

# 北京新河再生水灌区土壤重金属空间变异分析

叶文, 王会肖, 高军, 刘海军

(北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 为了研究再生水灌溉对土壤重金属含量的影响, 为再生水的环境影响效应评价提供参考, 在北京市通州区新河灌区 30 个采样点进行了分层土壤采样, 分别测定了各层土壤样本中 7 种重金属元素(Cu、As、Ni、Cr、Pb、Zn、Cd)的含量。以 2006 年的当地实测土壤背景值为对照标准, 利用地统计分析方法, 对重金属元素土壤剖面上的分布特征进行了分析, 特别对 Ni 元素的空间变异性及样点元素间的相关性做了较详细的土壤分层研究。结果显示, 通州新河灌区 Cd、Zn、Cu 的变异较为明显, 变异系数在 0.20~0.51 之间, 其变异程度由大到小依次为 Cd> Zn> Cu; Ni 元素在一定程度上存在空间相关性, 相关距为 24 km, 在 4 个取样土层中的变程都很大, 表明 Ni 在较大空间范围内的分布表现出一致性。

**关键词:** 新河灌区; 再生水灌溉; 土壤重金属; 克里格插值; 空间变异

**中图分类号:** S159 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0079-05

## Spatial Variation Analysis of Soil Heavy Metal in Xinhe Reclaimed Water Irrigation District of Beijing

YE Wen, WANG Huixiao, GAO Jun, LIU Haijun

(College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In order to investigate the impact of reclaimed water irrigation on the content of soil heavy metals and to provide reference for the environmental impact evaluation of reclaimed water, soil samples were collected at a total of 30 sampling points in the Xinhe Irrigation District of Tongzhou County in Beijing and the contents of Cu, As, Ni, Cr, Pb, Zn, and Cd were determined. The local soil characteristics in 2006 were regarded as the background values. Geostatistical analysis method was used to analyze the spatial distribution characteristics of heavy metals in soil profile, especially the spatial variation and correlation among samples of Ni element were investigated in detail. The results showed that the spatial variations of Cd, Zn, and Cu were obvious in the Xinhe Irrigation District of Tongzhou with the spatial variation coefficient between 0.20 and 0.51. The order of variation degree was Cd> Zn> Cu. Ni element showed the spatial correlation to some extent and the spatial correlation distance was 24 km. The variations of Ni in four soil sampling layers were apparent, indicating the consistency of spatial distribution of Ni in a large scale.

**Key words:** Xinhe Irrigation District; reclaimed water irrigation; soil heavy metals; Kriging method; spatial variation

土壤重金属的空间变异的研究是对土壤中重金属元素的分布、趋势及差异性等空间结构特征的探讨, 它既是土壤化学特性空间变异性的研究内容, 又是土壤环境质量评价及重金属污染评价等相关研究的基础<sup>[1]</sup>。由于再生水不同于河道、地下或井灌水, 它包含了很多处理后可能存在的杂质, 应用于农业灌溉后, 可能会引起再生水中的有害物质入渗, 污染浅层地下水<sup>[2]</sup>, 或者会引起土壤母质矿化而引起土壤重金属时空变化, 并导致土壤重金属时空属性数据的复杂化,

不同重金属之间的相互关系也会在空间上表现出复杂的相关性与变异性。很多学者利用传统的土壤重金属元素空间变异性的研究方法, 如时间序列分析法、随机方程法等进行相关的研究<sup>[3-7]</sup>, 但效果并不理想。时间序列分析法虽然简单易行, 但是精度不高, 还需要提供一个时间序列的观测资料, 且只可用于短期预测; 随机方程用不同的权重值赋予不同的因变量, 虽然是量化研究, 但是为不确定性预测。本文基于地统计学理论, 以通州区新河再生水灌区土壤为例,

收稿日期: 2013-04-23 修回日期: 2014-02-12 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.006.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009SD-10); 国家自然科学基金项目(41371043)

作者简介: 叶文(1989-), 男, 湖南人, 硕士研究生, 主要从事生态水文方面研究。E-mail: leaf24@126.com

通讯作者: 王会肖(1966-), 女, 河北石家庄人, 教授, 博士, 主要从事生态水文过程和水资源高效利用方面的研究。E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

利用 ArcGIS 的克里格插值法分析数据, 探求其在空间相关程度和引起含量空间变异的主要因素, 分析再生水灌溉对土壤的营养物质和重金属影响。

## 1 采样与方法

### 1.1 研究区概况

新河灌区位于北京通州区中南部, 京杭大运河的北端, 是北京市再生水管理与利用的示范区。通州新河灌区属于海河流域, 境内有潮白河和北运河两大水系经过, 地表均被第四系松散沉积物所覆盖, 地形由西北向东南缓慢倾斜, 整体比较平坦, 地势低凹, 是北京市的主要泄洪区和污水排放区。本次试验采样点散布在新河灌区, 区域地理坐标为北纬  $39^{\circ}36' - 39^{\circ}53'$ 、东经  $116^{\circ}32' - 116^{\circ}56'$ , 总面积  $447 \text{ km}^2$ 。

### 1.2 土壤样品采集与分析

试验区再生水主要经由通惠干渠与通惠南干渠引自高碑店污水处理厂, 沿凉水河、凤港减河形成灌溉带, 因此, 采用均匀布点与随机布点相结合的方式, 在西北的再生水灌区和东南的井灌区共设置了 30 个土壤取样点取样。每个取土层厚度为 20 cm, 总取样深度为 80 cm。

土壤样品经风干研磨, 过 100 目筛, 准确称取 0.1 g, 置于聚四氟乙烯罐中, 加入硝酸、高氯酸、氢氟酸置于不锈钢外套中于烘箱中  $165^{\circ}\text{C}$  加热 4~5 h, 冷却后取出罐, 加热去硅、氢氟酸冷却待用。采用德国 SPECTRO 公司出产的 ICP-AES 光谱仪 (SPECTRO ARCOS EOP) 测定重金属元素 (Cu、As、Ni、Cr、Pb、Zn、Cd) 含量, 分析测定都按照国家标准执行。

## 2 基于克里格插值的土壤重金属空间变异分析

### 2.1 地统计分析 with 克里格插值法

地统计 (Geostatistics) 又称地质统计, 它以区域变化变量为基础, 借助变异函数, 研究既具有随机性又具有结构性, 或具有空间相关性和依赖性的自然现象, 可以对空间数据进行最优无偏内插, 以及模拟空间数据的离散性及波动性。如今地统计学已被广泛用于地理学、生态学等诸多领域的研究中<sup>[8]9]</sup>。半方差函数表示了一定范围内的变量属性的空间依赖性, 是地统计分析的特有函数。其半方差函数可用式 (1) 表示:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中:  $Z(x_i)$  为  $Z(x)$  在空间点  $x_i$  处的样本值;  $Z(x_i + h)$  为  $Z(x)$  在  $x_i$  处距离偏离  $h$  的样本值;  $N(h)$  为分隔距离为  $h$  时的样本点总对数。也有将  $r(h)$  称为变异函数, 反映出变量的空间分异性。当存在空间自相关时, 随着距离  $h$  的增大, 半方差函数值  $r(h)$  也增大, 当  $h$  超过某一距离  $H$  (称之为变程) 后,  $r(h)$  往往不再增大, 并稳定在一个极限值附近, 该值称为“基台值”。在此范围内, 两个点  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i + h)$  间存在某种程度的相关关系, 而当  $h$  大于  $H$  时, 它们就不再相关, 因此, 变程  $H$  可以看做区域化变量的影响范围。

克里格插值法是目前地统计学中应用最为广泛的内插

法, 它利用已知样点的统计特性, 不但能够量化已知点之间的空间自相关性, 而且能够说明采样点在预测区域范围内的空间分布情况。相比经典统计学估计, 克里格插值能最大限度的利用空间取样所提供的各种信息和已有观测值空间分布的结构特征。克里格插值通过对已知点赋权重来求得未知样点的值, 可表示为:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (2)$$

式中:  $\lambda_i$  为权重系数。

关于土壤元素的空间变异, 已有不少人做过类似研究<sup>[7]9]</sup>, 但多停留在对单一元素或离子的变异分析, 对常见的土壤重金属元素分析较少, 研究也不够深入, 基于再生水试验基础的量化分析也不多见。本文采用克里格插值法的半方差模型对土壤重金属的空间分布进行拟合, 使用 ArcGIS 软件设置各特征参数并成图。

### 2.2 土壤重金属元素含量特征

土壤环境质量标准一般采用区域土壤环境背景值<sup>[10]</sup>。通州新河再生水灌区的大规模灌溉始于 2006 年, 故本文采用通州一大兴灌区与凉水再生水灌区土壤重金属背景值<sup>[11]</sup>作为土壤环境质量标准, 由北京市水利科学研究所于 2006 年在通州新河灌区永乐店试验站采样测定提供, 土壤分层样品重金属元素含量统计结果见表 1。

通过平均值含量显著性检验, 结果为极其显著。土壤样品 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的平均含量与通州一大兴灌区再生水土壤重金属背景值相差不大, 但是样品地表两个土层 (0~20 cm、20~40 cm) 重金属含量值整体要高于背景值。以 0~20 cm 的取土层为例, 其中 Cd 和 Zn 的平均值含量分别高出土壤背景值 0.35 和 6.45 的含量 (mg/kg), 表示再生水灌溉对土壤 Cd 和 Zn 含量产生了显著影响。但巫常林等人的田间试验研究<sup>[12]</sup>表明, 作物对 Cd 与 Zn 的带出量只占土壤背景含量的 0.666 7% 和 0.355 5%, 作物累积很少, 并不对人体构成危害。另外, Cu 元素的含量在表 1 的数据中也表现了一定的空间变异性。经过纵向对比分析可以看出, 随土深加大重金属含量呈减少趋势。查阅再生水灌区采样点地理资料, 发现在采样的 4 个土层中, 测试的七大重金属元素最大值主要集中在以样田 1 为中心的引水渠的周边区域, 说明在再生水入口的上游, 重金属的含量很高, 对土壤产生的影响较大。

变异系数是对总体样本中各采样点的平均变异程度的反映, 能在一定程度上说明样品受人为影响的大小。从变异系数和重金属随土层厚度的分布特点上看, 七种重金属均属中等变异, Cd、Zn、Cu 的变异较为明显, 其变异程度由大到小依次为  $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu}$ 。其中 Cd 的变异系数在 0.4 以上, 说明土壤中 Cd 受再生水灌溉的影响比较显著, 空间分异较大; Zn 和 Cu 的变异系数相对较小, 在 0.20~0.34 之间; 其他几种的空间分异性不明显。

### 2.3 新河灌区土壤重金属空间变异结构分析

结构分析的主要目的是建立一个最优变异函数的理论模型<sup>[13]</sup>, 如果得到的变异函数和相关分析结果表明变量的空间相关性不存在, 则空间局部插值方法不适用。检验数据的正态分布性是使用空间统计学克里格插值法进行土壤重

表1 土壤重金属的描述性统计分析

Table 1 The descriptive statistical analysis of soil heavy metal concentrations

土层厚度/cm	属性	最大值 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	最小值 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	标准差	平均值 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	背景值 /(mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数(%)
0~ 20	As	11.77	6.39	1.36	8.13	7.75	16.74
	Cd	0.82	0.26	0.19	0.46	0.11	40.66
	Cr	74.12	30.28	8.38	54.9	34.7	15.26
	Cu	39.48	14.45	5.63	22.28	20.9	25.26
	Ni	30.50	17.63	4.15	24.02	28	17.28
	Pb	24.32	13.12	2.58	17.46	27	14.75
	Zn	118	38.88	19.54	65.15	58.7	30.00
20~ 40	As	14.81	5.68	1.78	8.51	7.75	20.93
	Cd	0.92	0.23	0.23	0.45	0.11	51.60
	Cr	66.92	46.41	5.27	54.68	34.7	9.64
	Cu	30.58	13.7	4.21	21.15	20.9	19.88
	Ni	35.07	17.95	4.7	24.65	28	19.05
	Pb	21.74	11.38	2.28	15.95	27	14.31
	Zn	97.1	33.67	18.3	59.59	58.7	30.71
40~ 60	As	13.95	5.85	2.01	8.35	7.75	24.10
	Cd	0.74	0.21	0.17	0.41	0.11	41.40
	Cr	69.88	42.75	6.63	54.3	34.7	12.21
	Cu	35.05	12.14	5.45	20.02	20.9	27.24
	Ni	33.33	16.82	4.46	24.4	28	18.28
	Pb	21.39	9.66	2.7	14.37	27	18.81
	Zn	83.8	31.7	15.53	54.68	58.7	28.41
60~ 80	As	12.67	2.96	2.19	7.74	7.75	28.24
	Cd	0.88	0.15	0.22	0.45	0.11	49.98
	Cr	66.29	31.12	7.33	53.08	34.7	13.80
	Cu	38.7	7.3	7.76	19.92	20.9	38.95
	Ni	34.42	10.92	6.06	24.27	28	24.96
	Pb	20.77	7.16	3.2	14.03	27	22.80
	Zn	95.5	20.94	18.16	52.8	58.7	34.39

金属空间分析的前提。在本研究中,重金属As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn均服从正态分布,而尤以Ni的正态性最好,最满足地统计学分析的要求,因此下文以Ni元素作为分析对象。

表2 土壤Ni元素的半方差特征参数

Table 2 Semi variance characteristic parameters of Ni element in soil

土层厚度/cm	拟合模型	块金值	基台值	变程/km	基底效应(%)	决定系数	残差
0~ 20	球状模型	7.44	12.27	24.03	60.64	0.030	2.64
20~ 40	指数模型	17.96	22.63	24.03	79.36	0.451	3.98
40~ 60	球状模型	0.03	0.03	24.03	82.16	0.105	3.58
60~ 80	指数模型	33.92	47.93	24.03	70.77	0.115	5.96

半方差函数在原点处的数值称为块金常数( $C_0$ ),是由测定误差和小于最小采样尺度的非连续性变异引起的,属于随机变异。基台值( $C_0 + C_1$ )通常表示系统内总变异,它是结构性变异和随机性变异之和。块金值( $C_0$ )与基台值( $C_0 + C_1$ )之比表示随机性变异在系统总变异中占的比例,称为基底效应,反映了土壤属性的空间依赖性,表达了土壤重金属元素在一定范围内样点的空间自相关程度,该比值 $C_0/(C_0 + C_1)$ 越大,表明空间自相关性

越弱,受人为因素影响越大,基底效应常被用作研究变量空间相关的分类依据<sup>[14-15]</sup>。当 $C_0/(C_0 + C_1) < 25%$ 时,表明变量具有强烈的空间自相关性;当比值 $25% < C_0/(C_0 + C_1) < 75%$ 时,变量具有中等自相关性;当比值 $C_0/(C_0 + C_1) > 75%$ 时,变量的空间自相关性很弱,以随机变异为主<sup>[16]</sup>。变程反映的是空间自相关范围,它与观测以及取样尺度上影响土壤性状的各种过程的相互作用有关<sup>[12]</sup>,在变程范围内,变量有空间自相关性,反之则不存在。利用半变异函数计算公式,计算出半方差函数散点图,分别用不同模型拟合,得到模型的相关参数值。决定系数越好,残差越小,则模型拟合效果越好。此处残差采用样本残差值的绝对平均值,能有效的排除正负残差值互相抵消的影响,更具有说服力。

利用半方差模型对土壤重金属进行拟合,用ArcGIS软件计算重金属的半方差特征参数,结果见表2(以Ni为例)。Ni元素在20~ 40 cm以及40~ 60 cm的土层中基底效应达到了79.36%和82.16%,证明其空间相关性不显著,以随机变异为主,可能受人为活动影响较多(如城镇改建、人为污染,也包括再生水灌溉等);而0~ 20 cm和60~ 80 cm的基底效应为60.64%、70.77%,在中等自相关的范围内,表现出

一定的空间自相关性。值得一提的是,在拟合的 4 个土层的两种模型中,变程均为 24 km,表明 Ni 在同一取样点的不同土层深度表现出较大空间范围内的一致性,这说是因为研究区域集中,虽然取样点分层,但是平面坐标一致,当然也可能受土壤母质影响等内在因子控制。

### 2.4 土壤重金属空间分布格局

以拟合的半方差函数模型(球型和指数模型)为计算模型,采用普通克里格插值法进行最优内插,得到 Ni 元素在 4 个取样土层中的空间分布格局图,见图 1。新河灌区土壤的 Ni 元素含量在取样的 4 个土层均有不同的分布特点。

对于 0~20 cm 的土层,处于北部的再生水灌区及再生水引水口处,土壤 Ni 元素含量偏高,与东南部的井灌区形成鲜明的对比,体现了再生水灌溉对浅层土壤产生了一些短期的影响;而对于 20~40 cm 土层的重金属 Ni 元素含量,再生水灌区与井灌区并无明显的差别,可能与所种植的作物(如玉米、小麦)根系的吸收转移有关<sup>[17]</sup>;处于中下层的 40~60 cm 土层与 60~80 cm 土层的含量相互比较接近,西北高,东南低。最底层的 Ni 元素含量略高于 40~60 cm 土层。这些特征体现了重金属的迁移是一个长期的过程。

本文空间插值的总体精度采用了交叉验证法进行评价,即先假定每一个采样点的含量值未知,利用周围样点的值来估算,然后计算估计值与实际测定值的误差,根据误差统计的结果评估插值效果的好坏。常用的误差统计指标有平均误差、均方根误差、平均标准误差、标准化平均误差、标准化均方根误差。如果平均误差的绝对值最接近于 0;标准化平均误差的绝对值最接近于 0;平均标准误差与均方根误差最接近;标准化均方根误差最接近于 1,则该插值精度越高<sup>[18]</sup>。由表 3 可知,4 个土层的插值精度均较理想,尤其是 0~20 cm 的土层。

表 3 不同土层 Ni 元素插值的误差比较

Table 3 Comparison of interpolation error of Ni element in different soil sampling layers

土层厚度 / cm	平均误差	均方根误差	平均标准误差	标准化平均误差	标准化均方根误差
0~20	0.011 8	3.152	3.061	0.005 287	1.031
20~40	-0.035 6	5.063	4.683	-0.009 794	1.082
40~60	0.048 42	4.328	4.418	0.006 125	0.975
60~80	-0.081 3	6.877	6.618	-0.006 102	1.039

### 3 结论

(1)新河灌区土壤中重金属含量符合正态分布,Cd 和 Zn 的平均值含量分别高出背景值 0.35 和 6.45 的含量,再生水灌溉已对土壤重金属含量产生了显著影响,但参考前人在通州区取样研究的相关结论,通过作物(小麦)生长收获带出重金属的量,Cd 与 Zn 只占土壤背景量的 0.666 7‰和 0.355 5‰,即 0.000 3 和 0.023 2 的含量(mg/kg),远低于国家粮食卫生标准(GBN 238-84、GB 13106-91)的 0.1 与 50,不会对人体健

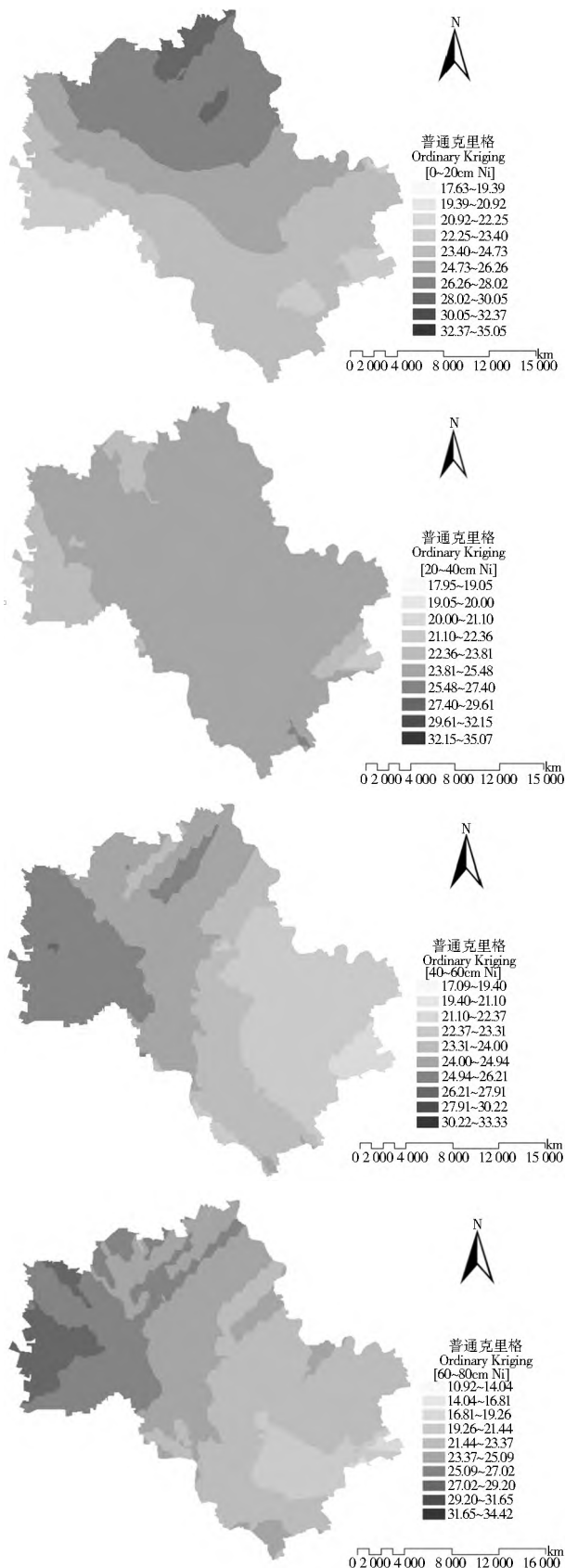


图 1 土壤重金属 Ni 元素含量的空间分布图(mg·kg<sup>-1</sup>)

Fig. 1 Spatial distribution of Ni element contents (mg·kg<sup>-1</sup>)

康产生危害。土壤重金属平均变异程度由大到小依次为 Cd、Zn、Cu、As、Ni、Pb、Cr,其中,土壤 Cd、Zn 和 Cu 的变异系数明显高于其他元素,而 Cd 的平均变异系数达到了 0.46,说明土壤中 Cd 的含量受外界干扰明显,元素来源广泛、空间

差异大;而其余几种元素,包括 Ni、Pb、Cr,具有一定的空间相关性,变异程度小。

(2) 半方差函数模型拟合结果表明,在 0~20 cm 的土层中 Ni 元素为球状模型,60~80 cm 土层为指数模型,表现出中等空间相关性;而土壤 20~60 cm 土层的半方差函数模型均表现为块金效应明显的弱空间相关性,土壤各样点之间表现出较强的独立性和随机性,反映了污废水排放对城郊土壤重金属空间变异的干扰。

(3) 采用普通克里格最优内插法得到了北京通州区新河灌区土壤重金属 Ni 元素含量空间分布图,其中 40~60 cm 土层与 60~80 cm 土层的分布总体上比较相似,呈现西北高,东南低的特点,其高值区主要分布在再生水灌溉引水入口和灌区内主要引水渠道的周边地区,以西北部采样点一样田 1 为中心,聚集在上游河道附近,下游散布的几个高值点,主要受随机误差与背景高值的影响,在总采样点中的比例也不大(3/14 的比例),因此可认为再生水灌溉已成为影响土壤重金属污染的重要因素,但是总体污染并不严重,考虑土壤自身具有一定的自净能力,采用一定灌溉周期的低频灌溉是可行的。

#### 参考文献(References):

- [1] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268. (LI Liangliang, YI Yanli, LING Guoxin, et al. Utilization of Geostatistics in Soil Spatial Variability [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 265-268. (in Chinese))
- [2] 杨庆, 林健, 杨巧凤. 再生水灌溉之地下水影响的监测研究[J]. 城市地质, 2012, 7(2): 22-23. (YANG Qing, LIN Jian, YANG Qiaofeng. The Influence Mechanism of the Reclaimed Water Irrigation on Groundwater [J]. Urban Geology, 2012, 7(2): 22-23. (in Chinese))
- [3] LIN Yurpin. Multivariate Geostatistical Methods to Identify and Map Spatial Variations of Soil Heavy Metals[J]. Environmental Geology, 2002, 42: 1-10.
- [4] McGratha D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical Analyses and Hazard Assessment on Soil Lead in Silvermines Area, Reiland[J]. Environmental Pollution, 2004, 127: 239-248.
- [5] 夏运生, 万洪富, 杨国义, 等. 东莞市不同区域菜地土壤重金属污染状况研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 170-172. (XIA Yunsheng, WAN Hongfu, YANG Guoyi, et al. The Heavy Metal Contamination of Vegetable Soil in Dongguan City[J]. Ecological Environment, 2004, 13(2): 170-172. (in Chinese))
- [6] 魏秀国, 何江华, 王少毅, 等. 广州市菜园土和蔬菜中镉含量水平及污染评价[J]. 土壤与环境, 2002, 11(2): 129-132. (WEI Xiuguo, HE Jianghua, WANG Shaoyi, et al. Concentration and Evaluation on Pollution of Cd in Vegetable Farm Soils and Vegetables of Guangzhou[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(2): 129-132. (in Chinese))
- [7] 李其林, 黄响. 重庆市近郊区蔬菜地土壤重金属含量变化及污染情况[J]. 土壤通报, 2002, 33(2): 158-160. (LI Qilin, HUANG Yun. Change of the Content of Heavy Metal and Contamination in Soil of the Vegetables Bases in Suburbs of Chongqing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(2): 158-160. (in Chinese))
- [8] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征[J]. 地理研究, 2004, 23(1): 63-70. (LIU Fucheng, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Characteristics of Spatial Variability of Total Soil Nitrogen in the Typical Area of Taihu Lake Basin[J]. Geographical Research, 2004, 23(1): 63-70. (in Chinese))
- [9] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西省兴国县土壤全氮和机质的空间变异及其分布格局[J]. 应用与环境生物学, 2004, 10(1): 64-67. (CHENG Xianfu, SHI Xuezheng, YU Dongsheng, et al. Spatial Variance and Distribution of Total Nitrogen and Organic Matter of Soil in Xingguo County of Jiangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(1): 64-67. (in Chinese))
- [10] 余国营, 吴燕玉. 土壤环境中重金属元素的相互作用及其对吸附特性的影响[J]. 环境化学, 1997, 16(1): 31-36. (YU Guoying, WU Yanyu. Effects of Heavy Metals Joint Action on Their Characteristic of Sorption and Desorption in Brown Soil[J]. Environmental Chemistry, 1997, 16(1): 31-36. (in Chinese))
- [11] 刘洪禄. 再生水灌溉技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 110-112. (LIU Honglu. Reclaimed Water Irrigation Technology Research [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009: 110-112. (in Chinese))
- [12] 巫常林, 黄冠华, 刘洪禄, 等. 再生水短期灌溉对土壤作物中重金属分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 91-96. (WU Changlin, HUANG Guanhua, LIU Honglu, et al. Experimental Investigation on Heavy Metal Distribution in Soil-crop System With Irrigation of Treated Sewage Effluent [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(7): 91-96. (in Chinese))
- [13] 阎波杰, 潘瑜春, 赵春江. 区域土壤重金属空间变异及合理采样数确定[J]. 农业工程学报, 2008, 24(Supp. 2): 260-264. (YAN Bojie, PAN Yuchun, ZHAO Chunjiang. Spatial Variability and Reasonable Sampling Number of Regional Soil Heavy Metals[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(Supp. 2): 260-264. (in Chinese))
- [14] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (XU Jianhua. Mathematical Methods in Modern Geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))
- [15] LIU Xingmei, WU Jiarjun, XU Jianning. Characterizing the Risk Assessment of Heavy Metals and Sampling Uncertainty Analysis in Paddy Field by Geostatistics And GIS[J]. Environmental Pollution, 2006, 141: 257-264.
- [16] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000. (ZHANG Renduo. Spatial Variation Theory and Application [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese))
- [17] 杨元根, PETERSON E, CAMPBELL C. Biolog 方法在区分城市土壤与农村土壤微生物特性上的应用[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 582-589. (YANG Yuan-gen, PETERSON E, CAMPBELL C. Application of Biolog Method to Study on Microbial Features in Urban and Rural Soils [J]. Acta Pedagogica Sinica, 2002, 39(4): 582-589. (in Chinese))
- [18] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 41-45. (TANG Gu'an, YANG Xin. Spatial Analysis Experiment Tutorial of ArcGIS Geographic Information System [M]. Beijing: Science Press, 2006: 41-45. (in Chinese))