

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 $PM_{2.5}$ 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用 $\delta^{15}N-NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O-NO_3^-$ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局

高凤杰¹, 马泉来¹, 韩文文¹, 单培明¹, 周军², 张少良^{1*}, 张志民¹, 王宏燕¹

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省环境科学研究院, 哈尔滨 150036)

摘要: 土壤有机质的空间变异和分布格局是土壤科学领域研究的热点。在经典统计学和地统计学的基础上, 结合“3S”技术, 对黑土丘陵区海沟河小流域土壤表层(0~20 cm)中有机质的空间变异、分布特征及影响因子进行深入探讨。结果表明, 海沟河小流域土壤有机质含量在黑土区处于较低水平, 变异程度为中等变异, 且存在空间自相关性; 土壤有机质的空间变异受人类活动、耕作措施等随机因素影响很小, 受结构性要素影响较大, 空间上各向异性显著; 土壤有机质含量从东向西逐步减小, 以高程为协变量的协同克里格插值能够提高空间插值精度。土壤有机质空间分布受地形地貌等自然因素以及受其制约的土地利用的影响较大, 受交通道路、居民点等要素的影响较小; 采样点周边环境会增加有机质的空间变异和分布的不确定性。以流域为单元, 进行 SOM 的空间变异、分布及影响因子研究具有重要意义和科学价值。

关键词: 黑土丘陵区; 土壤有机质(SOM); 空间变异; 分布格局; 影响因素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1915-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.040

Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China

GAO Feng-jie¹, MA Quan-lai¹, HAN Wen-wen¹, SHAN Pei-ming¹, ZHOU Jun², ZHANG Shao-liang^{1*}, ZHANG Zhi-min¹, WANG Hong-yan¹

(1. College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Research Academy of Environmental Sciences of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China)

Abstract: Spatial variability of soil organic matter and its distribution pattern are the hot issues of soil scientific research. Selecting Haigouhe watershed as the study area, this paper mainly focused on the spatial variability, distribution pattern and its impact factors of SOM in the surface soil by classical statistics, Geo-statistics and “3S” technology. The results showed that: compared with the other black soil areas, the SOM content in Haigouhe watershed was a little lower, there was a spatial autocorrelation, and a moderate variability. Random factors, such as human activities, cultivation measures and so on, had little impact on the spatial variation, while the structural factors had a dominant function, and there was a remarkable spatial anisotropy of SOM. The SOM content reduced gradually from east to west with the familiar changes of height, so the co-kriging interpolation, selecting elevation as the co-variate, was employed to improve the accuracy. The spatial variability of SOM and its distribution pattern in Haigouhe watershed were greatly affected by topography and land use but weakly influenced by traffic, villages and other social factors. The surrounding environment of the samples would increase the uncertainty of spatial variability and interpolation of SOM and it cannot be ignored in future studies. In summary, it was a significant scientific research to analyze the spatial variability, distribution pattern of SOM and its main impact factors in a mollisol hilly watershed of China.

Key words: mollisol hilly area; soil organic matter; spatial variability; distribution pattern; impact factors

土壤有机质(SOM)是泛指以多种形式和状态存在于土壤中的各种含碳有机化合物,是土壤的重要组成部分,与土壤养分、土壤理化性质及土壤侵蚀有着重要关系,对保持土壤肥力具有积极作用,是反映土壤质量的一项重要指标^[1~4]。进行 SOM 空间变异及分布格局研究,并对其影响因素做进一步地探讨,对掌握区域 SOM 空间分布现状,进行 SOM 精准培育及土壤肥力的有效调控与提升意义重大。地统计学被证明是土壤属性空间分布特征及其变异规律研究中最有效的方法之一,利用地统计学的方法,结合现代“3S”技术强大的空间信息获取与分析功能,对 SOM 的空间变异和分布格局及其影响因

素展开研究已成为当今土壤学领域研究的热点问题^[3~7]。当前研究多见于南方紫土丘陵、西北黄土区等区域^[8~10],且多停留在以行政区划或单一地块为单元的层面^[11~13],容易忽略区域 SOM 形成和演变过程中自然要素的影响,一定程度上也制约了 SOM 研究的客观真实性。流域作为一种集社会

收稿日期: 2015-11-11; 修订日期: 2015-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471228); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07201007-004); 东北农业大学学术骨干项目(1254G012); 东北农业大学青年才俊项目(14QC30)

作者简介: 高凤杰(1981~),女,博士,副教授,主要研究方向为资源环境遥感, E-mail: gaojiecumt@126.com

* 通讯联系人, E-mail: shaoliang.zhang@neau.edu.cn

经济和自然过程于一体的复合型系统,是基于自然因素形成的典型区域,以流域为单元进行 SOM 空间特征研究可以很好地揭示流域内社会经济及自然因素与 SOM 形成及其空间特征的内在关系,具有一定的科学研究价值,而目前基于小流域尺度进行黑土区 SOM 空间异质性和分布格局及其影响因素分析的相关研究还较为少见^[5,14~19]。

我国东北黑土区以土壤肥沃、作物产量高著称,是我国重要的商品粮、畜牧基地。大量研究表明,近几十年来东北黑土区在大量产出的同时,黑土区 SOM 正以不同的速度不断流失,土壤肥力逐年下降,黑土质量状况不容乐观,保护与拯救黑土资源的形势十分紧迫^[6,7,20]。如何科学准确地掌握黑土区 SOM 的空间变异和现状格局及其影响因素是进行黑土区 SOM 保护的基础工作。本研究综合地统计学和“3S”技术方法,对东北黑土丘陵区海沟河小流域土壤表层(0~20 cm)中有机质的空间变异和分布格局进行研究,并对流域内影响 SOM 空间分布的主控因素进行探讨,进一步把握黑土区 SOM 空间分布特征及主控因子的识别,以期为区域内 SOM 的精准修复与培育、农业生产增产等提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海沟河是阿什河的支流,经阿什河在哈尔滨东郊汇入松花江。海沟河小流域属于松花江流域的一部分,地理位置为 $126^{\circ}55'45'' \sim 127^{\circ}10'05''$ E, 北纬 $45^{\circ}34'18'' \sim 45^{\circ}40'50''$ N, 面积为 119.76 km^2 , 行政区划以阿城区的料甸满族乡为主(图1)。流域海拔高度为 $54 \sim 366 \text{ m}$, 东高西低呈阶梯状分布, 东部地势起伏较大。土壤类型主要是黑土, 属于典型的黑土丘陵区。气候类型属于中温带大陆性季风气候, 冬季干旱漫长, 夏季温热湿润, 多年平均气温 3.9°C , 年降水量 $600 \sim 800 \text{ mm}$, 多集中在每年的 4~10 月, 占全年降雨量的 90%。流域内土地资源开发历史较早, 农业生产活动频繁, 西部以农业生产为主, 耕地面积占总面积的 70.97%, 东部低山丘陵区多林业分布, 森林覆盖面积占总面积的 24%。交通便利, 受周边城市发展的辐射影响, 流域内社会经济状况发展迅速, 但城市发展的同时也给流域内生态环境带来一定的负面影响, 土壤退化、水源污染、生态恶化等环境问题凸显。

1.2 样点布设与采集

本研究采用 Google Earth 高分辨率遥感影像,



图1 研究区地理位置及样点分布示意

Fig. 1 Sketch map of geography location for the study area and distribution of the sampling sites

通过选取地面控制点进行几何校正、配准, 在 ArcGIS 10.0 平台中采取人工目视判读法进行室内解译, 获取海沟河流域 2014 年土地利用数据, 通过野外定点采样调研进行验证, 室内解译准确率达 90% 以上, 满足研究需要。然后以研究区 2014 年土地利用数据为基础, 采用美国陆地资源卫星 Landsat5 影像数据, 结合研究区国土资源资料, 进一步提取研究区 1992 年土地利用数据。

以研究区数字高程模型 ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$)、土地利用数据为辅助信息, 根据地形、土地利用方式及距居民点、交通主干道、河流水系的距离等要素, 在室内进行网格布点。为避免作物生长、耕作施肥等对 SOM 含量的影响, 于 2014 年 10 月农作物收获后, 通过手持 GPS 进行空间定位, 与室内预布点位尽可能一致, 进行野外采样, 样点主要集中于流域西部耕地区(图1)。采样过程中, 每个样点按照不同方位等距离采样 5 次, 采集土壤表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 耕层土壤, 用“四分法”取混合均匀的样品约 1 kg , 留足实验用量, 并分别记录采样点坡位及周边环境等相关信息, 共采集 120 个土壤样品。采样完成后将土壤样品带回实验室, 经自然风干, 用木棒压碎挑出砾石草根等杂物, 研磨过筛, 采用重铬酸钾容量法测定每个土壤的有机质含量。

1.3 数据处理

本研究在考虑采样及指标测试误差的基础上,采用格拉布斯(Grubbs)法对所得数据进行最严格的异常值识别和处理,剔除异常数值,后续相关计算分析均采用异常值处理后的数据进行^[21]. 检验数据是否呈正态分布是进行克里格空间分析的基础^[22],本研究数据正态分布性检验在 SPSS 19.0 中完成,用 K-S 检验法进行非参数检验($\alpha=0.05$);空间自相关分析、半方差函数的计算及理论模型的拟合等相关参数的计算均采用地统计学软件 GS + 9.0 进行. 其中,半方差函数是 SOM 空间异质性研究的最有效方法,是 SOM 进行克里格空间插值的基础,其表达式如下^[21]:

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

式中, $\gamma(h)$ 为变异函数; $N(h)$ 是分割距离为 h 时的样本点对总数; $Z(x_i)$ 为 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 处的实测值; $Z(x_i + h)$ 是 $Z(x)$ 在 x_i 处距离偏离 h 的实测值.

克里格(Kriging)插值法在土壤属性的空间分布中得到广泛应用,并取得了很好的效果. 本研究根据半方差函数的拟合模型,在 ArcGIS 10.0 平台中进行研究区 SOM 的普通克里格(Ordinary Kriging)空间插值,然后在普通克里格插值的基础上,选取与土壤属性空间分布显著相关的地形因子

作为协变量,对海沟河小流域 SOM 进行协同克里格(Co-Kriging)插值,并与普通克里格插值进行精度比较. 在精度验证方面,本研究综合克里格模型及其参数的适宜程度,以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 为最优插值标准^[21,23],进行插值结果精度的验证.

2 结果与分析

2.1 SOM 的统计特征分析

通过对研究区 SOM 测试数据进行经典统计分析,得到海沟河流域 SOM 描述性统计特征(表 1). 由表 1 可以看出:流域内 SOM 含量平均水平为 $19.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与黑土区相关研究比较处于较低水平,且有机质含量的极大值、极小值也均处于较低水平^[23,24]. 研究区 SOM 变异系数为 51.11%,结合一般的 CV 评估标准(当 $CV < 0.1$ 时,为弱变异程度,当 $0.1 < CV < 1$ 时,为中等变异程度, $CV > 1$ 时为强变异程度)^[18,21],研究区 SOM 空间变异程度为中等变异程度,说明在海沟河小流域 SOM 的空间变异受人类活动、耕作措施、土地利用等随机因素的影响较为明显. 同时通过 K-S 验证法进行非参数检验($\alpha=0.05$),表明 SOM 不符合正态分布,故对其进行对数转化后以符合正态分布.

表 1 SOM 描述性统计特征值
Table 1 Descriptive statistical characteristic values of SOM

项目	均值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	极小值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	极大值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	偏度	峰度	变异系数/%	K-S 检验
转换前	19.35	6.29	39.94	9.89	0.92	-0.31	51.11	0.011
转换后	1.23	0.80	1.60	0.21	0.07	-0.51	17.07	0.357

2.2 SOM 的空间自相关分析

空间自相关性是检验某一类要素是否显著地与其相邻要素相关联的指标,是进行地统计插值的基础. 大量研究也已表明地理现象具有普遍的空间自相关特性,一般通过 Moran's I 指数的大小表示^[21,25].

本研究中通过 GS + 9.0 对海沟河小流域 SOM 整体及其在各方向上的空间相关性进行分析,结果见图 2. 从中可以看出:海沟河小流域 SOM 空间自相关性整体上随着间隔距离的增加先呈正相关性,后转变为负相关性(间隔距离为 3 200 m 处),在约 7 000 m 处又变化为正相关,变化比较复杂[图 2(a)],Moran's I 主要分布在 $-0.167 \sim 0.126$ 之间,其变化随间隔距离的变化而出现较大变化,整体自

相关性较弱. 通过各向自相关性分析[图 2(b)]发现,在 0° (南-北)方向上,Moran's I 值随间隔距离的变化在 1 000 m 处大于 0,在横坐标轴上方呈现出一系列的波动,在间隔距离为 6 400 m 处有最大值出现,表现出较强的空间正自相关性;在 45° (东北-西南)方向则以负相关为主,在小范围内出现正相关性(间隔距离为 1 200 m 处),整体规律性较差;在 90° (东-西)方向,Moran's I 值的变化趋势与图 2(a)类似,呈现先正相关后负相关之势,可以反映整体自相关性特征;在 135° (东南-西北)方向上,当间隔距离小于 3 000 m 时,表现较强的正相关性,随着距离的增加 Moran's I 值以负数为主,表现出较强的空间负自相关性. 综观以上分析,海沟河小流域 SOM 含量存在空间自相关性,且在不同方向上具有差异性,

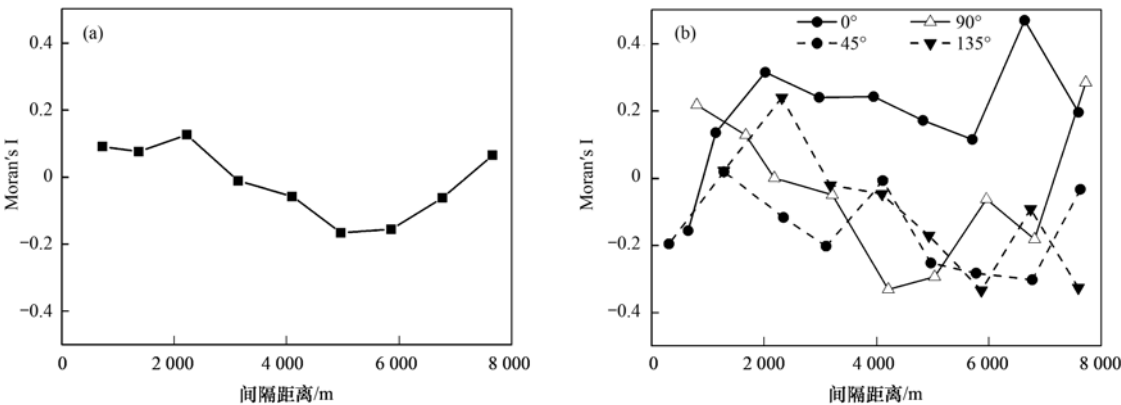


图2 SOM 空间自相关性
Fig. 2 Spatial autocorrelation charts of SOM

可以进行地统计插值.

2.3 SOM 的空间变异特征分析

对海沟河小流域 SOM 进行半方差函数计算与模型拟合,得到研究区 SOM 半方差函数模型[图 3 (a)]及相关拟合参数(表 2).从表 2、图 3 可以看出海沟河小流域 SOM 半方差函数拟合模型符合高斯(Gaussian)模型,决定系数 R^2 为 0.751,能够有效反映研究区 SOM 的空间结构特征^[25,26].

一般认为块金值(C_0)能够揭示区域变量在小于抽样尺度上发生突然变异的程度.研究区 SOM 的块金值较小,为 0.036,表明在小于抽样尺度上几乎不存在某种不可忽略的生态过程对有机质的空间分布产生影响.基台值($C_0 + C$)通常用来表征系统

内总的变异程度,块金效应($C/C_0 + C$)表征系统内非随机部分引起的变异占系统总变异的比例.研究区块金效应值为 0.875,该值明显高于黄土高原等区域的相关研究值^[8,12],表明由于受人类开发利用时间较短,海沟河小流域 SOM 空间变异受人类活动主要是对资源的开发利用、耕作措施(施肥、秸秆处理等)等随机因素影响很小,受地形、成土母质等结构性要素影响较大,与黄土区相关研究有较大的差异性.变程是衡量土壤属性特征空间自相关性范围的定量指标,海沟河小流域 SOM 的变程为 1 800 m,说明半方差函数在间隔距离为 1 800 m 时达到平稳阶段, SOM 在该尺度内存在较强的连续性.

表 2 SOM 半方差函数模型及参数

Table 2 Parameters of the semi-variogram models for SOM						
理论模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金效应 ($C/C_0 + C$)	变程/m	决定系数 (R^2)	残差 (RSS)
Gaussian	0.036	0.253	0.875	1 800	0.751	5.723E-03

对研究区 SOM 进行更加深入的各向异性分析,绘制在 0°(北-南)、45°(东北-西南)、90°(东-西)和 135°(东南-西北)方向上的半方差函数图[图 3 (b)],结果表明:研究区 SOM 在不同方向上的变异程度呈现较大差异性,其中,0°方向变异值以 0.2 为中心做上下变化,变异程度小,当间隔距离持续增加时,变化幅度较大,这与研究区中西部以平原为主,东部小范围内为山地为主有关,南北方向则呈同一梯度趋势;在东西 45°方向上的变异程度随着间隔距离的增加变化幅度较为平缓,变异值在 0.3 左右变动,这主要是因为研究区东北-西南方向以平原耕作为主,地势及地表景观变化小;在 90°方向上半方差函数变化最为剧烈,随着间隔距离的增加而变大,

在约 4 000 m 处有机质变异程度达到最大值,之后出现交替减小趋势,与研究区东西方向地形的剧烈变化相关;在 135°方向上有机质的半方差函数变化较大,且分别在约 2 200 m 和 6 400 m 处出现不同拐点,整体上随间隔距离的增加而变大,在间隔距离接近 8 000 m 处达到最大值.总言之,研究区各向半方差函数模型表现出不同的特征,各向异性显著.这对指导该区域采样具有十分重要的意义,在后续研究布设采样点时,在 0°(南-北)方向上,特别是同一海拔梯度和土地利用方式下,采样点可以稀疏些,其他方向要适当地密集布设采样点.

2.4 SOM 的空间分布特征分析

在对研究区 SOM 进行半方差函数分析的基础

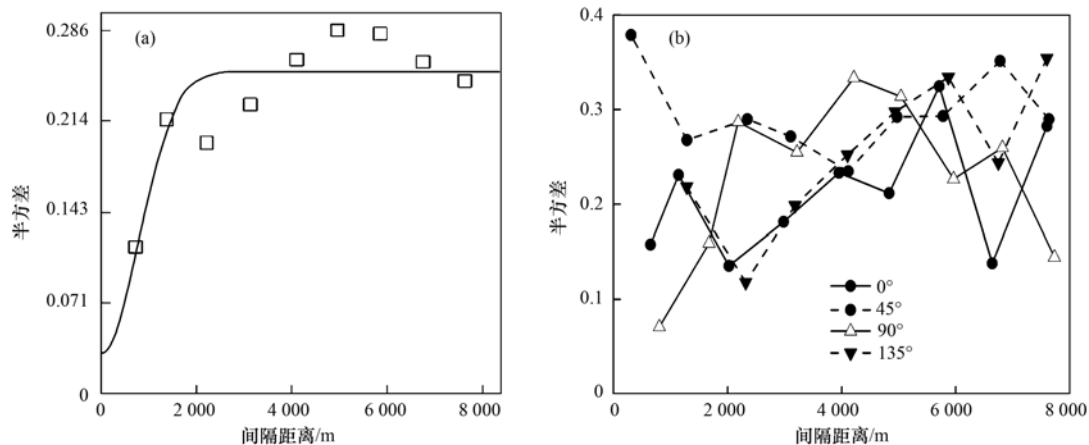


图3 SOM 各向半方差函数

Fig. 3 Sei-variogram charts for SOM

上,选择高斯(Gaussian)模型,对海沟河小流域 SOM 进行普通克里格(Ordinary Kriging)插值,根据高程与 SOM 相关性分析结果(表4),SOM 分布与高程相关系数为0.427,为显著水平,因此选取高程作为协变量进行协同克里格(Co-Kriging)插值(图4),两种插值均通过 ArcGIS 10.0 自身的交叉验证进行插值效果的检验.如表3所示,综合各项验证指标参数及参考文献[25],两种插值结果的均方根预测误差

均比较小,且均方根预测误差值与平均标准误差接近,插值效果良好.普通克里格和协同克里格插值结果的标准平均值误差分别为0.021 3和0.009 8,均接近于0,效果很好,标准均方根误差分别为1.055 7和1.034 9,均较接近于1,表明对海沟河小流域 SOM 进行普通克里格和以高程为协变量的协同克里格插值效果均较好,选择显著相关的高程作为协变量进行协同克里格插值能够提高插值精度.

表3 克里格空间插值交叉验证结果

Table 3 Cross validation results of Kriging spatial interpolation				
插值类型	均方根误差	平均标准误差	标准平均值误差	标准均方根误差
普通克里格	11.16	10.55	0.021 3	1.055 7
协同克里格	10.74	10.36	0.009 8	1.034 9

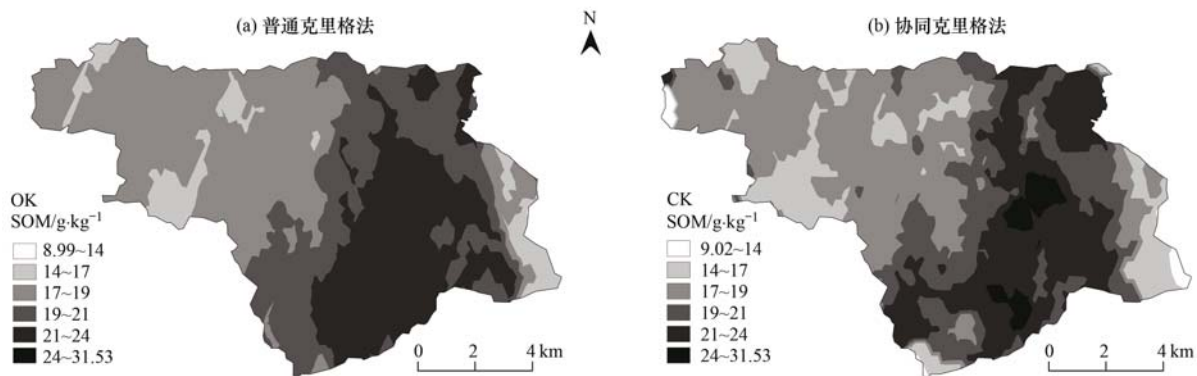


图4 研究区 SOM 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of SOM in the study area

由图4可以看出:两种插值结果在8.99~31.53 g·kg⁻¹之间,且均呈现出东高西低呈阶梯状分布趋势,空间特征明显,与研究区地形变化具有较强的一致性.南北方向 SOM 含量变化微弱,与该流域南北方向地形变化平缓关系密切. SOM 的高值区均出现在东部海拔较高的山地林区,随海拔降低而逐渐减少,同时,可以看到 SOM 在研究区中西部地区含量变化小,空间分布较均一,这可能与研究区中西部多平原耕作区、土地利用方式相对简单有很大的关系,说明海沟河小流域 SOM 受流域内地形因素

以及由其产生的地表环境差异的影响较大. 综合比较普通克里格和以高程为协变量的协同克里格插值效果发现,两种插值效果整体趋势相对一致,在东部海拔较高的山区差异较为显著,且协同克里格插值结果较普通克里格法在局部区域表现更加精细,有机质含量范围变大,能够准确反映有机质空间分布的局部特征.

2.5 SOM 空间变异及分布的主控因子分析

一般认为,SOM 受区域成土母质、地形、气候等自然要素的主导作用较大^[1,2,8~10],而区域环境因素及其变化被认为在短期内对 SOM 的空间分布也产生着强烈的影响. 考虑到小流域内土壤成土母质及气候要素的相对一致性,本研究在对海沟河小流域 SOM 进行空间异质性分析的基础上,结合研究区土地利用现状、人类活动、交通干扰、地貌形态及外部环境等因素对海沟河小流域 SOM 的空间变异和分布格局进行主控因子分析.

根据 SOM 的形成机制过程,地球表面植被分布对其形成与累积有着强烈的影响,以海沟河流域 1992~2014 年间土地利用变化情况(图 5)为基础可以看出,研究区主要地类未发生大的变化,东部山区长期以来分布着大面积的森林植被,在较长的时间里该区域的人类活动较少,各类植被的凋零物、死亡植物残体及根系经过长期稳定的演变过程,最终促进了该区域 SOM 的大量累积过程,这也是东部

山地林区有机质富集的主要原因. 而在西部平原耕作区,自 1992 年以来水田与旱地之间发生了明显变化,旱改水现象较多,这种耕作方式的变化以及由此产生的育苗、施肥、秸秆处理等频繁的人类活动,一定程度上减缓甚至阻止了有机质的形成过程,加速了其分解及释放过程,导致了 SOM 含量下降,可见长久稳定的土地利用方式也有助于 SOM 及相关养分的累积^[27,28]. 从 1992~2014 年土地利用变化中可以看出在东西方向上土地利用方式存在长期的复杂交替现象(图 5). 促进形成了原始的东西方向强的变异性,近些年来,虽然土地利用向着规模化方向发展,土地利用呈现集中连片现象,但东部林地、中部旱地、西部水田的格局未发生变化,SOM 在东西方向的强变异性也未发生变化. 综合以上分析,除受研究区地形等结构性要素影响外,从土地资源的开发伊始,土地利用的方式及强度也在很大程度上影响了研究区 SOM 的空间变异及其分布.

其次,对 SOM 空间分布(图 4)与研究区地形(图 5)进行对比,可以发现研究区东高西低的地形分布与 SOM 的分布呈现强烈的相关性,随着海拔高度的增加土壤中有机质含量也逐步增加. 本研究参考已有的土壤养分分布及影响因素的相关分析^[8,22,29,30],结合研究区地形地貌、城镇居民点、交通及水系分布现状,对 SOM 含量及对数转换后的值与相关地形环境因素进行相关性分析(表 4),并进

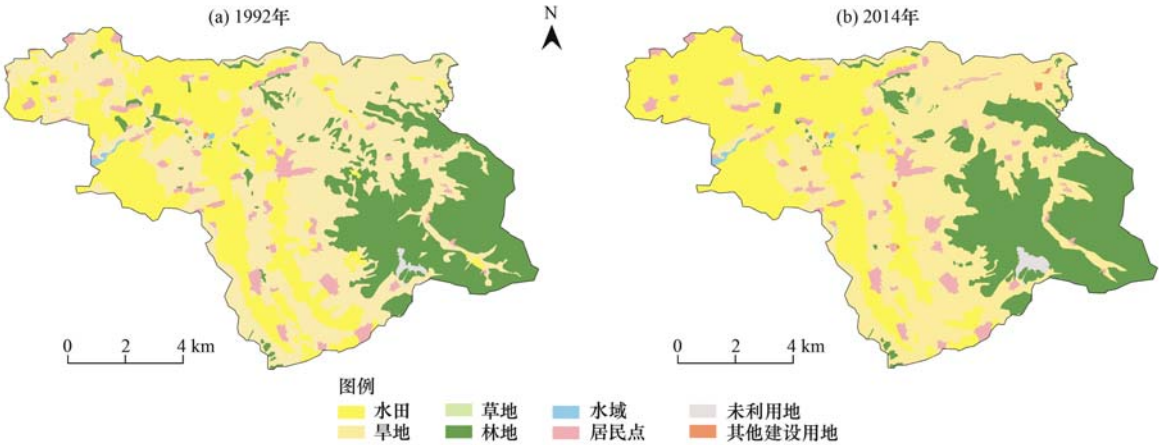


图 5 研究区 1992~2014 年土地利用变化

Fig. 5 Land use change from 1992 to 2014 in the study area

表 4 研究区 SOM 含量与外部因子相关性分析结果¹⁾

Table 4 Results of correlation analysis between SOM and external indicators in the study area

项目	高程	坡度	平面曲率	剖面曲率	距主干道距离	距居民点距离	距水系距离
转换前	0.427 **	-0.091	0.128	0.158	-0.087	-0.113	-0.346 **
转换后	0.303 **	-0.130	0.028	0.111	-0.107	0.028	-0.220 *

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

一步对影响区域内 SOM 空间变异及分布的主要因素进行分析。

从表 4 可以看出,SOM 含量与高程呈显著性正相关水平($r=0.427$),与水系距离呈显著性负相关水平($r=-0.346$),是影响研究区 SOM 含量空间分布的主要因子。这一方面是因为受地形等结构性要素的长期影响形成了地表较稳定或较易形成地带性森林土壤的气候条件,有利于 SOM 的积累;另一方面在海拔较高的山地人类活动干扰小,对土壤中自然状态下有机质的破坏十分有限,因此保留了较高的有机质含量。总之,地形要素通过直接地或者间接地形式在很大程度上主导了海沟河小流域 SOM 的空间分布,高程是其显著相关的外部因素,但不能直接决定其形成过程。水系的分布在土壤养分的长久运移过程中影响了土壤养分的运移方向及累积过程,距离水系近的地方地势一般较低,一定范围内是土壤水分及养分的“汇”区域,极大地促进相关累积过程,同时,河流水系附近土壤厌氧呼吸也是 SOM 含量较高的一个原因,水系分布是大时间尺度研究土壤养分运移规律不可忽视的指标因素。

最后,通过实地采样并记录采样点周围环境状况,最终与样点 SOM 含量进行比较分析,发现采样点周边环境如垃圾、动物粪便堆积、畜牧养殖等情形会造成采样点附近 SOM 含量明显变大等异常现象,增加了 SOM 的空间变异特征,同时也增加了 SOM 空间插值的不确定性,在未来土壤采样中要做适当的规避。

3 讨论

科学准确地掌握黑土区 SOM 的空间变异和现状格局及其影响因素是进行黑土区 SOM 保护的基础工作。海沟河小流域 SOM 含量平均水平为 $19.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与黑土区其他区域相比,处于较低水平^[23,24],土壤肥力保护和 SOM 培育有待进一步加强;海沟河小流域 SOM 含量存在空间自相关性,并且不同方向的自相关性表现出显著性差异,其中, 90° (东-西)方向上 SOM 空间自相关性能够反映整个研究区 SOM 的自相关性特征,这与研究区东西方向上地形地势的高低变化具有密切关系^[21,30]。在空间异质性方面,SOM 空间变异为中等变异程度,且不同方向上的变异程度呈现较大差异性,这一点与黄土高原等区域空间变异性研究相比,其空间变异受人类活动(对资源的开发与利用)、耕作措施(施肥、秸秆处理等)等随机因素影响更小,受地形、成

土母质等结构性要素的主导作用更加明显^[5,8,10]。

以半方差函数分析为基础,可以指导海沟河小流域 SOM 普通克里格和协同克里格插值及交叉验证,以高程为协变量的协同克里格插值较普通克里格插值能够提高插值的精度,且达到很好的效果,与其他研究结果相近^[17,20]。在考虑小流域内土壤成土母质及气候要素相对一致的前提下,SOM 的空间分布与区域地形以及受地形要素影响较大的水系分布呈极显著的相关性,与交通、居民点分布等相关性微弱,其原因可能是地形要素通过改变地表植被、土地利用以及小区域内的湿度温度等环境要素而直接地或者间接地影响了研究区 SOM 的形成和累积过程。通过实地采样记录及对应样点 SOM 含量的比较分析,发现采样点周边环境如垃圾、动物粪便堆积、畜牧养殖等情形增加了 SOM 的空间变异的特征,同时也增加了 SOM 空间插值的不确定性,是相关研究中的重点,在未来的精细研究中要做适当的规避。

以小流域为研究单元,综合考虑影响 SOM 空间分布的自然、社会要素对流域内 SOM 空间变异、分布格局及影响因子进行研究具有重要意义。未来在土壤养分空间相关性及变异特征分析的基础上,如何实现主控因子的进一步量化,确定其与土壤属性间的定量关系,来提高 SOM 数字制图的精度,还需要进一步研究探讨。

4 结论

(1)海沟河小流域 SOM 含量在 $6.29 \sim 39.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $19.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于较低水平,空间变异程度为中等变异,存在空间自相关性,且在不同方向表现出显著性差异。半方差函数分析显示 SOM 的变程为 1800 m ,空间变异整体上受人类活动(耕作制度、施肥措施、秸秆处理)等随机因素影响小,受地形、成土母质等结构性要素的影响大, 90° (东-西)方向变异程度在空间变异中均占主导作用。

(2)协同克里格插值法可以提高 SOM 的空间插值精度,插值结果表明,海沟河小流域 SOM 的空间分布整体上呈现东高西低、逐步减小的特征,SOM 空间分布受地形海拔等自然因素以及受其制约的土地利用的影响较大,受交通道路、居民点等要素的影响较小,采样点周边环境增加了 SOM 空间分布的不确定性。

(3)以流域为单元,综合考虑影响 SOM 空间分布的自然、社会要素对我国黑土区海沟河小流域

SOM 的空间变异、分布格局及影响因子进行研究具有重要意义和科学价值。

参考文献:

- [1] 耿增超, 戴伟. 土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [3] 窦森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 武天云, Schoenau J J, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 717-722.
- [5] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 1-11.
- [6] 刘文杰, 苏永中, 杨荣, 等. 黑河中游临泽绿洲农田土壤有机质时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 170-176.
- [7] 白军红, 邓伟, 张玉霞, 等. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 77-81.
- [8] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 基于环境相关法的土壤属性空间分布特征研究——以黄土丘陵沟壑区小流域为例[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 554-558.
- [9] 张国平, 郭澎涛, 王正银, 等. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 113-120.
- [10] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 946-954.
- [11] 赵倩倩, 赵庚星, 董超, 等. 高密市农田土壤养分空间变异特征研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 643-650.
- [12] 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 1983-2009 年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 132-140.
- [13] 刘欣, 王红梅, 廖丽君. 黑龙江省巴彦县土壤养分空间变异规律与格局分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 86-90.
- [14] 丁雪丽, 张旭东, 杨学明, 等. 免耕秸秆还田和传统耕作方式下东北黑土氨基糖态碳的积累特征[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 535-543.
- [15] 王充, 于东升, 张海东, 等. 典型黑土区农田土壤碳库及其影响因子显著性变化特征研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 845-852.
- [16] 郑庆福, 赵兰坡. 东北黑土有机无机复合体组成及有机碳空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 243-248.
- [17] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 河套平原表层土壤元素含量与空间分布特征[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 677-683.
- [18] Weindorf D C, Zhu Y. Spatial variability of soil properties at Capulin Volcano, New Mexico, USA: implications for sampling strategy[J]. Pedosphere, 2010, 20(2): 185-197.
- [19] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 等. 20 年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 19-24.
- [20] 史舟, 李艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [21] 柴旭荣, 黄元仿, 苑小勇. 用高程辅助提高土壤属性的空间预测精度[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2766-2773.
- [22] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2012.
- [23] 韩秉进, 张旭东, 隋跃宇, 等. 东北黑土农田养分时空演变分析[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 238-241.
- [24] 梁尧, 韩晓增, 丁雪丽. 东北黑土有机质组分与结构的研究进展[J]. 土壤, 2014, 44(6): 888-897.
- [25] 苏松锦, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [26] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [27] 章明奎, 常跃畅. 近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4399-4404.
- [28] 罗璐, 周萍, 童成立, 等. 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 692-697.
- [29] 刘二永, 刘健, 余坤勇, 等. 基于环境因子和 R-STPS 的林地土壤有机质预测模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 133-137.
- [30] 柴旭荣, 黄元仿, 苑小勇, 等. 利用高程辅助进行土壤有机质的随机模拟[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 210-214.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行