

# 中国农业大学上庄实验站土壤理化性质的空间分布特征

胡克林 李保国 吕贻忠 段增强 李子忠 李贵桐 孙丹峰

(中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100094)

**摘要** 对中国农业大学上庄实验站面积约 70 hm<sup>2</sup> 的试验区布设了 68 个观测点, 测定了其表层土壤基本理化性质(质地、容重、pH、电导率、速氮、速磷、速钾、有机质、微量元素等)。应用传统统计学和地统计学方法对数据进行分析, 结果表明: 除 pH 变异系数为 0.02 外, 其余土壤理化性质的变异系数范围为 0.12~0.77, 均属中等变异强度。半方差函数分析结果表明: 除微量元素 Mn 和 Zn 表现为纯块金效应外, 其余土壤理化性质在一定范围内均存在空间相关关系, 其中表层土壤颗粒组成和阳离子交换量的空间相关距离最大, 表现在全区均有相关性; 其次, CaCO<sub>3</sub> 含量和速效 Fe 的空间相关距离较大, 分别为 603 m 和 541 m; 其余土壤理化性质的相关距离范围为 180~477 m。采用 Kriging 最优内插方法对未测点进行了估值, 并绘制了土壤理化性质的空间分布等值线图, 分析表明其含量产生差异的主要原因是土壤母质、土地利用方式、施肥、耕作等因素的影响。

**关键词** 土壤理化性质; 地统计学; 半方差函数; 空间分布

中图分类号 S 153

文章编号 1007-4333(2006)06-0027-07

文献标识码 A

## Spatial variation of physico-chemical properties in Shangzhuang experimental station of China Agricultural University

Hu Kelin, Li Baoguo, Lü Yizhong, Duan Zengqiang, Li Zizhong, Li Guitong, Sun Danfeng

(College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract** Sixty-eight topsoils were sampled in Shangzhuang experimental station of China Agricultural University. Soil texture, bulk density, pH, EC, available nutrients, soil organic matter and micronutrients were determined for each soil sample. Descriptive statistics and geostatistics were used to analyze the data and the results indicated that the coefficient of variation (CV) for soil pH was 0.02, and the CVs for the other soil properties were in the range of 0.12~0.77, which belonged to middle intensity. Semivariance analysis showed that all the soil properties had the spatial correlation in some distances, except for soil available Mn and Zn. Soil texture and CEC had the largest spatial correlation distance and soil CaCO<sub>3</sub> and available Fe had the second largest spatial correlation distance, which were 603 m and 541 m, respectively. The spatial correlation distances for the others ranged from 180 m to 477 m. The Kriging method was used to estimate the unobserved points and generated the contour map. The results showed that their content difference was mainly caused by soil parent material, land use type, fertilizer application and cultivation.

**Key words** soil physico-chemical properties; geostatistics; semivariance; spatial distribution

土壤质量的变化对全球气候有重要影响, 直接关系到农业的可持续发展。国外很早以前就建立了大量的土壤长期定位试验站, 对土壤变化进行相关研究。我国于 20 世纪 70—80 年代也相继建立了一批土壤长期定位实验站, 主要研究各种培肥措施对

土壤肥力的影响<sup>[1-4]</sup>。在进行土壤定位的研究过程中必须根据土壤的空间变异特性进行试验设计和取样分析, 以获得可靠的结果<sup>[5]</sup>。近年来, 土壤特性空间变异及精确农业的研究一直是土壤学科关注的热点<sup>[6-7]</sup>。国外已有用地统计方法对农田土壤理化

收稿日期: 2006-08-08

基金项目: 中国农业大学科学技术处专项基金资助

作者简介: 胡克林, 博士, 副教授, 主要从事土壤空间变异和溶质运移研究, E-mail: hukel@cau.edu.cn; 李保国, 教授, 通讯作者, 主要从事资源环境信息技术的研究, E-mail: libg@cau.edu.cn

性质的空间变异特征的研究<sup>[8-9]</sup>。我国从20世纪80年代才开始将地统计方法引入到土壤学科中<sup>[10-15]</sup>。大多数研究结果表明,土壤理化性质的变异系数属中等变异强度,存在明显的空间自相关结构,主要揭示了区域因素(气候、母质、土壤类型等)以及人为因素(施肥、灌溉、耕作、土地利用方式等)对其空间变异的影响<sup>[16-18]</sup>。

中国农业大学上庄实验站建立于2004年9月,位于北京市海淀区西部上庄村,地貌属于华北山前冲积平原,面积约70 hm<sup>2</sup>(约1 000亩)。实验站的建立为学校师生开展科学研究提供了良好的科研平台。该站立足于长期定位研究,主要从事作物育种、耕作栽培、病虫害防治、土壤培肥、节水以及农田生态系统的长期演变监测等多个学科的田间实验研究工作,同时也进行部分的教学示范工作,但目前对该实验站土壤基本理化性质的认识尚处于空白。因此,本研究以该区为研究对象,通过野外调查和采样分析,运用地统计方法对其土壤基本理化性质(容重、pH、电导率、速氮、速磷、速钾、有机质等)的空间分布特征进行研究,旨在为该区开展科学研究积累基础背景资料,同时为实验站下一步制定详细的土地利用规划布局提供理论依据,对于该区进行土壤改良、合理的水肥和耕作管理措施具有一定的参考价值。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究方法

研究区总面积约70 hm<sup>2</sup>,粉砂质潮土。该地冬小麦-夏玉米一年二作,在公路南侧靠近西侧地势低洼处种植有水稻(图1)。将研究区划分成68个100 m × 100 m的网格,根据GPS导航和定位在每个网格中心设置取样点,采取表层(0~20 cm)土样,采样时间为2004-04-18—04-23,地形测量工作于2004年3月完成(图1)。公路北侧的地形高差比较小,而南侧地形高差起伏较大。整个实验站最高点位于北部地块西北角,最低点位于南部地块水稻种植区,最大高差3.2 m。

### 1.2 测定项目及方法

土壤质地用吸管仪法测定;土壤容重用环刀法测定;pH,水土比2.5:1,用精密酸度计测定;土壤电导率,水土比5:1,用DDS-11AT电导率仪测定;速效氮(硝态氮+氨态氮),用水土比为10:1的1 mol/L KCl溶液浸提,采用自动流动分析仪

(TRAACS2000)测定;速效磷(Olsen-P),0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>浸提,分光光度计比色法测定;速效钾:1 mol/L NH<sub>4</sub>AC浸提,火焰光度计测定;有机质(OM),外热源法;阳离子交换量(CEC),(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-NH<sub>4</sub>Cl快速法(石灰性土壤);土壤CaCO<sub>3</sub>,快速中和滴定法;铁、锰、铜、锌,采用DTPA浸提,原子吸收分光光度计测定。

采用地统计学软件GS+(5.3)进行数据处理,Winsurf(7.0)软件绘制图形。

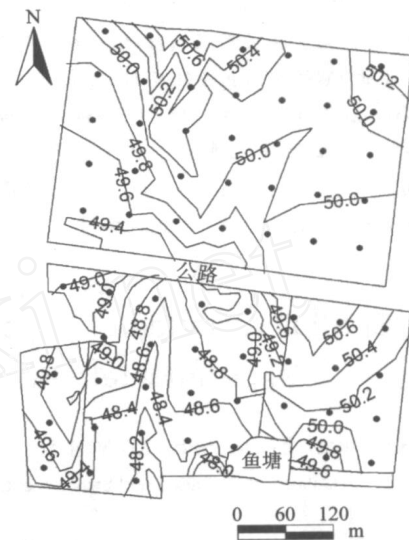


图1 取样点及研究区地形等高线分布图

Fig. 1 Sampling sites and topography in study area

## 2 结果分析

### 2.1 土壤理化性质的描述性统计

对田间实测样本的统计分析和Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验结果见表1。从偏态系数和峰态系数可以看出,表层土壤颗粒组成(砂粒、粉粒和粘粒)、容重、pH、有机质和速效Cu含量均服从正态分布,速效P、速效K、CEC、CaCO<sub>3</sub>、速效Fe和速效Zn含量服从对数正态分布,而表层土壤电导率、速效N和速效Mn的分布最复杂,既不服从正态分布也不服从对数正态分布,可能与Mn价态较多,易氧化还原有关。

表层土壤基本理化性质的变异系数范围为0.02~0.77,其中表层土壤pH的变异系数最小,为0.02,属于弱变异强度,表层土壤粘粒、EC、速效N、速效P、CaCO<sub>3</sub>、速效Fe和速效Mn的变异系数较大,范围为0.60~0.77,其余土壤性质的变异系数范围为0.12~0.52。所有样点属中等变异强度<sup>[19]</sup>。

表层土壤颗粒组成中:粘粒含量的变化范围较大,为 1.54%~28.00%,而砂粒和粉粒含量的变化范围不大,最大值约是最小值的 3~5 倍。表层土壤容重大小的范围为 1.01~1.58 g/cm<sup>3</sup>,最大值约是最小值的 1.5 倍;表层土壤 pH 的变化范围为 7.65~8.39,说明该地属于石灰性土壤;速效 N 的极值相差最大,其最大值(109.77 mg/kg)约是最小值(0.95 mg/kg)的 100 多倍。土壤电导率、速效磷、

有机质、CaCO<sub>3</sub>、速效 Fe 和速效 Mn 的极值相差也较大,最大值约是最小值的 10 倍多;微量元素 Cu 和 Zn 的极值相差较小,最大值约是最小值的 6~8 倍,而速效钾和 CEC 的极值相差最小,最大值约是最小值的 3 倍。说明研究区域内土壤理化性质有较大的差异,造成这种情况的原因可能是种植的作物种类不同、施肥不匀、秸秆还田的比例和数量以及周边环境不同而造成的。

表 1 实验区表层土壤基本理化性质的描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistics of soil physico-chemical properties in the study area

土壤属性	分布类型	偏态数	峰态数	均值	标准差	最小值	最大值	变异系数
砂粒/ %	正态	0.05	-0.43	32.37	10.08	12.00	56.00	0.31
粉粒/ %	正态	-0.57	1.40	55.17	7.58	28.00	72.00	0.14
粘粒/ %	正态	0.21	-1.24	12.46	9.54	1.54	36.00	0.77
容重/ (g/cm <sup>3</sup> )	正态	0.00	-1.04	1.30	0.15	1.01	1.58	0.12
pH	正态	-0.84	0.51	8.13	0.17	7.65	8.39	0.02
电导率/ (dS/m)	偏态	1.68	4.77	0.18	0.11	0.09	0.89	0.61
速效 N/ (mg/kg)	偏态	-1.78	6.97	20.56	13.81	0.95	109.77	0.67
速效 P/ (mg/kg)	对数正态	-0.01*	-0.50*	11.17	6.90	2.85	37.45	0.62
速效 K/ (mg/kg)	对数正态	0.22*	-0.36*	74.58	20.82	39.16	142.72	0.28
有机质/ (mg/kg)	正态	0.21	-0.45	10.88	4.70	2.37	23.05	0.43
CEC/ (cmol/kg)	对数正态	-0.08*	0.55*	14.03	3.07	8.06	24.50	0.22
CaCO <sub>3</sub> / (g/kg)	对数正态	0.31*	-0.61*	42.95	25.82	13.14	120.10	0.60
速效 Fe/ (mg/kg)	对数正态	0.53*	0.12*	23.25	14.73	6.88	75.80	0.63
速效 Mn/ (mg/kg)	偏态	1.02*	3.46*	12.84	7.64	4.38	56.76	0.60
速效 Cu/ (mg/kg)	正态	0.68	0.43	3.06	1.13	1.04	6.50	0.47
速效 Zn/ (mg/kg)	对数正态	0.55*	0.00*	0.71	0.37	0.24	1.97	0.52

注: \*原始数据经对数转换后计算得到。

## 2.2 土壤理化性质的空间结构分析

在选取土壤性质的半方差模型时,首先计算出  $r(h) \sim h$  的散点图,然后用不同类型的模型进行拟合,计算得到模型的参数及离差平方和,选取离差平方和最小即拟合度最好的模型类型<sup>[20]</sup>,各项目的半方差模型及其参数值见表 2。

可以看出,除微量元素 Mn 和 Zn 表现为纯块金效应外,其余土壤理化性质在一定范围内均存在空间相关关系,其中表层土壤颗粒组成(砂粒、粉粒和粘粒)和 CEC 的空间相关距离最大,表现在全区均有相关性,主要是由于土壤颗粒组成和 CEC 的大小受到成土条件的影响,均与土壤母质的性质如土壤

矿物类型等密切相关。其次,土壤 CaCO<sub>3</sub> 和速效 Fe 的变程也较大,分别为 603 和 541 m,由于两者含量不仅与土壤母质的性质有关,而且与施肥灌溉等人为活动也有关,故其变程较大。另外,有机质和容重的变程也较大,分别为 477 和 410 m,两者含量大小都与区域因素有关。有机质的含量主要受土壤类型、土地利用方式和是否施用有机肥等因素的影响;土壤容重的主要影响因素是农业种植和耕作制度,与土壤有机质含量也有关。其余土壤理化性质的变程均较小,范围为 180~266 m,主要是它们受到施肥灌溉等随机因素的影响比较大,导致其在一个较小的尺度范围内相关。

表2 实验区表层土壤基本理化性质半方差函数模型的类型及其参数值

Table 2 Semivariogram models and their parameters of soil physio-chemical properties in the study area

土壤属性	模型类型	$C_0$	$C_0 + C_1$	$C_0 / (C_0 + C_1)$	变程/m	拟合度 $R^2$
砂粒	高斯模型	60.7	162.7	0.373	1193	0.969
粉粒	球状模型	28.9	69.61	0.415	813	0.947
粘粒	高斯模型	28.9	200.5	0.144	1249	0.975
容重	球状模型	0.016	0.023	0.286	410	0.896
pH	球状模型	0.0024	0.028	0.086	231	0.741
电导率	指数模型	0.018	0.14	0.124	258	0.656
速效 N	球状模型	22.1	63.96	0.336	180	0.686
速效 P	球状模型	0.02	0.38	0.053	221	0.911
速效 K	球状模型	0.038	0.076	0.499	266	0.217
有机质	球状模型	17.01	22.83	0.746	477	0.574
阳离子交换量	球状模型	0.018	0.057	0.332	830	0.779
CaCO <sub>3</sub>	球状模型	0.16	0.34	0.528	603	0.876
速效 Fe	球状模型	0.0695	0.321	0.217	541	0.956
速效 Mn	块金效应	0.003	—	1	< 100	—
速效 Cu	指数模型	0.19	1.35	0.141	246	0.871
速效 Zn	块金效应	0.0147	—	1	< 100	—

注: 块金效应; 基台值; 空间异质性程度; 亦称相关距离, 当某变量观测点之间的距离小于该值时, 说明它们之间存在相关关系, 否则各因素是相互独立的。

$C_0 / (C_0 + C_1)$  表示空间异质性程度<sup>[3]</sup>, 土壤速效 Mn 和速效 Zn 的该比值为 1, 说明速效 Mn 和 Zn 在整个研究区具有恒定的变异, 即各取样点之间相互独立<sup>[20]</sup>。土壤有机质和 CaCO<sub>3</sub> 含量的该比值均大于 0.5, 说明土壤有机质和 CaCO<sub>3</sub> 含量的总变异中由随机因素引起的空间异质性程度较大, 而由空间自相关部分引起的空间异质性程度较小, 其余土壤理化性质的该比值均小于 0.5, 反映其在所研究的尺度上具有较强的空间自相关格局, 目前虽然受到一些施肥、灌水等小尺度因素的影响, 但还没有达到破坏其原有空间格局的程度。

### 2.3 土壤理化性质的空间分布特征

为了更直观地反映试验区土壤理化性质的空间分布情况, 根据半方差函数模型, 利用 Kriging 最优内插法, 绘制了等值线图(图 2 和 3), 分别对表层土壤理化性质的空间分布特征进行具体分析。

从图 2 可以看出, 试验区表层土壤砂粒含量的分布表现为从西北向东南递增的趋势, 而土壤粘粒含量表现为相反的趋势, 粉粒含量呈西高东低的趋

势, 造成这种现象的主要原因是该研究区位于华北山前冲积平原, 土壤母质主要是永定河冲积物, 土壤颗粒大小组成(砂粒、粉粒和粘粒)与河流的方向、水流速度及时间长短有关。

试验区表层土壤容重高的地方在公路北侧偏西的位置(图 2(d)), 最高达 1.58 g/cm<sup>3</sup>; 土壤容重低的地方在西南方向, 仅 1.01 g/cm<sup>3</sup>。公路北边西侧地块的土壤容重要比东侧的高, 主要原因是西侧的地块未经过翻耕, 而东侧的地块经过翻耕, 导致了东侧的地块比较疏松多孔, 造成容重偏低。公路南侧土壤容重较高处主要是水稻种植区, 南侧另一土壤容重较高处, 是一个废弃砖厂, 大部分表土已经被挖走, 剩余为底土层, 故土壤容重较高。

试验区表层土壤 pH 大部分在 8 左右(图 3(a)), 说明该地属于典型的石灰性土壤(7.5~8.5)。pH 的总体分布规律是西高东低; 高的地方在西南角, 最高达 8.39; 低的地方在东北角, 最低为 7.65; 造成土壤 pH 差异的主要原因有: 土地利用方式不同, 试验区西南部由于地势低洼, 地下水位较浅, 长

期种植水稻,表层土壤经常处于还原条件,土壤  $\text{Fe}^{3+}$  还原成  $\text{Fe}^{2+}$ ,导致水稻地的 pH 比旱地的高;其次,稻田有机质分解速度慢,释放的酸根离子较少。

此外,施肥灌水措施的不同对土壤 pH 也有一定的影响,如施用生理酸性肥或有机肥会导致土壤 pH 降低。

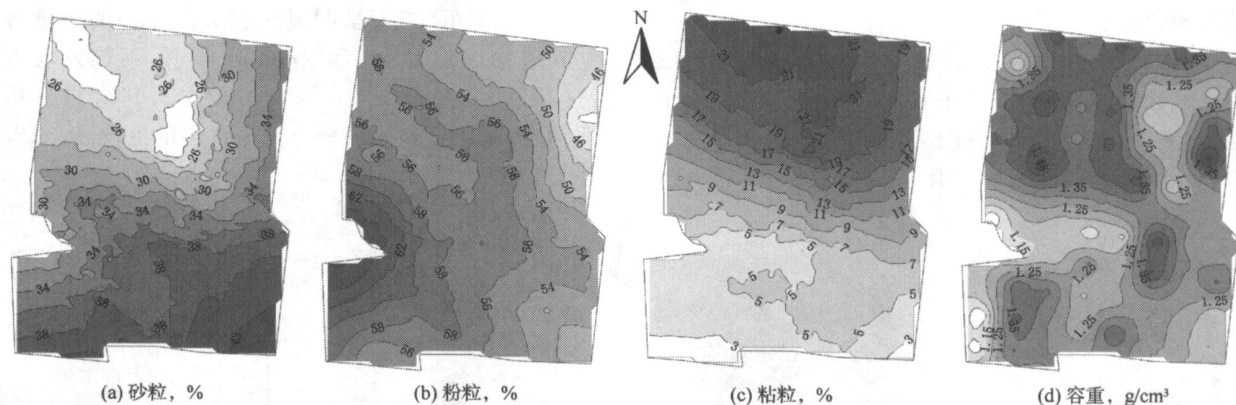


图 2 实验区表层土壤基本物理性质空间分布等值线图

Fig. 2 Contour maps of soil physical properties in the study area

全区表层土壤的电导率除西北部较高外,其余地方的电导率值在  $0.15 \sim 0.2 \text{ dS/m}$  左右(图 3(b))。电导率最高的地方在西北部,最大值达到了  $0.89 \text{ dS/m}$ ,而含量最低的地方在北区的中间部位,仅  $0.093 \text{ dS/m}$ 。

速效氮含量的空间分布规律与 EC 类似(图 3(c)),总体表现为北区大于南区;在北区,西边大于东边。速效氮含量高的地方主要分布在北区西部,最大值为  $109.77 \text{ mg/kg}$ ,而含量低的地方在西南方向,最小仅  $0.95 \text{ mg/kg}$ 。

速效磷的分布趋势为西高东低(图 3(d)),含量比较高的地方主要在试验区的中部,最高值为  $37.45 \text{ mg/kg}$ ,低的地方在东北角,最低值为  $2.85 \text{ mg/kg}$ 。

速效钾含量的空间分布规律与速效磷有些类似(图 3(e)),含量高的地方分布在试验区的中部,最高达到  $142.72 \text{ mg/kg}$ ,试验区的两侧含量低,最小值仅为  $39.16 \text{ mg/kg}$ ;主要原因除了土壤母质的影响外,农业管理措施如施肥、秸秆还田等的影响是主要的。在试验区中间南北向一个带状区域速效钾的含量较周围地区高,这主要是人为因素造成的,经现场勘察,发现该区有秸秆焚烧过的痕迹。

有机质含量总体分布表现为南高北低(图 3(f)),南区中西侧大于东侧。有机质含量高的地方主要分布在南区西边,最大值为  $23.1 \text{ g/kg}$ ,其主要原因是该区种植水稻,由于水稻地经常处于高含水量的还原状态,导致有机质的分解比较慢,容易积

累。在北区的东部有机质含量低,最小值仅  $2.4 \text{ g/kg}$ ,其主要原因是该区已经过耕翻,通气性较好,有利于微生物的活动,加速了有机质的分解。

阳离子交换量(CEC)呈西高东低的趋势(图 3(g))。CEC 高的地方在试验区的西边中部,最大值为  $24.50 \text{ cmol/kg}$ ;CEC 低的地方在东北角,最小值为  $8.07 \text{ cmol/kg}$ 。引起 CEC 差异的主要因素有:有机和无机胶体以及有机无机复合体的数量。通过对比有机质含量分布图(图 3(f))发现,在有机质含量高的西南部,其 CEC 也高。另外,北区西边 CEC 高的原因可能与该区粉粒含量较高有关。

$\text{CaCO}_3$  含量也呈西高东低的趋势(图 3(h)),其含量高的地方主要集中在南区西侧,最大值达到  $120.1 \text{ g/kg}$ ,主要原因是该区土壤均由冲积母质形成,典型的石灰性母质是  $\text{CaCO}_3$  含量的主要来源,故土壤中的  $\text{CaCO}_3$  含量普遍较高。 $\text{CaCO}_3$  含量低的地方主要分布在试验区的东侧,最小值仅为  $13.1 \text{ g/kg}$ ,与东侧地势较高导致  $\text{CaCO}_3$  随径流淋失有关。

速效 Fe 和速效 Cu 含量高的地方都主要分布在西南部(图 3(i)和(k)),最高达到  $75.8 \text{ mg/kg}$ ,而在研究区的西北部和东南部含量均较低,这与有机质的分布趋势基本吻合。主要原因是,其含量分布与有机质的含量和土地利用方式有关。有机质含量高的土壤,其络合元素 Fe 和 Cu 的能力强,导致它们的有效性高。另外,在旱地土壤中,铁一般以原生矿物和含水氧化物及其有机无机络合物的形态存

在,难溶于水,并且能固定可溶性磷酸盐。西南边是水稻地,在淹水条件下,高价铁很容易还原成亚铁,导致土壤中可溶性铁的增加,从而提高了土壤中有效铁的含量水平<sup>[21]</sup>。

速效 Mn 绝大部分含量范围为 5 ~ 10 mg/kg (图 3(j)),含量高的地方主要集中在局部少数几个地方,主要与这几个地方的有机质含量高络合能力强和土壤容重低通气性好有关。

速效 Zn 含量高的地方集中在南北方向的中间一带,影响土壤中锌有效性的因素中,除了成土母质和土壤类型外,首先是 pH,随着土壤 pH 的升高,有效锌含量降低,二者呈明显负相关,pH 高的土壤容易缺乏锌。对照 pH 和 Zn 的分布图,不难发现在 pH 高的西部,有效 Zn 的含量较少。其次是有机质,在有机质含量高的地方,Zn 的含量也较高,二者呈正相关。

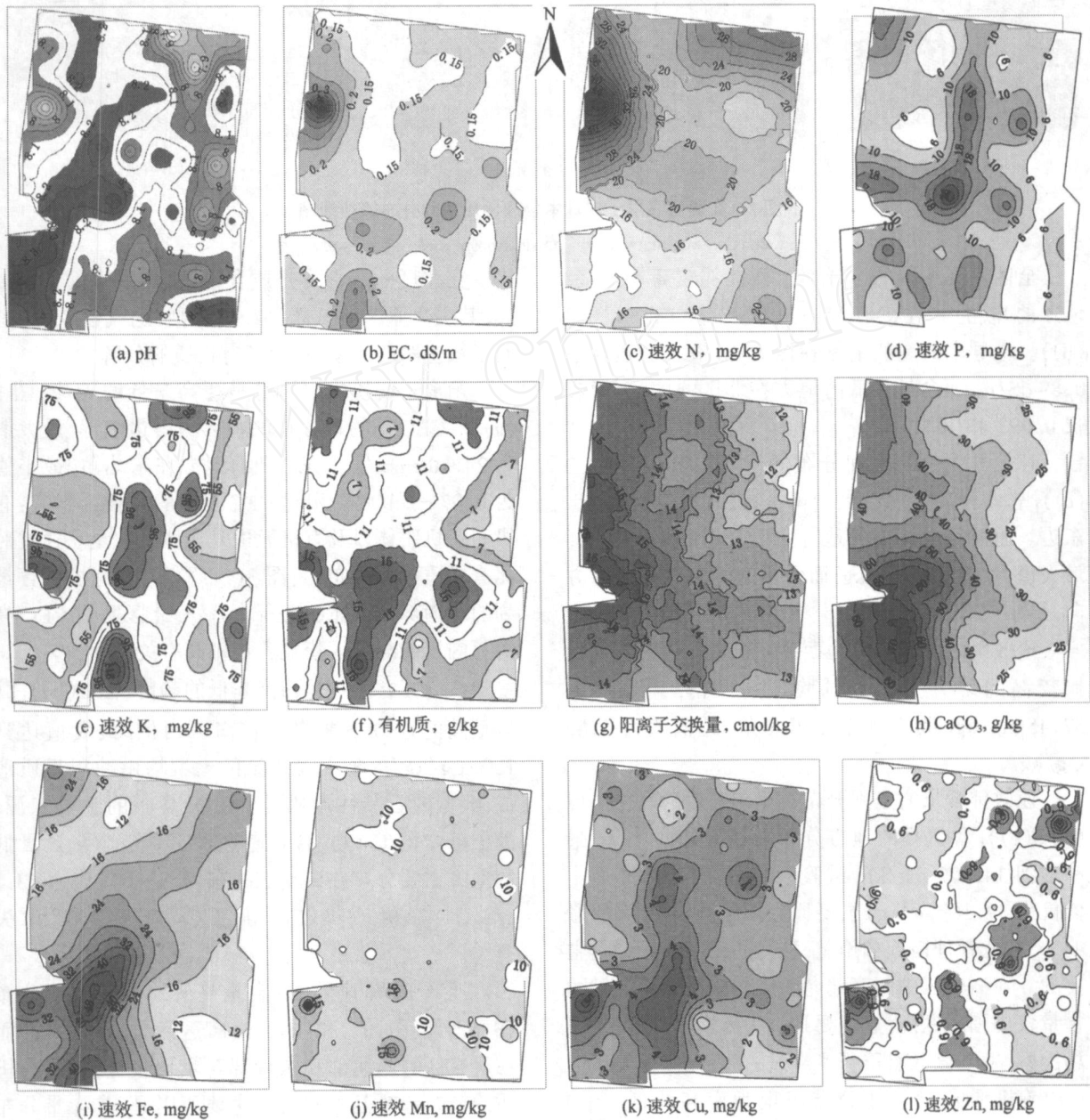


图 3 实验区表层土壤基本化学性质的空间分布等值线图

Fig. 3 Contour maps of soil chemical properties in the study area

### 3 结 论

中国农业大学上庄实验站表层土壤颗粒组成(砂粒、粉粒和粘粒)、容重、pH、有机质和速效 Cu 均服从正态分布,速效 P、速效 K、CEC、CaCO<sub>3</sub>、速效 Fe 和 Zn 含量服从对数正态分布,而表层土壤电导率、速效 N 和速效 Mn 的分布最复杂,既不服从正态分布也不服从对数正态分布。表层土壤基本理化性质的变异系数范围为 0.02~0.77,除 pH 外,均属中等变异强度。

结构分析发现除速效 Mn 和 Zn 表现为纯块金效应外,其余土壤理化性质在一定范围内均存在空间相关关系,其中表层土壤颗粒组成和 CEC 的空间相关距离最大,表现在全区均有相关性;其次变程较大的是 CaCO<sub>3</sub> 和速效 Fe,分别为 603 m 和 541 m;另外,有机质和容重的变程也较大,分别为 477 m 和 410 m,其余土壤理化性质的变程均较小,范围为 180~266 m。

土壤理化性质的空间分布规律表明,土壤 pH、速效磷、阳离子交换量以及 CaCO<sub>3</sub> 含量的分布均表现为西高东低。土壤容重、电导率和速效氮分布规律为北高南低,而有机质分布表现为南高北低。速效 Fe 和速效 Cu 分布规律为西南高,西北和东南低。速效钾和速效 Zn 的分布表现为中间高两边低。其中,速效钾、阳离子交换量和 CaCO<sub>3</sub> 及微量元素含量受母质因素的影响比较大;施肥对 pH、电导率、速效氮、速效磷、速效钾以及 CaCO<sub>3</sub> 含量均有一定影响;土壤翻耕对土壤容重和有机质含量有较大影响;另外,不同的土地利用方式(旱地和水田)对 pH、容重、有机质以及微量元素含量均有不同程度的影响。

致谢:曹玉、贺勇、况星、丁科、章翔、裴旭光等同学参与了取样和化验工作,谨致谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 周斌,王周琼. 长期定位实验对土壤质量影响的因子分析[J]. 干旱区农业研究,2005,23(5):56~61
- [2] 李新爱,童成立,蒋平,等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. 土壤,2006,38(3):298~303
- [3] 张鸿龄,梁成华,陈新之,等. 长期定位施肥对保护地土壤腐殖质结合形态的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(5):831~834
- [4] 党廷辉,高长青,彭琳,等. 长武旱塬轮作与肥料长期定位试验[J]. 水土保持研究,2003,10(1):61~64,103
- [5] 姜勇,庄秋丽,梁文举,等. 空间变异在土壤性质长期定位观测及取样的应用[J]. 土壤通报,2005,36(4):531~535
- [6] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives[J]. Geoderma, 1999, 89:1~45
- [7] 金继运,自由路. 精准农业与土壤养分管理[M]. 北京:中国大地出版社,2001
- [8] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central low a soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58:1501~1511
- [9] Iqbal J, Thomasson J A, Jenkins J N, et al. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 2005, 69:1338~1350
- [10] 雷志栋,杨诗秀,许志荣,等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报,1985,9:10~21
- [11] 谢永华,黄冠华,赵立新. 田间土壤特性空间变异的试验研究[J]. 中国农业大学学报,1998,3(2):41~45
- [12] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2004,18(3):53~56
- [13] 龚元石,廖超子,李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及分形特征[J]. 土壤学报,1998,35(1):10~15
- [14] 胡克林,李保国,林启美,等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报,1999,15(3):33~38
- [15] 胡克林,李保国,陈德立,等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克立格估值[J]. 水科学进展,2001,12(4):460~466
- [16] 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):178~182
- [17] 胡克林,余艳,张凤荣,等. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J]. 中国农业科学,2006,39(4):764~771
- [18] 赵其国,孙波,张桃林,等. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京:科学出版社,2002
- [19] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988
- [20] 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
- [21] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京:科学出版社,1983:103~110