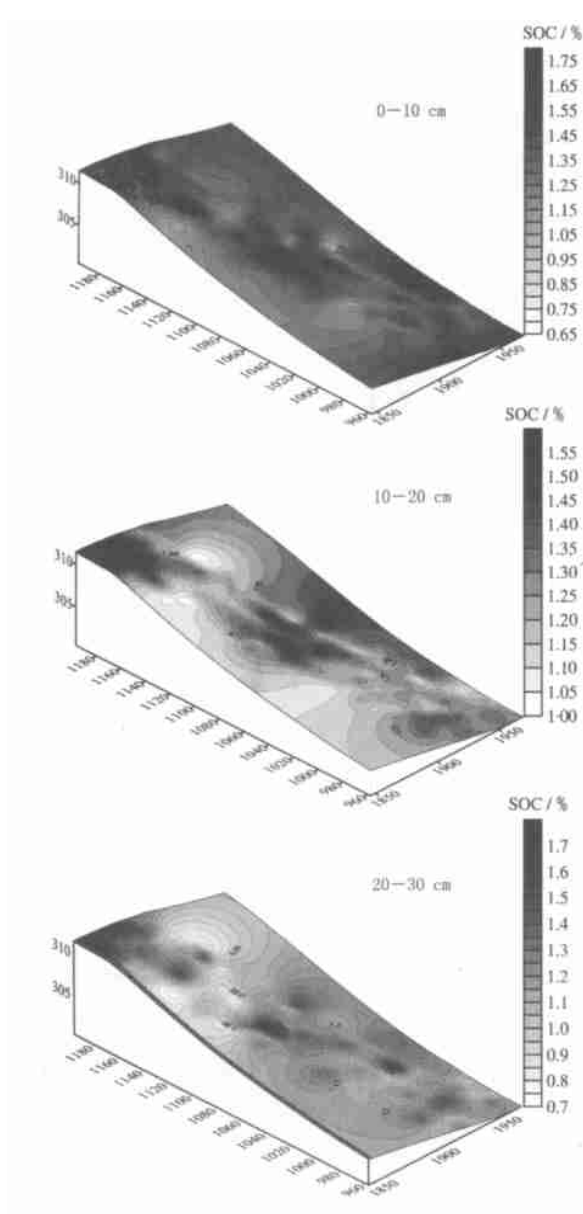


图 2 不同土层 SOC 的块段 kriging 插值

[参 考 文 献]

- [1] 候景儒,郭先裕. 矿床统计预测及地统计学的理论与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1993.2—15.
- [2] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field [J]. *Advanced in Soil Sci*,1985(3):1—71.
- [3] 张朝生,章申,何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法[J]. *地理学报*,1997,52(2):184—192.
- [4] Salazar A, stein A, Znck J A. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River (Spain) [J]. *Catena*, 1998,33:139—153.
- [5] Bergstrom D W, Monreal C M, Jacques E St. Spatial dependence of soil organic carbon mass and its relationship to soil series and topography[J]. *Canadian Journal of Soil Science*. 2001,81:53—62.
- [6] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems[J]. *Ecology*, 1996,77(2):364—374.
- [7] 白永飞,许志信,李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性[J]. *生态学报*,2002,22(8):1215—1223.
- [8] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999.35—96.
- [9] 李艳,史舟,徐建明,等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望[J]. *水土保持学报*,2003,17(1):78—182.
- [10] 姜勇,张玉革,闻大中,梁文举. 沈阳市郊耕地土壤交换性铁含量的空间异质性[J]. *水土保持学报*,2003,17(1):119—121.
- [11] 赵斌,蔡庆华. 地统计学分析方法在水生生态系统研究中的应用[J]. *水生生物学报*,2000,24(5):514—520.
- [12] 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.

(下转第 28 页)

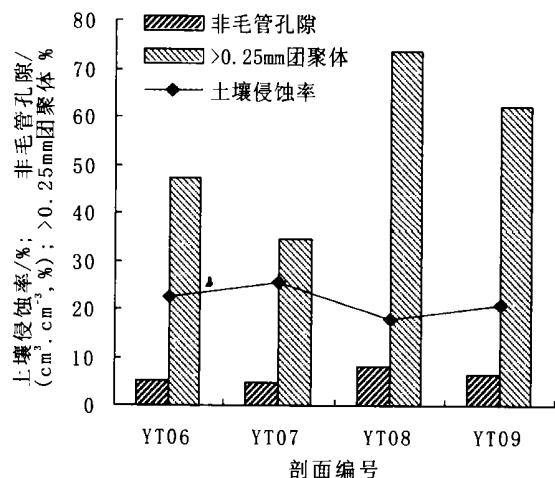


图 2 表层土壤侵蚀率与非毛管孔隙、>0.25 mm 团聚体关系
考虑该区桉柏混交人工林曾起到的水土流失治理效果及其它区域的类似研究成果,研究区土壤结构性差、侵蚀严重的更深层原因可能是该区林分种类单一、群落结构简单、林下枯落物和土壤有机质含量少,同时,我们在土壤微形态薄片中也观察到较多的土壤有机物质矿质化现象而非腐殖质化。参考相关文献,建议人为增加林下地面覆盖物以提高土壤团聚体稳定性^[14]、林下栽植灌木和草本植物以改造人工林群落结构减弱雨滴对土壤的击打^[15]。

[参 考 文 献]

- [1] 钟祥浩. 盆中丘陵区生态恢复重建的生态与经济效益亟待提高[J]. 山地学报, 2001, 19(增): 4—8.
- [2] 钟祥浩, 刘淑珍, 范建容. 长江上游生态退化及其恢复与重建[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(2): 157—162.
- [3] Reichert J M, et al. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and rewetted clayey surface soils

under intense rain[J]. Soil Sci. 1994, 158: 159—169.

- [4] Le Bissonnais, Arrouays. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: 2. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents[J]. Eur. J. Soil Sci. 1997, 48: 38—48.
- [5] Bernard Barthes Eric Roose. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels[J]. Catena. 2002, 47: 133—149.
- [6] Bernard Barthes, Eric Roose. 表层土壤团聚体稳定性对径流及土壤侵蚀的影响[J]. 中国水土保持, 2002(7): 23.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [8] 中国农业百科全书编辑委员会. 中国农业百科全书——土壤卷[M]. 北京: 农业出版社: 316.
- [9] 田积莹, 黄义端. 子午岭连家砭地区土壤物理性质与土壤抗蚀性能指标的初步研究[J]. 土壤学报, 1964, 12(3): 286—296.
- [10] 林光耀, 杨玉盛, 杨伦增, 等. 杉木林取代杂木林后土壤结构特性变化的研究[J]. 福建林学院学报, 1995, 15(4): 289—292.
- [11] 邱仁辉, 杨玉胜, 俞新妥. 不同栽植代数杉木林土壤结构特性研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 6—11.
- [12] 尹建道, 姜志林. 日本的森林水土保持效益及防灾对策[J]. 南京林业大学学报, 1999, 23(2): 63—66.
- [13] 吴长文, 王礼先. 林地土壤孔隙的贮水性能分析[J]. 水土保持学报, 1995, 2(1): 76—79.
- [14] F. Caravaca, T. Hernandez, C. Garcia, et al. Improvement of rhizosphere aggregate stability of afforested semiarid plant species subjected to mycorrhizal inoculation and composted addition[J]. Geoderma. 2002, 108: 133—144.
- [15] 王礼先主编. 水土保持学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995. 139—141.

(上接第 24 页)

- [13] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征: 半变异函数[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 428—438.
- [14] 宋新山. 松嫩平原西部水土化学场的研究[D]. 中国科学院长春地理研究所, 2001.
- [15] Berndtsson R, Bahri A, Jinno K. Spatial dependence of

geochemical elements in a semiarid agricultural field: II. Geostatistical properties[J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57: 1323—1329.

- [16] Mulla D J. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield[A]. In: Robert P C, Rust R H and Larson W E, eds. Soil specific crop management[C]. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. 1993. 15—26.