

规模化猪场废水污灌农田的土壤 Zn 和 Cu 空间变异分析

黄治平, 徐 斌

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 为了解长期施用猪场废水对农田土壤 Zn 和 Cu 的影响, 应用 GIS 结合地统计学方法对河北省京安猪场区域农田的清洁区和灌溉 8 年猪场废水的污灌区耕层(0~20 cm)共 52 个土壤样品的 Zn 和 Cu 的全量和有效态含量的空间结构和分布特征进行了分析。结果表明, Zn 和 Cu 的全量和有效态量受随机性和结构性影响, 其中, 有效 Zn 和全 Cu 以随机性影响为主, 全 Zn 和有效 Cu 受结构性影响为主。Zn 和 Cu 有效态含量分别与全量正相关, 与全氮、有效氮、全磷和有效磷正相关, 与 pH 负相关, 与有机质相关不明显。从空间分布来看, Zn 和 Cu 全量和有效态含量主要为果园>污灌地>机井地>林地和苜蓿地。根据背景调查、变异函数分析、Kriging 内插图分析和不同采样区 Zn 和 Cu 含量统计分析, 影响整个研究区土壤 Zn 和 Cu 分布的主要随机性因素为猪场废水的应用, 长期灌溉猪场废水会带来土壤 Zn 和 Cu 积累, 以及 Zn 和 Cu 有效态含量的增加。

关键词: 猪场废水; 污水灌溉; 农田土壤; 重金属; 空间变异

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)01-0126-07

Spatial Variability of Zinc and Copper in Farmland Soil Irrigated with Swine Wastewater

HUANG Zhi-ping, XU Bin

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Spatial variability of heavy metal in the plough layer (0~20 cm) of groundwater-irrigation farmland soils and sewage-irrigation farmland soils which had been applied swine wastewater from Jing'an swine-farm for 8 years was studied using geographic information system (GIS) technique and geostatistical analysis, to analyze the effects of long-term swine wastewater applied on Zn and Cu in soils. 52 soil samples were collected and analyzed in terms of the total concentration and bio-available concentration of Zn and Cu, pH and the contents of soil nutrients. The results indicated that the spatial variability of the total concentration and bio-available concentration of Zn and Cu were impacted by random factors and structural factors together, bio-available Zn and total Cu were dominated by random factors, and total Zn and bio-available Cu were primarily controlled by structural factors. Bio-available Zn and bio-available Cu positively correlated to total Zn and total Cu respectively, positively correlated to total nitrogen, bio-available nitrogen, total phosphor and bio-available phosphor, but negatively correlated to pH, and correlated to organic matter insignificantly. The statistics analysis of Zn and Cu in soil from different samples and map of ordinary Kriging interpolation revealed that the total concentration and bio-available concentration of Zn and Cu were: orchard soil>sewage soil>soil irrigated with groundwater>woodland and clover-land. According to the analysis of background investigation, the variogram, the value of the total concentration and bio-available concentration of Zn and Cu in different samples and the map of ordinary Kriging interpolation, the main random factor influencing the distribution of Zn and Cu in soils in this region was swine wastewater applied. The Zn and Cu would be accumulated and the bio-available concentration of Zn and Cu would be increased in soils if the swine wastewater was long-term applied in this region.

Keywords: swine wastewater; sewage-irrigation; farmland soil; heavy metal; spatial variability

收稿日期: 2007-01-16

基金项目: 土壤有机质提升试点补贴项目(1251610721336-0706); 国家高技术研究发展专项“863”经费资助(2006AA10Z242)

作者简介: 黄治平(1972—), 男, 江西省人, 博士研究生, 研究方向为畜禽环境污染。E-mail: bjhuangzp@126.com

通信作者: 徐 斌 E-mail: xubin@mail.caas.net.cn

地统计学是研究土壤特性空间变异的较好方法,有关土壤重金属空间变异的地统计学研究已有很多报道,对于长期耕作的农田土壤来说,在较少受到外来影响的情况下,其重金属中小尺度空间差异较小,但外源重金属的增加可使土壤重金属空间分布特征发生一系列变化^[4-7]。研究土壤重金属积累及其空间分布状况对于诊断污染源、保护土壤健康和食品安全都有重要意义。城镇污水灌溉农田重金属污染有很多研究^[6,7],而应用猪场废水灌溉农田的土壤重金属积累研究则相对较少。由于含 Zn 和 Cu(本文简称重金属)的添加剂可改善猪的生长性能,但大部分 Zn 和 Cu 会直接通过动物体内排出,高剂量 Zn 和 Cu 添加剂可导致动物粪污中 Zn 和 Cu 含量提高^[8-13],根据实验室分析,规模化猪场废水中含有 Zn 和 Cu 等多种重金属,尽管 Zn 和 Cu 为生物体必需元素,但是过量会通过食物链给人体带来危害。

本文通过背景调查和采样分析,运用地统计学方法并结合地理信息系统(GIS),对用河北省安平县京安猪场废水灌溉的猪场周边区域农田土壤的 Zn 和 Cu 的全量和有效态含量的空间分布特征进行研究,揭示该地区土壤 Zn 和 Cu 的全量和有效态含量变化特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京安猪场建于 1998 年,位于河北省安平县城东 5 km 处的京安种猪园区,年产瘦肉型商品猪 10 万头、种猪 3 万头,占地面积约 4 hm²,排放粪污量约 2 000 m³·d⁻¹。京安猪场清粪方式为水冲粪,粪污直接冲至污水沟,湿粪从污水沟清出送入肥料加工厂,剩余污水排入污水塘,浇灌周边约 100 hm² 农田土壤。

安平县位于河北平原中部,地势自西向东缓缓倾斜,海拔 19~31 m,属暖温带大陆性季风气候。年平均

气温 12.4 ℃,年平均降水量 540 mm,土壤属褐土化潮土,部分为砂质和壤质褐土化潮土,土层较厚,耕性较好,但肥力较低,有机质含量不足,粮食作物有小麦、玉米、高粱、谷子、红薯等,经济作物以棉花为主。种植制度以冬小麦-夏玉米的一年两熟制为主,土壤一般翻耕 20 cm。

1.2 样品采集和背景调查

2006 年 6 月在研究区利用 GPS 定位选取采样点 52 个(东经 115°32′46″~115°35′02″,北纬 38°13′22″~38°13′42″)。根据采样点的灌溉水性质,将研究区分为清洁区和污灌区,清洁区包括林地和苜蓿地、机井(浇灌地下水)地,污灌区为污灌小麦地(简称污灌地)和果园地,其中苜蓿地和林地 5 个样点,机井地 7 个样点,污灌地 37 个样点,果园地 3 个样点,采样点均远离公路 300 m,见图 1。每一采样点取 1 m² 内 3 个点的土壤混匀,再用四分法采集约 1.0 kg 土壤样品,采样深度为 20 cm。

不同采样区的农药、肥料使用和猪场废水施用情况见表 1。由表 1 可知,果园、污灌地和机井地每年农药与化学肥料使用量相差不大,果园地主要施用猪场废水浑浊液(主要为猪粪和废水混合液),污灌地主要灌溉猪场废水澄清液(主要为清出湿粪后废水),机井地、林地和苜蓿地没有灌溉猪场废水。

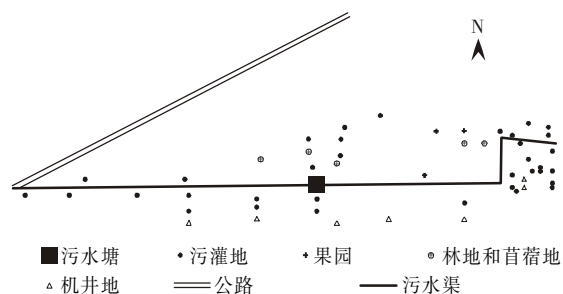


图 1 采样点分布

Figure 1 Distribution plot of samples

表 1 采样点调查数据

Table 1 Investigated data of the samples

采样区	农药		肥料/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹		猪场废水		
	多菌灵 /kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	乐果和甲胺磷 /1:1; L·hm ⁻² ·a ⁻¹	尿素	复合肥、过磷酸钙、钾肥	施用量 /m ³ ·hm ⁻² ·a ⁻¹	连续施用时间 /a	施用方式
果园地	16	—	—	1 500, 穴施	2 250~2 700(浑浊液)	8	漫灌
污灌地	—	4.5~7.5	375~600	300~750	2 400~3 600(澄清液)	8	漫灌
机井地	—	4.5~7.5	225~600	225~750	—	—	—
林地和苜蓿地	—	—	—	—	—	—	—

注:“—”表示空值。

1.3 样品分析

重金属全量测定:称取过 100 目风干土样 2.000 0 g,盐酸-硝酸-高氯酸消解,消解液过滤后应用原子吸收分光光度计测定^[14]。机井水和猪场废水的重金属含量参照《水和废水监测分析方法》(第四版)测定^[15]。

重金属有效态含量测定:称取过 2 mm 筛风干土样 10.00 g 放入 100 mL 离心管中,加入 0.005 mol·L⁻¹ DTPA 浸提剂 20.0 mL, 25 ℃下用水平振荡机振荡提取 2 h, 离心过滤,滤液应用原子吸收分光光度计测定^[14,16]。

土壤 pH(水:土=2.5:1)采用 pH 计测定;有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定;全氮(total nitrogen, TN)采用凯氏定氮法;碱解氮(速效氮, bio-available nitrogen, BN)为扩散皿测定法;全磷(total phosphor, TP)采用 NaOH 熔融法,有效磷(bio-available phosphor, BP)采用 NaHCO₃ 法^[14]。

1.4 数据统计分析

变异函数的计算要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应^[1-7,17,18],本文应用 SPSS11.5 的 Kolmogorov-Smirnov 模块检验数据是否符合正态分布,应用 ArcGIS9.0 计算变异函数和进行普通 Kriging 插值,变异函数理论模型图由 variowin2.21 生成。

2 结果与讨论

2.1 灌溉水中 Zn 和 Cu 含量

表 2 为机井水和猪场废水 Zn 和 Cu 含量,水样采集样本数分别为 3 个。由表 2 可知,猪场废水澄清液和浑浊液的 Zn 和 Cu 含量已超过农田灌溉水水质标准^[19],其中猪场废水浑浊液 Zn 和 Cu 含量分别高达 26.24 mg·L⁻¹ 和 15.16 mg·L⁻¹,分别为猪场废水澄清液

表 2 机井水和猪场废水 Zn 和 Cu 含量/mg·L⁻¹

Table 2 Zn and Cu content in under-ground water and swine wastewater/mg·L⁻¹

水质	机井水	猪场废水澄清液	猪场废水浑浊液	农灌水质标准
Zn	0.14±0.04	2.13±0.32	26.24±4.31	≤2.0
Cu	0.01±0.00	1.24±0.15	15.16±1.86	≤1.0

和机井水的 10 余倍和上百倍。

2.2 描述性统计

表 3 为采样点土壤 Zn 和 Cu 全量和有效态含量的描述性统计。由表 3 可知,有效 Cu(bio-available copper, B-Cu) 平均数和中数差异很大,变异系数也高,存在一定异质性,说明特异值对样本值影响较大。由 Kolmogorov-Smirnov 法检验,全 Zn (total zinc, T-Zn) 和有效 Zn (bio-available zinc, B-Zn) 符合正态分布,全 Cu (total copper, T-Cu) 近似符合正态分布,而 B-Cu 不符合正态分布,计算变异函数前需 Box-Cox 变换, B-Cu 经 Box-Cox 变换后 K-SZ 值和双边验证值分别为 0.74 和 0.64,符合正态分布。

2.3 Zn 和 Cu 与土壤 pH 和养分相关分析

研究区土壤 pH 为 6.96~8.10,全氮和速效氮分别为 0.00~0.12% 和 19.64~101.91 mg·kg⁻¹,有机质(organic matter, O.M.)为 0.02%~0.92%,全磷和有效磷分别为 0.02%~0.37% 和 0.00~357.65 mg·kg⁻¹。

土壤 Zn 和 Cu 与土壤养分和 pH 相关关系见表 4。由表 4 可知, T-Zn 和 T-Cu 正相关,相关系数为 0.557, P<0.01,说明 Zn 和 Cu 的来源相关。pH 与氮和磷全量负相关,由于灌溉猪场废水能增加土壤中氮和磷,因此灌溉猪场废水会降低土壤 pH。B-Zn 和 B-Cu 分别与 T-Zn 和 T-Cu 正相关,相关系数分别为 0.723 和 0.841, P<0.01。B-Zn 和 B-Cu 均与 pH 负相关,相关系数分别为 -0.483 和 -0.590, P<0.01。

2.4 空间变异特征分析

以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具的地统计学基本原理和方法在许多文献中都有比较详细的描述^[1-7,16,17],本文不再赘述。应用 ArcGIS9.0 计算变异函数时,对变异函数拟合模型精度评价可参考交叉验证预测误差的几个指标,符合以下标准为最优,即标准平均值最接近为 0,均方根预测误差最小,平均标准误差最接近于均方根预测误差,标准均方根预测误差最接近于 1^[17]。本试验 Zn 和 Cu 全量和有效态量的变异函数理论模型均很好地符合球状模型,相应模型参数、交叉验证参数和变异函数图分别见表 5

表 3 土壤 Zn 和 Cu 描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of Zn and Cu in soil

项目	平均值/mg·kg ⁻¹	中数/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数/%	最大值/mg·kg ⁻¹	最小值/mg·kg ⁻¹	K-SZ	双边验证
T-Zn	108.75	98.28	36.82	33.86	243.45	54.56	0.92	0.36
B-Zn	5.47	5.25	3.69	67.47	12.38	0.08	0.88	0.42
T-Cu	31.81	28.77	13.35	41.98	76.68	14.71	1.33	0.06
B-Cu	4.35	1.96	5.18	119.25	26.65	0.31	1.91	0.00

表 4 土壤 Zn 和 Cu 全量和有效态含量与 pH 和养分含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between the total concentration and bio-available concentration of Zn and Cu and pH and soil nutrients in soils

项目	pH	TN	BN	O.M.	TP	BP	T-Zn	B-Zn	T-Cu	B-Cu
pH	1	-0.693**	-0.333*	-0.138	-0.423**	-0.521**	-0.486**	-0.483**	-0.328*	-0.590**
TN		1	0.505**	0.391**	0.265	0.380**	0.427**	0.354**	0.099	0.369**
BN			1	0.609**	0.572**	0.477**	0.589**	0.664**	0.616**	0.585**
O.M.				1	0.417**	0.179	0.189	0.266	0.165	0.200
TP					1	0.564**	0.381**	0.623**	0.665**	0.752**
BP						1	0.422**	0.625**	0.587**	0.641**
T-Zn							1	0.723**	0.557**	0.668**
B-Zn								1	0.697**	0.754**
T-Cu									1	0.841**
B-Cu										1

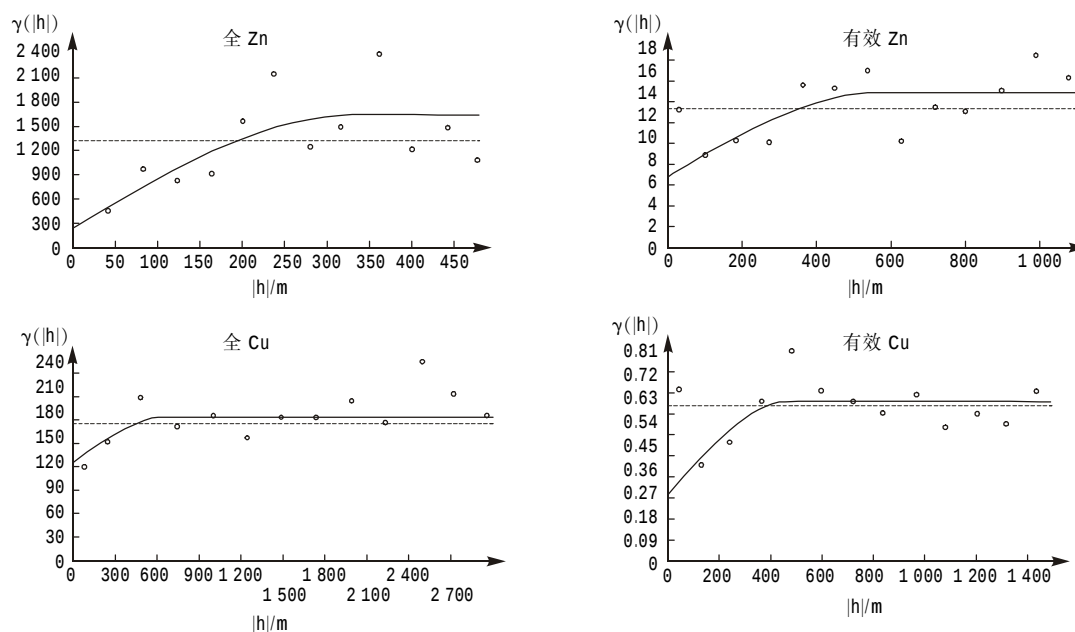
注:表中数据为决定系数 R^2 。 ** 表示 $P<0.01$, 差异极显著, * 表示 $P<0.05$, 差异显著。

表 5 理论变异函数球状模型拟合参数

Table 5 Corresponding parameters of best-fitted variogram models for Zn and Cu in soil

项目	变程 m	拱高 C	块金值 C_0	交叉验证					块金值/基台值(%) ($C_0 \times 100\% / (C_0 + C)$)
				平均值	均方根预测误差	平均标准误差	标准平均值	标准均方根预测误差	
T-Zn	333.32	1 405.9	248.72	1.342	36.37	34.65	0.027 1	1.091	15.03
B-Zn	565.02	6 801.3	8 115.9	0.070 04	3.621	3.428	0.012 86	1.058	54.41
T-Cu	685	59.112	126	0.127 5	11.68	12.94	0.006 43	0.914 2	68.07
B-Cu(Box-Cox 变换)	483.85	0.401 39	0.286 92	0.015 16	0.745 5	0.740 8	0.010 3	1.015	41.68

注:变异函数理论模型拟合均为球状模型。



注: $\gamma(|h|)$ 为变异函数, $|h|$ 为滞后距离。

图 2 土壤 Zn 和 Cu 变异函数理论模型

Figure 2 Experimental and model-fitted variograms for Zn and Cu in soil

和图 2。

土壤中元素空间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土壤元素强的空间相关性, 而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度、污染等各种人为活动的影响, 削弱土壤元素的空间相关性。土

壤性质的空间相关性可采用表示由随机性因素引起的空间变异性的“块金值与基台值的百分比($C_0 \times 100\% / (C_0 + C)$)”大小来区分,该比值高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大,相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较大。“块金值与基台值之比”小于 25%认为是高度空间相关,25%~75%认为是中等空间相关,大于 75%认为是弱空间相关^[5-7]。

由表 5 可知,T-Zn 的“块金值与基台值之比”为 15.03%,表现出强烈的空间自相关,这与赵彦锋等研究一致^[6],B-Zn 的“块金值与基台值之比”在 25%~75%之间,为中等空间相关,其中受随机性影响占 54.41%,受结构性影响占 45.59%,以随机性影响为主。T-Cu 和 B-Cu 的“块金值与基台值之比”均在 25%~75%之间,为中等空间相关,其中 T-Cu 受随机性影响占 68.07%,受结构性影响占 31.93%,以随机性影响为主,这可能主要受灌溉猪场废水等人为活动的影响有关,而 B-Cu 受随机性影响占 41.68%,结构性影响占 58.32%,以结构性影响为主。这主要由于 Zn、Cu 化学活泼性不同,在水溶液中化学活泼性强的元素可以置换化学活泼性弱的元素而使后者在溶液中表现出惰性。只要溶液中存在 B-Zn,则溶液中 B-Cu 会转变为惰性 Cu。有活性 Cu 的溶液中不会出现活性 Zn,B-Zn 和 B-Cu 只有在旱地才能共存,可能土壤中 B-Zn 使部分 B-Cu 表现出惰性,因此 B-Cu 比 B-Zn 更多地受结构性影响。

2.5 Kriging 插值

根据所得变异函数理论模型,进行普通 Kriging 插值,绘制 Zn 和 Cu 全量和有效态含量以及土壤养分(土壤养分空间分析见另文,本文仅选用养分 Kriging 插值图)的内插图(图 3),以直观地反映土壤 Zn 和 Cu 空间分布格局和变异大小以及与土壤养分之间的相关关系。

表 6 为不同采样区 Zn 和 Cu 全量和有效态含量的统计分析。表 6 可以看到,T-Zn、B-Zn、T-Cu 和 B-Cu 含量为果园>污灌地>机井地>林地和苜蓿地,Kriging 内插图(图 3)表现出 T-Zn、B-Zn、T-Cu 和 B-Cu 在污水塘附近和西部的果园和污灌区形成两大斑块。果园地主要灌溉猪场废水浑浊液,污灌区主要灌溉猪场废水澄清液,由表 1 和表 2 可估算出果园地的 Zn 和 Cu 输入量分别为 $59\,040 \pm 9\,697.5 \sim 70\,848 \pm 11\,637 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $34\,110 \pm 4\,185 \sim 40\,932 \pm 5\,022 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,污灌地的 Zn 和 Cu 输入量分别为 $5\,112 \pm 768 \sim 7\,668 \pm 1\,152 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $2\,976 \pm 360 \sim 4\,464 \pm 540 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。尽管不同作物对 Zn 和 Cu 的吸收有差异,但果园地的 Zn 和 Cu 输入量大约为污灌地 Zn 和 Cu 输入量的 10 倍,研究表明果园土壤的 Zn 和 Cu 全量高于污灌地土壤,郑袁明等认为不同土地利用方式对 Zn 和 Cu 的积累影响不同,郑袁明等研究也表明果园土壤 Zn 和 Cu 积累大于小麦地土壤^[20,21]。

B-Zn 和 B-Cu 分别与 T-Zn 和 T-Cu 正相关,与 TN、BN、TP 和 BP 正相关,与 pH 负相关,因此,在污水塘附近和西部的果园和污灌区 B-Zn 和 B-Cu 含量

表 6 不同采样区土壤 Zn 和 Cu 统计分析

Table 6 Statistics analysis of Zn and Cu in soil from different sampling sites

项目		类别	平均值/mg·kg ⁻¹	中数/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数/%	最大值/mg·kg ⁻¹	最小值/mg·kg ⁻¹
Zn	果园	全量	148.05	129.66	38.43	25.96	192.22	122.28
		有效态量	10.00	8.83	2.06	20.64	12.38	8.78
	污灌地	全量	111.50	98.59	37.47	33.61	243.45	72.87
		有效态量	6.06	5.55	3.39	55.95	12.36	0.15
	机井地	全量	94.89	94.91	22.35	23.55	124.89	64.20
		有效态量	3.30	1.16	3.34	101.34	8.54	0.90
	林地和苜蓿地	全量	84.18	76.33	29.06	34.52	128.31	54.56
		有效态量	0.63	0.70	0.39	62.36	0.99	0.08
Cu	果园	全量	49.20	41.10	19.87	40.38	71.83	34.66
		有效态量	16.41	13.00	9.04	55.06	26.65	9.57
	污灌地	全量	32.80	29.68	13.14	40.06	76.68	19.41
		有效态量	4.17	2.18	4.28	102.67	18.95	0.45
	机井地	全量	25.11	26.00	6.72	26.76	34.51	14.71
		有效态量	2.45	1.42	2.25	91.67	7.20	0.94
	林地和苜蓿地	全量	23.50	21.30	7.40	31.51	31.99	15.52
		有效态量	1.08	0.87	0.62	57.62	1.92	0.31

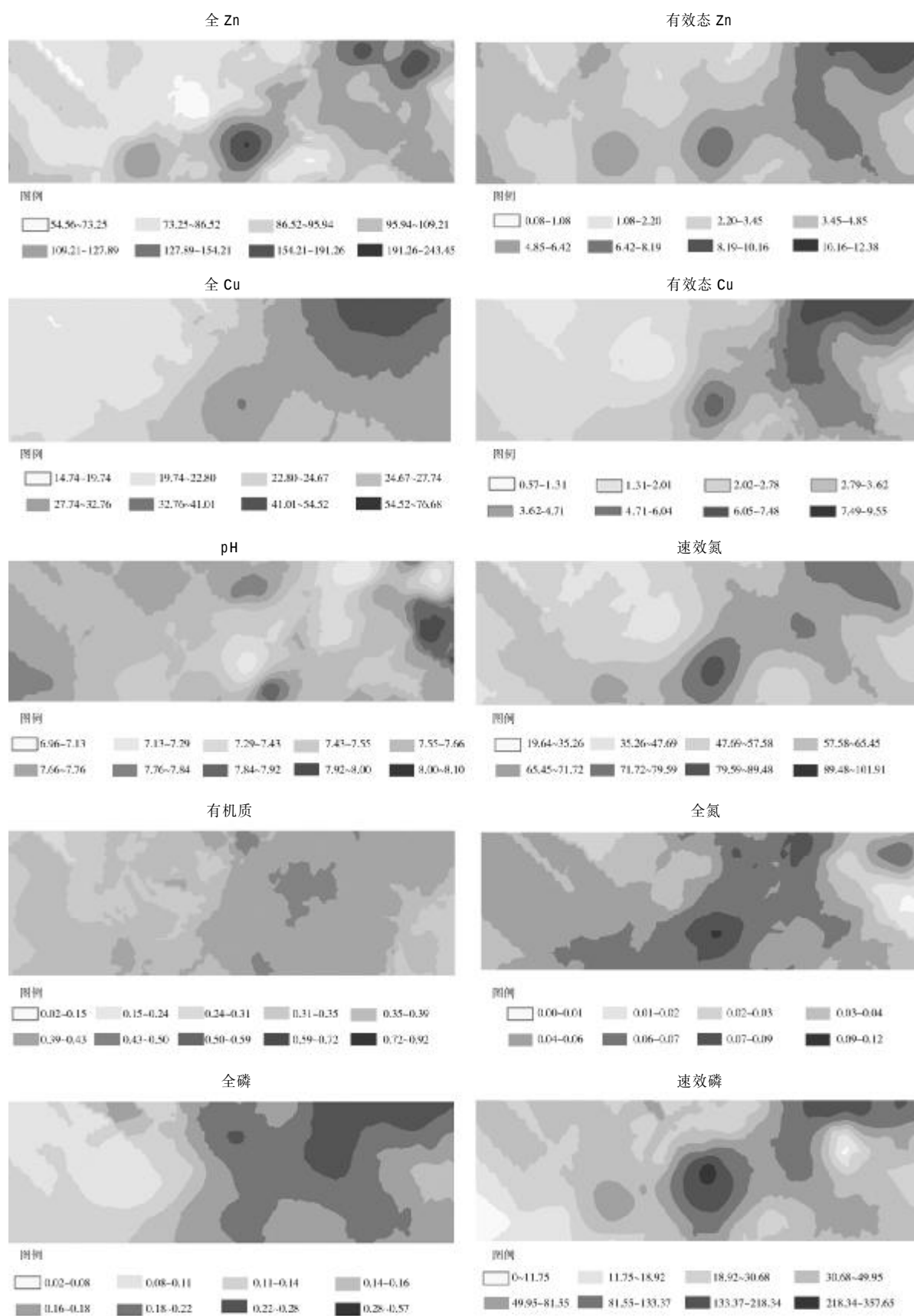


图 3 土壤 Zn 和 Cu 和土壤养分空间分布格局

Figure 3 Spatial distributions of Zn, Cu and soil nutrients in soil

高,Kriging 内插图(图 3)表现为 B-Zn 和 B-Cu 分别与 T-Zn 和 T-Cu、TN、BN、TP、BP 表现出相似斑块,与 pH 表现为互补斑块。由于 Zn 和 Cu 对作物影响主要取决于 Zn 和 Cu 的有效态含量,B-Zn 和 B-Cu 与 pH 负相关,灌溉猪场废水后会降低土壤 pH,从而提高土壤 B-Zn 和 B-Cu 含量,因此对长期污灌猪场废水的土壤可施用石灰等措施以提高土壤 pH 来降低土壤中 B-Zn 和 B-Cu 含量。

由表 1、表 6 结合变异函数模型和 Kriging 插值图(图 3)分析,B-Zn、T-Cu 和 B-Cu 中等自相关,受结构性因素和随机性因素影响,T-Zn 高度自相关,主要受结构性因素影响,小部分受随机性影响,由于采样区地势比较平坦,土壤质地也较为单一,因此微域地形和土壤质地影响可以忽略不计,再者地块间施肥和耕作方式差异不大,因此,影响土壤 Zn 和 Cu 变异的随机化因素主要为灌溉猪场废水。

3 结论

Zn 和 Cu 全量和有效态含量变异函数理论模型均符合球状模型,空间变异程度上,B-Zn、T-Cu 和 B-Cu 中等自相关,受结构性因素和随机性因素影响,T-Zn 高度自相关,受结构性因素影响。从空间分布来看,Zn 和 Cu 全量和有效态含量为果园>污灌地>机井地>林地和苜蓿地,Kriging 内插图在果园和污灌区表现出高浓度斑块。

Zn 和 Cu 有效态含量分别与全量正相关,与 TN、BN、TP 和 BP 正相关,与 pH 负相关,与 O.M.相关性不明显。

根据背景调查、变异函数分析、不同采样区 Zn 和 Cu 含量统计分析和 Kriging 内插图分析,影响整个研究区的 Zn 和 Cu 全量和有效态含量主要随机性因素为猪场废水的应用,长期灌溉喂饲高剂量 Zn 和 Cu 添加剂的猪场废水会带来土壤 Zn 和 Cu 的积累,以及土壤中 Zn 和 Cu 有效态含量的增加。

参考文献:

- [1] 张淑娟,何 勇,方 慧.基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J].农业工程学报,2003,19(2):39-44.
- [2] 刘杏梅,徐建民,章明奎,等.太湖流域土壤养分空间变异特征分析——以浙江省平湖市为例[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,29(1):76-82.
- [3] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等.河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析[J].地理学报,2000,55(5):555-566.
- [4] 孙 波,赵其国.低丘红壤肥力的时空变异[J].土壤学报,2002,39(2):190-198.
- [5] 曹 慧,杨 浩,孙 波,等.太湖流域丘陵地区土壤养分的空间变异[J].土壤,2002,4:201-205.
- [6] 赵彦锋,史学正,黄 标,等.工业型城乡交错区农业土壤 Zn 的空间分异及其影响因子探讨—以无锡市为例[J].土壤,2006,38(1):29-35.
- [7] 张乃明,李保国,胡克林.污水灌溉耕层土壤中铅、镉的空间变异特征[J].土壤学报,2003,40(1):151-154.
- [8] Long Cang, Wang Yu-jun, Zhou Dong-mei, et al. Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(3):371-374.
- [9] 游金明,翟明仁,张宏福.猪饲料中必需微量元素的盈亏对养猪生产的影响[J].中国饲料,2003,8:16-17.
- [10] Eneji A Egrinya, Honna T, Yamamoto S. Manuring effect on rice grain yield and extractable trace elements in soils[J]. Journal of Plant Nutrition, 2001,24(7):967-977.
- [11] Moreno-Caselles Joaquín, Raul Moral, Maria Dolores Perez - Murcia, et al. Fe, Cu, Mn and Zn input and availability in calcareous soils amended with the solid phase of pig slurry [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2005,36:525-534.
- [12] Raczy G J, Fitzgerald M M. Nutrient and heavy metal contents of hog manure-effect on soil quality and productivity[DB/OL]. <http://www.gov.mb.ca/agriculture/livestock/livestockopt/papers/raczy.pdf>,2007-01-05.
- [13] Bolan Nanthi S, Domy C Adriano, Santiago Mahimairaja. Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products[J]. Environmental Science and Technology, 2004,34:291-338.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [15] 吴淑岱,赵惠芬.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2005.
- [16] 贺建群,许嘉琳,杨居荣,等.土壤中有有效态 Cd,Cu,Zn,Pb 提取剂的选择[J].农业环境保护,1994,13(6):246-251.
- [17] Burgos Pilar, Engracia Madejón, Alfredo Pérez-de-Mora, et al. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation[J]. Geoderma, 2005, In Press, Corrected Proof.
- [18] Kevin Johnston, Jay M Ver Hoef, Konstantin Krivoruchko, et al. Using ArcGIS Geostatistical Analyst[M].
- [19] GB5084-92,农田灌溉水质标准[S].
- [20] 郑袁明,宋 波,陈同斌,等.北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险[J].自然资源学报,2006,21(1):65-72.
- [21] 郑袁明,陈同斌,郑国砥,等.不同土地利用方式对土壤铜积累的影响——以北京市为例[J].自然资源学报,2005,20(5):690-696.