

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.011

# 农田土壤重金属季节性变化周期研究\*

王圣伟<sup>1,2</sup> 冯娟<sup>2,3</sup> 刘刚<sup>2</sup> 张天蛟<sup>2</sup>

(1. 西北师范大学计算机科学与工程学院, 兰州 730070;

2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

3. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

**摘要:** 农田土壤重金属变化对于农田作物种植安全有着重要的影响。对山东省滨州市农田耕层土壤重金属 Pb、Hg、Cd、Cr、Cu 和类重金属 As 按照季度间隔进行了从 2010 年 1 月至 2013 年 1 月的采样测试。采用周期分析和快速傅里叶变换(FFT)谱分析方法计算各重金属的主分量周期,并做周期检验。研究表明农田土壤重金属具有不同程度的累积趋势,Pb 具有 2 个季度的主分量周期,Cd 和 As 具有 4 个季度的主分量周期,其他重金属主周期特征不明显。

**关键词:** 土壤重金属 季节性变化 周期分析 快速傅里叶变换 功率谱分析

**中图分类号:** S159; S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0056-06

## Periodic Analysis of Seasonal Variation in Soil Heavy Metals

Wang Shengwei<sup>1,2</sup> Feng Juan<sup>2,3</sup> Liu Gang<sup>2</sup> Zhang Tianjiao<sup>2</sup>

(1. College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

**Abstract:** The variation of heavy metal content in soils has important influence on cultivation security of crops. The concentrations of Pb, Hg, Cd, Cr, Cu and similar heavy metal As in arable soil were quarterly recorded in Binzhou of Shandong during the period from January 2010 to January 2013. The methods of periodic analysis and fast Fourier transform (FFT) spectral analysis were applied to calculate the principal component cycle of heavy metals, and to make further periodic test. The results showed that there was a different degree of accumulation trends in metals between the periods. The principal component cycle of Pb was two quarters in a year, Cd and As had four quarters as the main component cycle, and other heavy metals major cycle characteristics was not obvious.

**Key words:** Soil heavy mental Seasonal variation Period analysis Fast Fourier transform Power spectral analysis

## 引言

对农田土壤重金属的时域研究具有农田管理和食品安全的重要意义。农田土壤重金属来源受到成土母质、大气沉降、轮作耕种、农药施肥等多种因素

的复杂影响<sup>[1]</sup>,土壤微生物以及根系化学作用会造成土壤 pH 值的周期性季节变化<sup>[2]</sup>,同样影响土壤重金属离子态和不同形态以及有效态的变化<sup>[3]</sup>。有效态的变化以及降水、农田灌溉、作物吸附、地表径流和地下渗流等因素的存在,使得土壤重金属含

收稿日期: 2013-02-26 修回日期: 2013-04-11

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100704)

**作者简介:** 王圣伟,讲师,中国农业大学博士生,主要从事农业信息化、空间评价研究,E-mail: flaxwork\_mail@qq.com

**通讯作者:** 刘刚,教授,博士生导师,主要从事精细农业电子信息研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

量存在迁移变化。各种重金属形态受到土壤理化性质和外源的影响造成迁移率变化,作为土壤运动较为频繁的农田土壤,其重金属总量具有较高的迁移率<sup>[4]</sup>。以上原因造成了农田土壤重金属存在着季节性变化。国内外对水体和沉积底泥的重金属季节变化均有研究<sup>[5-7]</sup>,Candelone<sup>[8]</sup>对格陵兰地区连续两年雪样分析发现铅、镉、锌和铜元素具有明显季节性。Melaku<sup>[9]</sup>等对华盛顿地区的空气样品和湿沉降样本的砷、镉、铬、铅检测发现两类样品均存在着重金属季节性变化。农田土壤重金属的理化性质更为复杂,而对其季节性的研究较少。通常对于序列的时域研究无法提取时间序列各周期分量所包涵的贡献作用,导致对序列的周期变化根源分析不足。采用谱分析<sup>[10]</sup>和周期分析方法可在频域范围内分析多个周期分量的叠加效果,发现时域序列隐含的主分量周期。本文通过对农田土壤重金属时间序列进行相应功率谱分析,确定土壤重金属的季节性主周期,可进一步建立时间序列模型<sup>[11]</sup>。

## 1 研究区域概况

研究试验区位于东经 117°58′、北纬 37°25′ 的山东省滨州市滨城区农业示范基地,面积 2.614 hm<sup>2</sup>。该区属东亚暖温带亚湿润大陆性季风气候,冬冷夏热,雨热同期,四季分明。全区平均气温 13.7℃,极端最高气温 38.2℃,极端最低气温 -17.8℃。年平均降水量 537.2 mm,年平均日照 2 526.9 h。土壤主要为潮土和盐土,耕层土壤质地:沙壤占 7.9%,轻壤占 56.7%,中壤占 26.9%,重壤占 8.2%,粘土占 0.3%。黄河冲积物是唯一成土母质的基础物质,部分区域土壤存在盐渍化。作物种植采用冬小麦-夏玉米轮作,冬小麦施用基肥以有机肥为主,追肥以复合肥、过磷酸钙和氮肥为主,夏玉米施用玉米攻苞肥和速效肥。试验地块平均 pH 值 7.8 左右,养分平均数据:有机质质量分数 1.7%,有效磷质量比 30.5 mg/kg,速效钾质量比 103.7 mg/kg,水解性氮质量比 80.6 mg/kg,全氮质量分数 1.23%。土壤肥力指标基本达到或超过 NY/T 391—2000 规定的标准。

## 2 材料与方法

### 2.1 样本采集测试

分别于 2010~2013 年 1、4、7 和 10 月初在试验地块以 30 m × 30 m 间隔进行均匀分布采样,采集土壤样本 13 次,每次样本 9 个。采样深度为土壤耕层 0~20 cm,四分法混合采样,风干过筛。按 GB/T 15337—2008 标准通则,对土壤中重金属 Pb、Hg、Cd、Cr、Cu 以及类重金属元素 As 进行含量检测。检

测方法:As 和 Hg 采用氢化物原子荧光法测定,Pb 和 Cd 采用石墨炉原子吸收光谱法测定,Cr 和 Cu 采用火焰原子吸收光谱法测定。

### 2.2 周期图分析

周期图分析又称谐波分析。通常功率谱分析采用的是快速傅里叶变换(FFT),而周期图的计算过程是基于最小二乘法。就谱分析角度而言,周期图的计算结果更准确。FFT 的应用对象是较长的序列,周期图适合于较短的时间序列。

谐波分析方法的定义:假定时间序列  $y_t$  展开为傅里叶级数,可表示为

$$y_t = \sum_{i=1}^k (a_i \cos(2\pi f_i t) + b_i \sin(2\pi f_i t)) + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中  $f_i$ ——频率  $t$ ——时间序号

$k$ ——周期分量的个数,即主周期(基波)及其谐波的个数

$\varepsilon_t$ ——残差(白噪声序列)

$a_i, b_i$ ——待定系数

当频率  $f_i$  给定时,式(1)可被认为是多元线性回归模型。借助于多元回归分析理论,当  $k \neq n/2$  时,待定系数  $a_i, b_i$  的最小二乘估计为

$$\hat{a}_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos(2\pi f_i t) \quad (2)$$

$$\hat{b}_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin(2\pi f_i t) \quad (3)$$

其中, $n$  为观测值个数,若  $n$  为偶数,则当  $i=0$  或  $i=n/2$  时,参数  $a_i$  的估计公式改为

$$\hat{a}_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos(2\pi f_i t) \quad (4)$$

由此得到时间序列的周期强度定义为

$$I(f_i) = \frac{n}{2} (a_i^2 + b_i^2) \quad (5)$$

式中, $I(f_i)$  为频率  $f_i$  处的强度( $i=0, 1, \dots, n-1$ ),可以证明  $I(f_i)/2$  即为谱密度。以  $f_i$  为横轴, $I(f_i)$  为纵轴,绘制时间序列的周期图,可以在最大值处找到时间序列的主周期。

### 2.3 快速傅里叶变换谱分析

快速傅里叶变换是一种提高傅里叶变换速度的方法,属于功率谱分析范围。根据对序列分解和选取方法的不同,FFT 基本有 2FFT 和 4FFT 两种算法。有限时间序列可通过离散傅里叶变换(DFT)将其离散化为有限长序列。Cooley J W 和 Tukey T W 提出了计算离散傅里叶变换(DFT)的快速方法<sup>[12]</sup>。基本算法有时域抽取法(DIT-FFT)和频域抽取法(DIF-FFT)。DFT 算法思想是把长序列的 DFT 分解为几个短序列的 DFT,并利用旋转因子  $W_N^k$  的周

期性和对称性来减少 DFT 的运算次数。DIT-2FFT 算法定义:

(1) 把时间序列  $y(n)$  按照  $n$  的奇偶性分成  $y_1(n)$ 、 $y_2(n)$  两组序列,用 2 个  $n/2$  点 DFT 来完成 1 个  $n$  点 DFT 的计算,即

$$\begin{cases} y_1(r) = y(2r) \\ y_2(r) = y(2r+1) \end{cases} \quad \left( r=0,1,\dots,\frac{n}{2}-1 \right) \quad (6)$$

(2) 用这 2 个序列的 DFT 函数构成  $y(n)$  的 DFT 表达

$$\begin{cases} y(k) = y_1(k) + W_N^k y_2(k) \\ y\left(k + \frac{n}{2}\right) = y_1(k) - W_N^k y_2(k) \end{cases} \quad \left( k=0,1,\dots,\frac{n}{2}-1 \right) \quad (7)$$

式中,  $W_N^k$  为旋转因子系数,这样就可以将  $n$  点 DFT 分解为 2 个  $n/2$  点的 DFT 的运算,如此不断分解迭代可得到 2 个  $n/2$  的 DFT,由此得到  $n$  点 DFT。

进而计算  $y(n)$  的功率谱密度

$$P(f_n) = \frac{1}{n} |y(n)|^2 \quad (8)$$

以频率  $f_i$  为横轴,谱密度  $P(f_n)$  为纵轴,绘制时间序列的频谱图,可以在最大值处找到时间序列的周期,在频谱图尖峰突出点处得到主分量周期。

## 2.4 周期检验

谱分析的目的,不仅在于得到随机序列的谱展开式和谱图(谐波分析为周期图),还必须指明较强的谱成分对序列方差贡献大小的可靠性,从而识别真正的周期分量。峰值点表明这些谱成分最强,对方差的贡献最大;谷值点的谱成分最弱,对方差贡献最小。谱的周期性检验目的是为了检验样本估计值和已知的非周期过程的谱密度差异是否显著,如果显著则认为该谱估计值反映了周期过程的存在,反之说明周期变化不明显。本文采用振幅检验和 Fisher 检验对频域谱周期进行周期检验。

### 2.4.1 振幅检验

在显著性水平 0.05 的情况下,检验序列  $x_i$  的相应振幅为  $A_{0.05}$ ,则有

$$A_{0.05}^2 = \frac{4\sigma^2 \ln(20l)}{n} \quad (9)$$

其中  $n$  为样本长度, $l$  为谐波的总个数( $n$  为偶数时, $l = n/2$ ;  $n$  为奇数时, $l = (n-1)/2$ ),  $\sigma^2$  为序列方差。如果  $l$  个波数中的最大振幅满足  $A_i^2 > A_{0.05}^2$ ,则认为对应的周期  $T = n/i$  为主分量周期<sup>[13]</sup>。

### 2.4.2 Fisher 检验

该检验的思想为:如果样本周期图或者是频谱图中至少存在一个值比周期强度或者是频谱密度的平均值大得多,则有理由拒绝原假设<sup>[14]</sup>。取显著性

水平 0.05 情况下,周期序号  $m = 1$ , 判别量  $s = n/2$ 。检验定义<sup>[15]</sup>:

假设检验样本  $y_i$  中存在周期,定义统计量

$$G_i = \frac{\max(y_i)}{\sum y_i} \quad (10)$$

取显著性水平  $\alpha = 0.05$  情况下,若  $G_i > G_{0.05}(s, m)$  则检验通过,假设成立,存在周期;否则拒绝原假设。

## 3 结果与分析

对滨州示范试验区 2010 年 1 月至 2013 年 1 月的农田土壤重金属每季度的平均数据进行统计性描述,并做正态分布检验(表 1)。对于小样本情况采用 Shapiro-Wilk(W 检验)非参数检验<sup>[16]</sup>。

表 1 数据统计检验表

Tab.1 Data statistical test

重金属项	质量比/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		变异系数	W 检验 P 值
	平均值	标准差		
铅(Pb)	19.37	2.208	0.114	0.455
汞(Hg)	0.101	0.0314	0.311	0.321
镉(Cd)	0.073	0.0368	0.504	0.194
铜(Cu)	18.28	2.5417	0.139	0.902
铬(Cr)	17.87	4.18	0.234	0.741
砷(As)	6.73	2.198	0.327	0.422

从表 1 可以看出农田重金属在时间变化上基本都属于中等变异程度。其中 Cd、As 和 Hg 变异系数较高,说明受到外源间隔影响变化较高。Cd 和 As 由于施肥量的变化具有较大差异性<sup>[17]</sup>,Hg 源于有机质降解的影响造成变化<sup>[18]</sup>。而 Pb 变异系数较小,说明在时间上 Pb 受到的变化影响因素是持续性的。对数据做的 Shapiro-Wilk(W 检验)非参数检验 P 值均大于 0.05,这表明在置信水平 0.05 的情况下,时间序列的重金属具有正态分布特征。农田土壤重金属的时间序列变化趋势如图 1 所示,用虚线表示线性变化趋势。

从趋势图中看出,农田土壤重金属都具有累积增长趋势,其中 Cd 和 Cr 的累积趋势较为明显。不同季节存在着一定的季节性周期变化,其中 Pb、Hg 在春季冬小麦拔节期含量较高,Cd、As 在夏季冬小麦成熟期含量明显增高,Cr 在秋冬交季冬小麦出苗期含量较高。

对农田重金属季度数据进行周期图分析和 FFT 谱分析。得到周期分析图(图 2)和功率谱密度分析图(图 3)。

利用振幅检验对周期强度和谱密度进行检验得到重金属振幅检验  $A_{0.05}$ ,结果如表 2 所示。

分别与周期图和谱分析图的最大波幅值对比,满足  $A_i^2 > A_{0.05}^2$  条件的主分量周期见表 3。

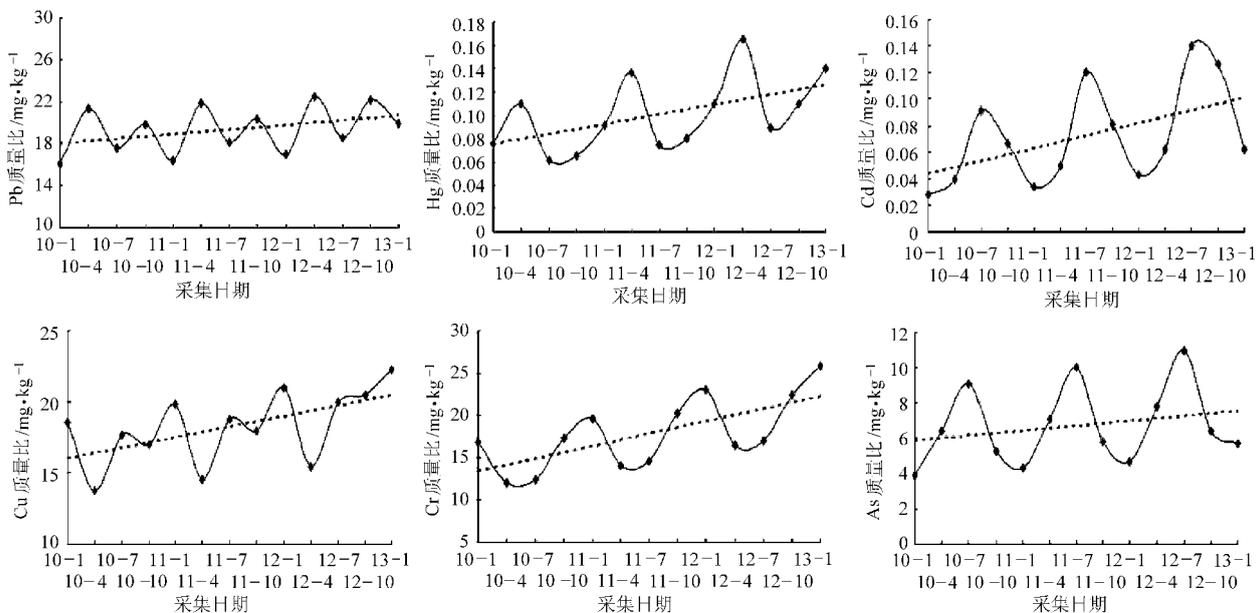


图1 土壤重金属季节趋势图

Fig. 1 Seasonal trends of soil heavy metals

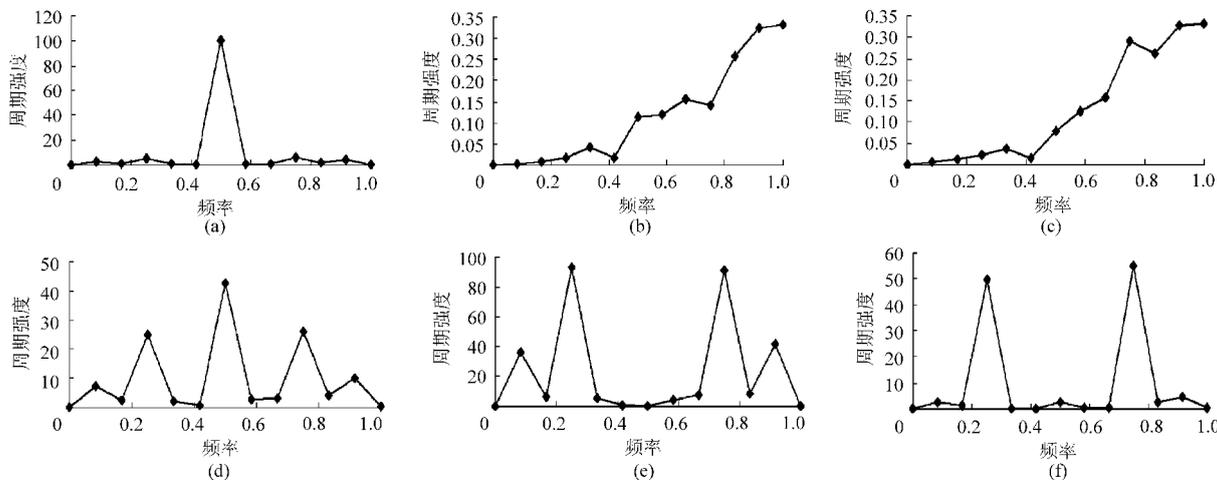


图2 重金属周期分析图

Fig. 2 Analysis of heavy metal periods

(a) Pb (b) Hg (c) Cd (d) Cu (e) Cr (f) As

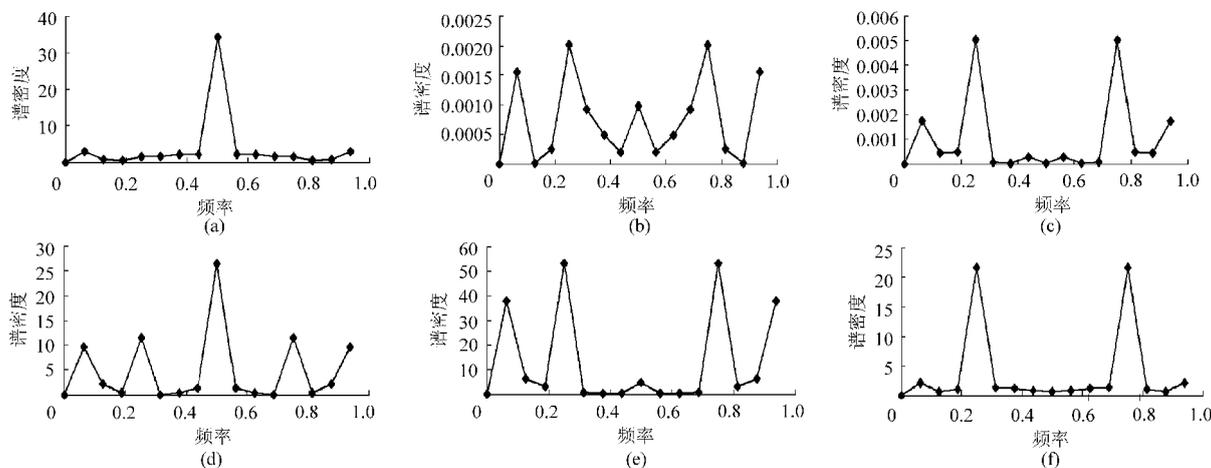


图3 重金属 FFT 谱密度分析图

Fig. 3 FFT spectrum density analysis of heavy metals

(a) Pb (b) Hg (c) Cd (d) Cu (e) Cr (f) As

表2 振幅检验统计量值  
Tab.2 Amplitude test statistics

统计量	Pb	Hg	Cd	Cu	Cr	As
周期强度	34.499 16	0.153 335	0.027 524	16.711 66	42.429 33	24.443 88
谱密度	9.223 723	0.000 795	0.001 868	8.135 634	22.383 68	7.949 497

表3 振幅检验主分量周期

Tab.3 Principal component cycle tested by amplitude

统计量	Pb	Hg	Cd	Cu	Cr	As
周期强度	2	1.5	1.33	2	4	4
谱密度	1.78	3.2	3.2	1.78	3.2	3.2

可以看出除了 Hg 和 Cd 以外,其他重金属主分量周期在周期分析(谐波分析)和功率谱分析中基本相符合,随着序列路径长度的拉伸,周期会重合。

表4 Fisher 检验主分量周期显著性

Tab.4 Significance of principal component cycle tested by Fisher test

统计量	Pb	Hg	Cd	Cu	Cr	As
周期强度	0.805 645	0.217 282	0.199 678	0.336 31	0.315 492	0.465 014
谱密度	0.501 299	0.160 435	0.480 782	0.381 022	0.632 257	0.433 666

通过检验可以看出,在周期强度的检验中,Pb、As 的第一主周期 95% 可能性可以成立。谱密度 Fisher 检验中,可看出 Pb 和 Cr 的主周期分别确认为 2 季度和 4 季度。可得到重金属 Pb、Cr、As 的主分量周期特征较为明显,存在主分量周期。说明主要影响农田土壤重金属 Pb 变化的原因来自于一年两熟的轮作制度和两季空气污染排放<sup>[20]</sup>,Cr、As 存在年周期特征表明土壤含量变化的主要特征来自于土壤酸碱性变化引起的重金属离子态变化<sup>[21]</sup>和追肥措施<sup>[17]</sup>。其他元素最大周期为主周期的可能性较低,说明引起含量变化的影响因素较多,主要因素特征不明显。同样 Hg、Cu 和 Cd 的最大周期为主周期的可能性较低,结果与周期分析图较为相符。但谱密度由于序列长度较短,频率不够密集的情况下,补充 0 数据造成的误差较大,所以符合周期分析适合于序列较短数据的原理。

对于 Hg 而言,比较周期图(图 2)和谱图(图 3),可以看出 Hg 和 Cd 的变化周期较多,在已知路径长度存在的周期不一定是其主分量周期。这与 Hg 受到的土壤特性变化影响较敏感有关,Cd 与土壤长期施肥累积有关造成主周期性表现不明显<sup>[19]</sup>。

利用调和分析 Fisher 检验对周期强度和谱密度进行检验,Fisher 统计表中  $G_{0.05}(5,1) = 0.683 77$ ,  $G_{0.05}(10,1) = 0.444 95$ 。 $G_t$  结果如表 4 所示。

## 4 结论

(1) 农田土壤重金属存在着一定的季节性变化和累积效应,在农田耕作中应该注意避免过量施肥和注意农田酸碱度控制。

(2) 周期分析方法相对于快速傅里叶谱密度分析更适用于时间序列路径长度较短的研究情况。

(3) 结合农田土壤时间变异分析和农田耕作特性,一年两熟耕作机制以及季节性施肥的作用,可看出 Pb、As 和 Cr 的周期合理性受农田周期耕作影响。而 Hg、Cu、Cd 由于长期累积效应,存在着自身潜在与水文周期有关的未来周期性,在当前 3 年 13 个季节数据中不够显著,呈现一定增长的趋势和不够稳定的周期表现,周期图谱中也表现出次要周期特征受到了农业耕作的季节性影响。在中短期预测中,可以适当考虑 Hg、Cu、Cd 的周期特征作为主周期来进行时序预测。

## 参 考 文 献

- Cui Yujing, Zhu Yongguan, Zhai Rihong, et al. Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China[J]. Environment International, 2005, 31(6): 784 ~ 790.
- 刘艳,周国逸,褚国伟,等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤酸度与土壤养分的季节动态[J]. 生态环境,2005,14(1): 81 ~ 85.  
Liu Yan, Zhou Guoyi, Chu Guowei, et al. Seasonal dynamics of soil acidity and nutrient contents under coniferous and broad-leaved mixed forest at Dinghushan [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(1): 81 ~ 85. (in Chinese)
- Gerhard G, Hans B. Microbial competition, lack in macronutrients, and acidity as main obstacles to the transfer of basidiomycetous ground fungi into (organically or heavy-metal contaminated) soils [J]. Journal of Basic Microbiology, 2007, 47(4): 309 ~ 316.
- 李小虎,汤中立,初凤友. 金昌市铜镍矿区周围土壤中重金属的迁移特征[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2009,39(1): 131 ~ 136.  
Li Xiaohu, Tang Zhongli, Chu Fengyou. Transfer behavior of heavy metals in soil around Cu - Ni mining area in Jinchang [J].

- Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2009, 39(1): 131 ~ 136. (in Chinese)
- 5 郭海涛, 张进忠, 魏世强, 等. 长寿湖底泥中重金属的季节性变化[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 327 ~ 332.  
Guo Haitao, Zhang Jinzhong, Wei Shiqiang, et al. Seasonal variation of heavy metals in the sediment of Changshou Lake [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6): 327 ~ 332. (in Chinese)
- 6 刘潭秋, 沈新平, 王汉华. 基于一种时间序列模型的河流重金属污染浓度预测研究[J]. 计算技术与自动化, 2012, 31(3): 29 ~ 33.  
Liu Tanqiu, Shen Xiuping, Wang Hanhua. Forecast study on forecasting pollutant concentration of heavy-metal contaminants in streams [J]. Computing Technology and Automation, 2012, 31(3): 29 ~ 33. (in Chinese)
- 7 Li Siyue, Zhang Quanfa. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the Upper Han River, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1 ~ 3): 1 051 ~ 1 058.
- 8 Candelone J P, Jaffrezou J L, Hong S, et al. Seasonal variations in heavy metals concentrations in present day Greenland snow [J]. Science of the Total Environment, 1996, 193(2): 101 ~ 110.
- 9 Melaku S, Morris V, Raghavan D, et al. Seasonal variation of heavy metals in ambient air and precipitation at a single site in Washington, DC [J]. Environmental Pollution, 2008, 155(1): 88 ~ 98.
- 10 杨忠直, 李莉. 我国地区经济周期波动的同步化实证分析[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(3): 326 ~ 331.  
Yang Zhongzhi, Li Li. Empirical study on spectrum analysis of business cycle synchronization in Chinese regions [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010, 44(3): 326 ~ 331. (in Chinese)
- 11 左志宇, 毛罕平, 张晓东, 等. 基于时序分析法的温室温度预测模型[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 173 ~ 177, 182.  
Zuo Zhiyu, Mao Hanping, Zhang Xiaodong, et al. Forecast model of greenhouse temperature based on time series method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 173 ~ 177, 182. (in Chinese)
- 12 宋琼, 朱长春, 牛宝良. 基2快速傅里叶变换引入的不确定度估算[J]. 计量学报, 2004, 25(3): 281 ~ 283.  
Song Qiong, Zhu Changchun, Niu Baoliang. The uncertainty evaluation of base 2 fast fourier transfer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(3): 281 ~ 283. (in Chinese)
- 13 赵利红. 水文时间序列周期分析方法的研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- 14 Brockwell P J, Davis R J. 时间序列的理论与方法[M]. 田铮, 译. 北京: 高等教育出版社, 2001: 32 ~ 56.
- 15 喻达磊, 李德旺, 徐达明, 等. 葡萄酒月度价格指标的季节 ARIMA 时间序列分析[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2008, 17(1): 47 ~ 50.  
Yu Dalei, Li Dewang, Xu Daming, et al. Application of seasonal ARIMA method to wine price index analysis [J]. Journal of Yunnan Nationalities University: Natural Sciences Edition, 2008, 17(1): 47 ~ 50. (in Chinese)
- 16 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- 17 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 等. 土壤中重金属污染现状与防治方法[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79 ~ 84.  
Zheng Xishen, Lu Anhuai, Gao Xiang, et al. Contamination of heavy metals in soil present situation and method [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(1): 79 ~ 84. (in Chinese)
- 18 Han S, Gieskes J, Obratsova A, et al. Relocation effects of dredged marine sediments on mercury geochemistry: Venice lagoon, Italy [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 93(1): 7 ~ 13.
- 19 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 953 ~ 961.  
Zhao Jing, Feng Wenqiang, Qin Yusheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 953 ~ 961. (in Chinese)
- 20 郭建斌, 陈珏. 北京市空气污染季节变化规律研究及污染控制建议[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 952 ~ 956.  
Guo Jianbin, Chen Jue. Patterns of seasonal change in air pollution and suggestions on pollution control in Beijing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 952 ~ 956. (in Chinese)
- 21 Du Ping, Xue Nandong, Liu Li, et al. Distribution of Cd, Pb, Zn and Cu and their chemical speciations in soils from a perismlter area in northeast China [J]. Environmental Geology, 2008, 55(1): 205 ~ 213.
- 22 王圣伟, 冯娟, 刘刚, 等. 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 128 ~ 135.  
Wang Shengwei, Feng Juan, Liu Gang, et al. Multi-nesting spatial scales of soil heavy metals in farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 128 ~ 135. (in Chinese)