

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰	(3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民	(3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐	(3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东	(3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里	(3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟	(3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军	(3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红	(3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明	(3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰	(3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉	(3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿	(3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗	(3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君	(3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明	(3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫	(3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦	(3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志	(3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟	(3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华	(3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛	(3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑	(3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊	(3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明	(3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼	(3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲	(3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲	(3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生	(3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔	(3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰	(3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良	(3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海	(3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵	(3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江	(3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强	(3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空	(3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍	(3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮	(3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬	(3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省	(3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰	(3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川	(3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强	(3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁	(3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新	(3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力	(3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳	(3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦	(3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎	(3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清	(3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇	(3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩	(3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富	(3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡	(3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳	(3460)
《环境科学》征订启事(3141)	《环境科学》征稿简则(3202)	信息(3229, 3433, 3451)

成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素

李珊¹, 李启权^{1*}, 王昌全¹, 张浩¹, 肖怡¹, 唐嘉玲¹, 代天飞², 李一丁¹

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 成都土壤肥料测试中心, 成都 610041)

摘要: 了解环境因素对土壤有机碳剖面分布的影响, 是准确拟合土壤有机碳在垂直方向上的连续变化、开展其三维空间分布模拟和估算区域土壤有机碳储量的基础。基于 171 个土壤剖面采样数据, 利用指数递减函数拟合土壤有机碳剖面分布, 分析成都平原区水稻土有机碳剖面分布的空间变异特征, 并探讨成土母质、土壤类型(亚类和土属)、海拔、与河流距离和土地利用方式对其空间变异的影响作用, 进而揭示环境因素对土壤有机碳剖面分布的影响。结果表明, 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 土壤有机碳均值分别为 19.42、9.59、5.99 和 5.20 g·kg⁻¹, 表现出显著的剖面递减趋势。土壤有机碳含量主要集中在 40 cm 以上, 占整个土壤剖面的质量分数为 72.17%, 是研究成都平原区水稻土碳源/汇的关键部分。拟合土壤有机碳剖面分布的指数递减函数的 2 类参数呈现出一致的空间分布格局, 具有空间相关性; 参数 *C* 和 *k* 的块金系数分别为 55.400% 和 47.671%, 表明成都平原区水稻土有机碳剖面分布受结构性因素和随机性因素共同影响。回归分析揭示, 成土母质和土属是影响研究区土壤有机碳剖面分布的主控因素, 但海拔、与河流距离和土地利用的作用不容忽视。在拟合成都平原区水稻土有机碳剖面分布、构建其三维空间预测模型和估算土壤有机碳储量时, 应重点考虑成土母质和土属的作用。

关键词: 土壤有机碳; 剖面; 影响因素; 指数递减函数; 成都平原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3365-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201711140

Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain

LI Shan¹, LI Qi-quan^{1*}, WANG Chang-quan¹, ZHANG Hao¹, XIAO Yi¹, TANG Jia-ling¹, DAI Tian-fei², LI Yi-ding¹

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Chengdu Soil Fertilizer Test Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: Understanding the effects of environmental factors on the profile distribution of soil organic carbon (SOC) is a base to accurately modeling the continuous change of SOC in vertical and three-dimensional spatial distributions, as well as precisely estimating SOC storage. Based on 171 soil profiles collected from Chengdu Plain, the effects of environmental factors (including the parent material, soil type, elevation, distance from river, and land use) on the profile distribution of paddy SOC to a depth of 1 m were evaluated through the exponential decay function. The results indicated that SOC was estimated at 19.42, 9.59, 5.99, and 5.20 g·kg⁻¹ at depths of 0-20, 20-40, 40-60, and 60-100cm, respectively, showing a significant decrease with increased depth. Soil organic carbon was mainly concentrated above a 40 cm soil depth, accounting for 72.17% of the total profile, which could be crucial to studying the carbon source/sink of paddy soils in Chengdu Plain. The parameters of the exponential decay function had a similar spatial pattern, indicating their spatial dependence. The nugget coefficients for *C* and *k* were 55.400% and 47.671%, respectively, indicating that paddy SOC in the study area was affected by both structural and random factors. Regression analysis implied that the parent material and soil genus were the dominant factors influencing the profile distribution of SOC. Nevertheless, elevation, distance from river, and land use should also be taken into consideration. It has been concluded that the parent material and soil genus should be premeditated when fitting the vertical distribution of SOC, modeling the three-dimensional prediction of soil organic carbon, and estimating soil carbon storage in the paddy soils of Chengdu Plain.

Key words: soil organic carbon; profile; influencing factors; exponential decay function; Chengdu Plain

水稻土占全国耕地总面积的 25%, 是我国重要的耕地土壤资源^[1]。由于水稻土具有较高的碳密度和较大的固碳潜力, 水稻土壤有机碳的剖面分布和储量估算受到广泛关注^[2,3]。受成土过程和生态条件等因素综合影响, 土壤有机碳的剖面分布具有较高的空间异质性^[4~6]。这种空间异质性既是区域土壤资源优化利用的限制因子, 也是导致土壤有机碳三维空间模拟和储量估算存在不确定性的主要原

因^[7,8]。探究环境因素对水稻土壤有机碳剖面分布的影响, 对优化区域土壤资源利用、提高土壤有机碳三维空间分布模拟精度和有机碳储量估算均具有重要意义。

收稿日期: 2017-11-15; 修订日期: 2018-01-18

基金项目: 四川省教育厅科研项目(16ZB0048); 国家自然科学基金项目(4120124)

作者简介: 李珊(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤有机碳三维空间分布模拟, E-mail: wgylishan@163.com

* 通信作者, E-mail: liqq@reis.ac.cn

当前已有许多学者在县域、省域和国家尺度上对我国不同区域水稻土有机碳剖面分布及影响因素进行了大量研究^[2,9,10]。成土母质、土壤类型、地形和土地利用方式等自然和人为因素被认为是影响水稻土壤有机碳剖面分布的重要因素^[11,12]。但是,这些研究多是按照固定深度分层后利用相关性分析、方差分析或线性模型探究这些影响因素对不同土层土壤有机碳的影响作用^[13~15]。由于土壤有机碳在土壤剖面中是一个连续变化的三维时空变异体,分层探究影响因素对土壤有机碳剖面分布的影响作用,忽视了土壤有机碳在垂直方向上的空间变异性,并不能充分揭示土壤有机碳的垂直变化与环境因素间的整体性与系统性。近年来,许多学者利用土壤深度函数(如指数、对数、幂函数和样条函数等)拟合土壤有机碳剖面分布,为分析土壤有机碳剖面整体变化与环境因子间关系提供了新的解决途径^[8,16~20]。由于土壤有机碳总体上具有随土层深度增加而减少的特征,指数递减函数能较好地描述土壤有机碳的剖面分布,是常用的土壤有机碳剖面拟合函数^[8,19,20]。如 Yang 等^[8]利用指数递减函数拟合了青藏高原东北部土壤有机碳剖面分布,分析了环境因素与指数递减函数参数间的关系,并在此基础上构建了土壤有机碳三维空间预测模型,对这一区域 1 m 深土壤有机碳储量进行了估算。Kempen 等^[20]利用指数递减函数对荷兰东北部土壤有机质剖面分布进行了拟合,分析了环境因素与指数递减函数参数间的关系,并完成了这一区域土壤有机质的三维数字制图。

成都平原位于四川盆地西部,是我国重要的农业经济区。人口密度大、土地利用程度高,具有悠久的水稻种植历史,是研究土壤有机碳剖面分布的典型区域。之前的学者已对这一区域土壤有机碳进行了许多研究,但这些研究主要集中在耕层土壤、城乡交错带和室内模拟实验上^[1,21,22],而关于较大尺度上田间自然状态下土壤有机碳的剖面分布及影响因素的研究鲜见报道。本文以成都平原区的水稻土为研究对象,结合指数递减函数在较大尺度上探究高强度土地利用背景下水稻土壤有机碳的剖面分布及影响因素,以期优化区域土壤资源利用提供依据,并为更精确的土壤有机碳三维空间分布模拟和有机碳储量估算提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于成都平原的核心区域,地理坐标介

于北纬 30°22′~31°50′、东经 103°27′~104°14′之间[图 1(a)]。全区面积约为 3 173 km²,主要包括成都市 10 个区县的平原区[图 1(c)]。区内地势总体平缓,海拔在 447~732 m 之间,由西北向东南降低[图 1(b)]。河网密布,主要有金马河、西河和斜江河三条岷江水系和沱江水系青白江流经境内[图 1(b)]。该区属亚热带湿润季风气候区,年平均气温在 16℃左右,年平均降水量为 900~1 300 mm,全年无霜期为 278 d。成土母质以岷江冲积物为主,包括灰色冲积物、灰棕冲积物和紫色冲积物,西南部还分布着部分上更新统黄色黏土和中下更新统老冲积物[图 1(d)]。由于长期的水耕熟化过程,区内主要土壤类型为水稻土,一共包含 4 个亚类[图 1(e)]和 9 个土属[图 1(f)]。土地利用以耕地为主,包括水稻-小麦和水稻-油菜轮作两种典型种植制度。随着该区域经济发展,农业种植结构调整,形成了以耕地为主、以园地(园林和果园)和农林混合用地为辅的多种农业用地方式。

1.2 样品采集与分析

综合考虑研究区成土母质、土壤类型及土地利用方式等基础信息,兼顾采样密度,在室内进行采样点布设。在兼顾空间分布均匀性和样点代表性的基础上,分别于 2016 年 4 月和 2017 年 4 月开展野外采样工作,一共采集 171 个水稻土壤剖面[图 1(c)]。参照成都市第二次土壤普查资料中的土壤发生层分类,将采样点剖面划分 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 共 4 个采样层次。其中,0~20、20~40 和 40~60 cm 各采集 171 个土壤样品,60~100 cm 采集 164 个土壤样品。样品采集过程中,使用手持 GPS 记录每个剖面的经纬度坐标和海拔信息,并详细记录每个点位的地名、成土母质、土壤类型以及耕作管理等环境信息。土壤样品带回实验室,经自然风干后挑出动植物残体,碾磨过 100 目筛待测。采用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳含量^[23]。测定过程中,采用 3 次重复和国家标准物质(四川紫色土,编号:GBW07414a)进行数据质量控制。

1.3 数据分析方法

1.3.1 土壤有机碳剖面拟合及精度验证方法

本文采用指数递减函数分别对研究区 171 个土壤剖面有机碳分布进行拟合,并获取指数递减函数参数,用以分析参数的空间变异特征及其与环境因子间的关系,进而识别影响土壤有机碳剖面分布的主控因素。指数递减函数方程如下:

$$y = Ce^{-kx} \quad (1)$$

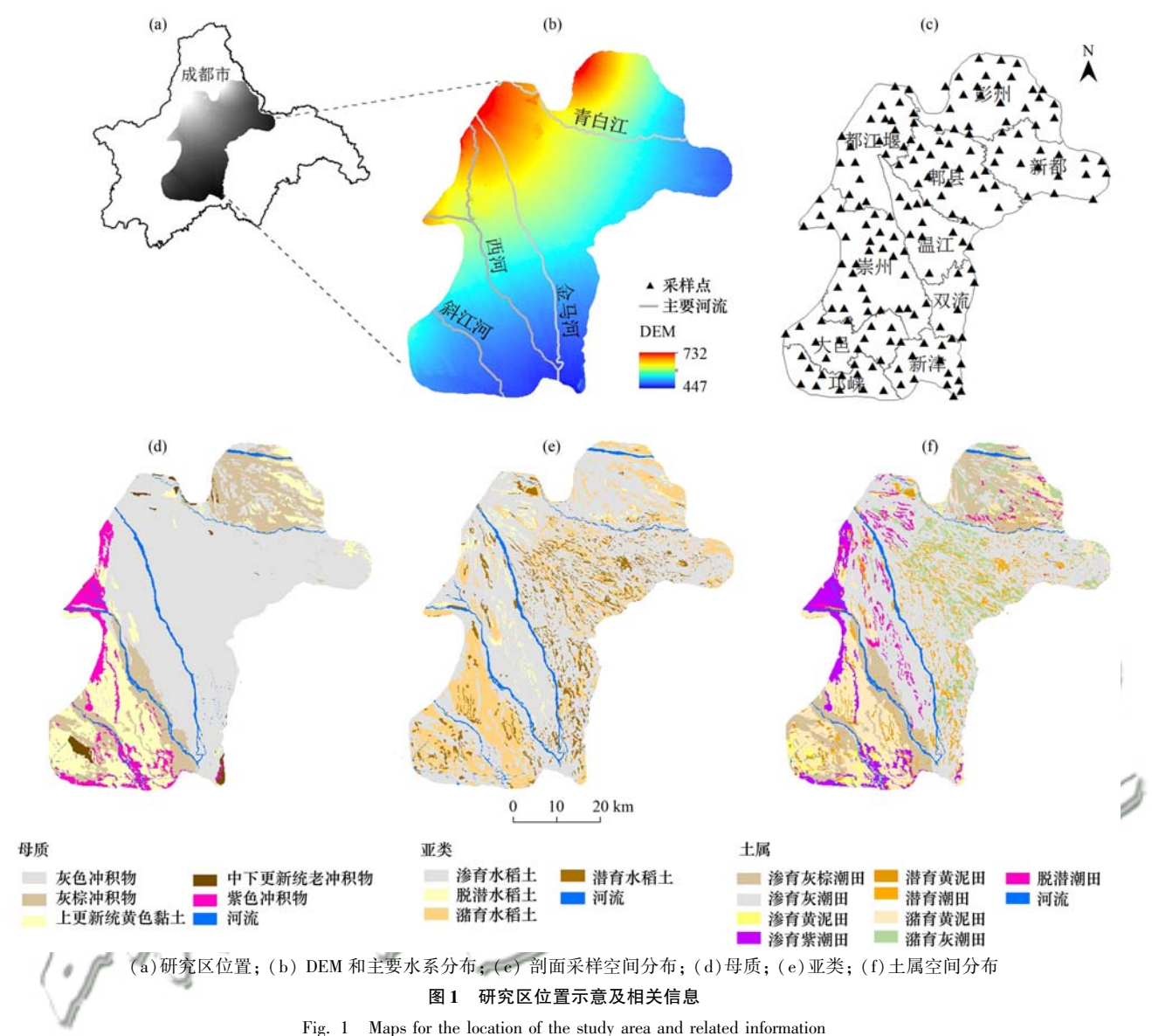


图 1 研究区位置示意及相关信息

Fig. 1 Maps for the location of the study area and related information

式中, x 表示土层深度 (cm); y 表示一定深度土壤有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); C 和 k 为深度函数的 2 类参数. 参数 C 表示土壤深度为零时的土壤有机碳含量, 即地表土壤有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); k 表示有机碳剖面变化的速率^[8, 20].

采用平均误差 (ME)、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 对研究区土壤有机碳剖面分布拟合结果精度进行评价^[24]. ME、MAE 和 RMSE 的计算公式如下:

$$\text{ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{SOC}_{\text{obs}(i)} - \text{SOC}_{\text{pred}(i)}) \quad (2)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{SOC}_{\text{obs}(i)} - \text{SOC}_{\text{pred}(i)}| \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{SOC}_{\text{obs}(i)} - \text{SOC}_{\text{pred}(i)})^2} \quad (4)$$

式中, n 为验证点的个数; $\text{SOC}_{\text{obs}(i)}$ 为第 i 个验证点的实测值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\text{SOC}_{\text{pred}(i)}$ 为第 i 个验证点的模拟值 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$). ME、MAE 和 RMSE 的值越小, 剖面分布函数的拟合精度越高.

1.3.2 地统计分析

利用地统计学方法结合 GIS 技术分析指数递减函数参数的空间变异特征^[25, 26]. 首先在 GS + 9.0 中进行参数的半方差结构分析. 分析过程中, 以决定校正系数 R^2 最大、残差 RSS 最小确定最优理论插值模型. 再根据半方差拟合模型和参数, 在 ArcGIS 10.1 中利用普通克里格法进行空间插值, 生成 2 类参数的空间分布趋势图.

1.3.3 统计分析

常规数理统计、K-S 检验及回归分析均在 SPSS 19.0 中完成. 通过 K-S 检验确定指数递减函数参数

C 和 k 的数据正态性,将不服从正态分布的数据进行数据转换,以满足数据分析要求. 利用一般线性模型的决定校正系数 R^2 揭示各影响因素的影响程度,以确定影响土壤有机碳剖面分布的主控因素. 分析过程中,所有显著性水平均设定为 $P < 0.05$. 由于成土母质、土壤类型、与河流距离分组、海拔分组及土地利用方式为定性的分类变量,采用哑变量法对其进行赋值,以构建回归模型^[27].

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的剖面分布特征

成都平原区 0~100 cm 水稻土壤有机碳含量的描述性统计结果显示(表 1),土壤有机碳含量随土

层深度增加而逐渐降低. 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm 土壤有机碳含量均值分别为 19.42、9.59、5.99 和 5.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,各层土壤有机碳含量差异显著. 土壤有机碳含量主要集中在 0~40 cm 土层,其中 0~20 和 20~40 cm 土壤有机碳含量分别占整个剖面有机碳含量的 48.31% 和 23.86%. 从土壤有机碳的剖面变化来看,与上一土层有机碳含量相比,20~40、40~60 和 60~100 cm 土层土壤有机碳含量分别下降了 50.6%、37.5% 和 13.2%,呈现出显著的下降趋势,下降程度随土层深度增加而减缓. 从变异系数来看,各层土壤有机碳含量的变异系数在 25.13%~38.20%,均具有中等强度的空间变异性.

表 1 土壤有机碳剖面分布的描述性统计特征

Table 1 Descriptive characteristics of soil organic carbon in the soil profile

土层深度 /m	样本/个	极小值 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	极大值 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	占剖面的质量分数 /%	变异系数 /%
0~20	171	10.16	37.01	19.42A ¹⁾	48.31	25.13
20~40	171	4.25	22.98	9.59B	23.86	34.32
40~60	171	1.36	17.31	5.99C	14.90	38.20
60~100	164	1.44	11.96	5.20D	12.94	36.16

1) 不同土层有机碳含量均值间的不同大写字母表示差异显著, $P < 0.05$

2.2 土壤有机碳剖面分布函数拟合精度评价

表 2 分析结果显示,成都平原区水稻土有机碳剖面分布呈现出显著的递减趋势,进一步采用指数递减函数分别对研究区 171 个水稻有机碳的剖面分布进行拟合. 结果表明,各剖面拟合函数 R^2 的均值为 0.849. 进一步验证实测值与预测值之间的平均误差、平均绝对误差和均方根误差,分别为 -0.271、1.690 和 2.003 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 以上分析结果表明,指数递减函数能较好拟合研究区土壤有机碳含量的剖面分布.

2.3 土壤有机碳剖面分布函数参数统计特征

对拟合研究区土壤有机碳剖面分布的指数递减

表 2 土壤有机碳剖面分布函数拟合误差分析

Table 2 Error in the soil organic carbon depth function

拟合函数 R^2	拟合精度评价		
	平均误差 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均绝对误差 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	均方根误差 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
0.849	-0.271	1.690	2.003

函数参数 C 和 k 进行统计分析(表 3),结果显示参数 C 和 k 的变异系数分别为 35.98% 和 36.31%,均在 10%~100% 之间,具有中等程度的空间变异性,但参数 k 的变异程度要略高于 C . 数据正态性检验结果表明,参数 C 和 k 均符合对数正态分布. 将原始数据进行对数转换,以满足后文数据分析要求.

表 3 指数递减函数参数的描述性统计特征¹⁾

Table 3 Descriptive characteristics of the parameters of the exponential decay function

参数	样本	极小值	极大值	均值	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 检验	数据类型
C	171	10.23	61.31	21.92	35.98	0.46*	0.37*	0.64*	对数正态
k	171	0.01	0.06	0.02	36.31	0.22*	0.27*	0.37*	对数正态

1) * 表示进行对数转换后的结果

2.4 空间分析

2.4.1 空间结构特征

半方差分析显示(表 4 和图 2),拟合研究区土壤有机碳剖面分布的指数递减函数参数 C 和 k 分别

符合球状模型和指数模型. 从模型拟合参数来看,参数 C 和 k 块金系数分别 55.400% 和 47.671%,均在 25%~75% 之间,其空间变异主要受气候、成土母质、土壤类型和地形结构性因素和土地利用方式

和耕作施肥等随机性因素共同影响^[25,26]. 这一结果也说明,成都平原区水稻土壤有机碳剖面分布主要受结构性因素和随机性因素影响共同影响. 可以看出,相比于参数 k ,参数 C 具有更大的块金系数,表明与地表土壤有机碳含量有关的参数 C 的空间变异更倾向于受随机性因素影响.

表 4 指数递减函数参数半方差模型及拟合参数

Table 4 Semi-variance model and fitted parameters for the parameters of the exponential decay function							
参数	模型	块金值	基台值	块金系数/%	变程/m	决定校正系数 R^2	残差 RSS
C	球状	0.065	0.118	55.400	49.958	0.881	5.77E-04
k	指数	0.068	0.143	47.671	14.250	0.528	5.75E-04

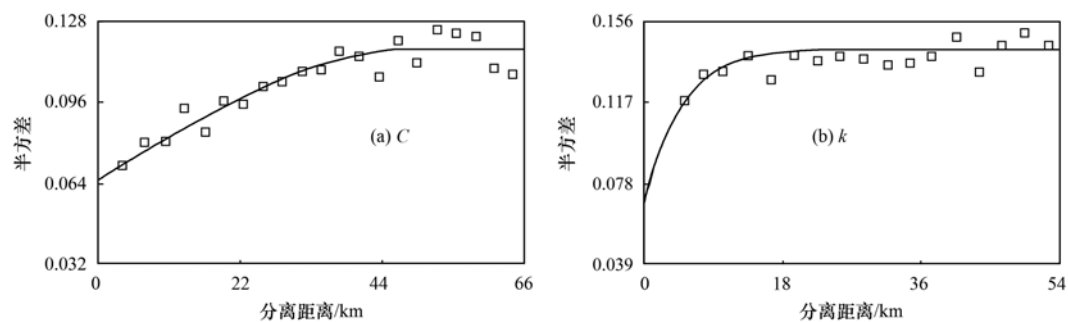


图 2 指数递减函数参数半方差
Fig. 2 Semi-variance maps for the parameters of exponential decay function

2.4.2 空间分布趋势

图 3 反映了拟合研究区土壤有机碳剖面分布的指数递减函数参数的空间分布格局. 从中可以看出,参数 C 和 k 呈现出由中间逐渐向四周增加的空间分布趋势,表现出一致的空间分布格局,

表明这 2 类参数具有空间相关性. 2 类参数的高值区呈面状集中分布在研究区的西南部 and 东北部; 参数 C 的低值区呈面状分布在研究区中部的郫县,而参数 k 的低值区则主要呈斑块状分布在中部区域.

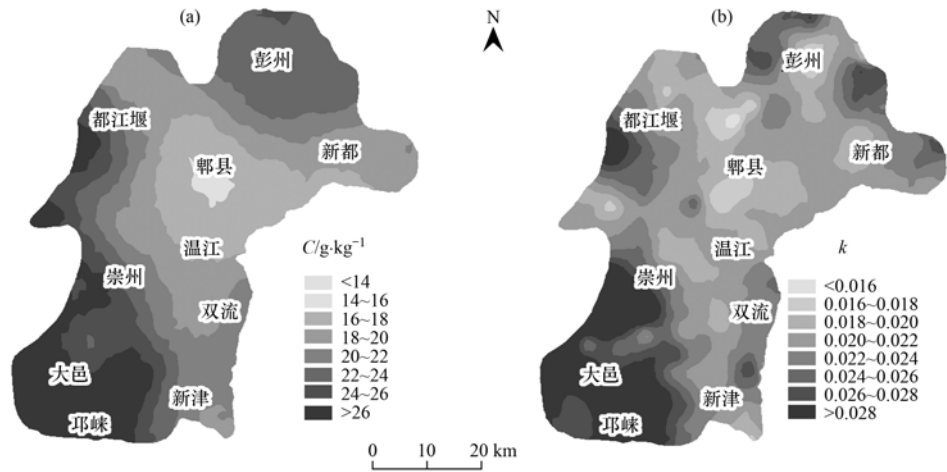


图 3 指数递减函数参数空间分布格局
Fig. 3 Spatial pattern maps for the parameters of the exponential decay function

2.5 影响因素分析

由表 5 可知,除海拔外,其余各因素对参数 C 的空间变异均有显著或极显著影响,但影响解释差异明显. 土属可解释参数 C 21.5% 的空间变异,其次是成土母质,为 16.4%. 尽管海拔、与河流距离和土地利用方式可解释参数 C 2.1% ~ 6.0% 的空

间变异,但解释能力远低于土属和成土母质,说明土属和成土母质是影响参数 C 空间变异的主控因素. 成土母质、土属、亚类及海拔对参数 k 的空间变异均有显著或极显著影响. 土属和成土母质对参数 k 空间变异的解释能力相近,约为亚类和海拔的 4.5 倍,是影响参数 k 空间变异的主控因素. 可以看出,

土壤类型分类级别中,土属对两类参数空间变异的解释能力均显著高于亚类,这一结果表明土属可作

为探讨成都平原区土壤类型对土壤有机碳剖面分布影响作用的基本分类单元.

表 5 影响因素与指数递减函数参数间的回归分析

Table 5 Regression analysis between influencing factors and the parameters of the exponential decay function

影响因素	C		k	
	决定校正系数 R^2	Sig.	决定校正系数 R^2	Sig.
亚类	0.060	<0.010	0.034	<0.050
土属	0.215	<0.010	0.155	<0.010
母质	0.164	<0.010	0.151	<0.010
海拔	0.018	0.135	0.036	<0.050
河流距离	0.045	<0.050	-0.001	0.454
土地利用	0.021	<0.050	0.013	0.127

3 讨论

3.1 成都平原区水稻土壤有机碳的剖面分布

本研究结果显示,成都平原区水稻土有机碳含量在土壤剖面上呈现出显著递减趋势,这一结果与廖丹^[1]和张宏玲等^[21]在同一区域的研究结果类似,也与刘飞等^[2]在全国尺度上对水稻土有机碳剖面分布的研究结果保持一致. 0~20 cm 土壤有机碳含量均值为 19.42 g·kg⁻¹,是我国表层水稻土有机碳含量的 1.03 倍^[2],是全国耕层土壤有机碳含量的 1.36 倍^[28],表明成都平原区水稻土具有较高的有机碳含量,对区域乃至全国土壤有机碳储量估算均具有重要意义. 与之类似,郭晶晶^[3]和奚小环等^[29]通过对比我国典型区域不同土壤类型土壤有机碳储量指出,成都平原水稻土有机碳密度较高,具有较大的固碳潜力. 本研究中,0~20 和 20~40 cm 土壤有机碳含量占整个土壤剖面的 72.17%,40 cm 以上土壤尤其是表层土壤具有较大的固碳潜力,是研究成都平原水稻土碳源/汇的关键部分.

3.2 环境因素对水稻土壤有机碳剖面分布的影响

土壤性质空间分布格局由气候、成土母质、土壤类型及地形等结构性因素控制,而不同区域内的土地利用方式、农业管理措施等随机性因素是影响其空间分布局部差异的重要因素^[26]. 本文通过分析拟合土壤有机碳剖面分布的指数递减函数参数的空间结构特征以及参数与环境因素之间的关系,进而揭示影响研究区水稻土有机碳剖面分布的主控因素. 在指数递减函数中,参数 C 与地层土壤有机碳含量有关;参数 k 控制土壤有机碳剖面变化的速率,反映了土壤有机碳在整个剖面中的变化情况. 半方差结果揭示,指数递减函数的 2 类参数的块金系数均在 25%~75%之间,表明研究区水稻土壤有机碳剖面分布主要受结构性因素和随机性因素共同

影响.

在影响研究区土壤有机碳剖面分布的 6 种因素中,有 5 种因素对指数递减函数参数 C 的空间变异有显著或极显著影响;有 4 种因素对参数 k 的空间变异有显著或极显著影响. 这一结果说明,影响地表土壤有机碳含量的因素较影响土壤有机碳垂空间分布的因素更为复杂. 张宏玲等^[21]在成都市的郫县和新都区开展的研究指出,在区域尺度上探究成都农田土壤有机碳空间变异及驱动力时应更加注重土壤特征类型的影响力(如颗粒组成、成土母质和亚类). 与之类似,本研究中,成土母质和土属对 2 类参数空间变异的解释能力均远高于其余因素,是影响研究区土壤有机碳剖面分布的主控因素. 成都平原母质来源复杂,不同成土母质发育而来的土壤在养分含量、土壤结构等土壤理化性质方面均存在较大差异^[30],从而导致了土壤有机碳剖面分布的差异,使得成土母质成为控制研究区土壤有机碳剖面分布的主控因素. 土属的划分在亚类的基础上附加考虑了成土母质和成土过程,进而使得土属的解释能力均远大于亚类,可作为探讨土壤类型对研究区土壤有机碳剖面分布作用的基本分类单元^[31]. 相比之下,与河流距离和土地利用方式仅对参数 C 有显著影响,海拔仅对参数 k 有显著影响,但影响程度均远低于成土母质和土属. 土地利用方式主要通过有机物质(有机肥、地表枯落物和秸秆还田等)的输入来影响土壤有机碳含量;与河流距离的远近不仅揭示了土壤成土过程和成土条件的差异,还反映了研究区土地利用方式的差异. 随着成都市经济发展、农业结构调整,距离河流相对较远的区域农地利用方式发生变化,出现了种植花卉苗木的园林用地、农林复合用地和果园等多种用地方式. 张宏玲等^[21]的研究发现,轮作制度对成都典型轮作区 0~20 cm 土壤有机碳密度有显著影响,对 20~40 cm 土壤有机

碳密度无显著影响,即土地利用主要影响这一区域表层土壤有机碳密度。因此,与河流距离和土地利用方式主要通过影响研究区地表土壤有机碳含量进而对土壤有机碳剖面分布产生影响。海拔通过影响区域水热条件的分配进而影响土壤有机碳的输入和转化。研究区处于成都平原的核心区,海拔高度在 447 ~ 732 m 之间,但区内地势总体平缓,同一区县内海拔高差并不明显,从而削弱了海拔对与地表有机碳含量有关的参数 C 的影响作用,是影响研究区水稻土有机碳剖面变化速率的重要因素。

4 结论

(1) 成都平原区水稻土有机碳含量表现出显著的剖面递减趋势, 0 ~ 40 cm 土壤有机碳含量占整个剖面的质量分数为 72.17%, 具有较高的有机碳含量和较大的固碳潜力。

(2) 水稻土剖面分布主要受结构性因素和随机性因素共同影响。拟合水稻土有机碳剖面分布的指数递减函数的 2 类参数具有一致的空间分布格局,表现出空间相关性。相比于控制土壤有机碳剖面变化速率的参数 k , 与地表土壤有机碳含量有关的参数 C 更倾向于受随机性因素影响。

(3) 成土母质和土属是影响研究区土壤有机碳剖面分布的主控因素,但海拔、与河流距离和土地利用的作用不容忽视。在拟合成都平原水稻土有机碳剖面分布、构建三维空间预测模型和估算土壤有机碳储量时,可重点考虑成土母质和土属的影响作用。

参考文献:

- [1] 廖丹, 于东升, 赵永存, 等. 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2015, **52**(3): 517-527.
- Liao D, Yu D S, Zhao Y C, *et al.* Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(3): 517-527.
- [2] 刘飞, 杨柯, 李括, 等. 我国四种典型土类有机碳剖面分布特征[J]. 地学前缘, 2011, **18**(6): 20-26.
- Liu F, Yang K, Li K, *et al.* Profile distribution of organic carbon of four typical soils in China[J]. Earth Science Frontiers, 2011, **18**(6): 20-26.
- [3] 郭晶晶, 夏学齐, 杨忠芳, 等. 长江流域典型区域土壤碳库变化及其影响因素[J]. 地学前缘, 2015, **22**(6): 241-250.
- Guo J J, Xia X Q, Yang Z F, *et al.* Changes of soil carbon pool in typical areas of Changjiang drainage basin and its influencing factors[J]. Earth Science Frontiers, 2015, **22**(6): 241-250.
- [4] 兰志龙, 赵英, 张建国, 等. 陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 339-347.
- Lan Z L, Zhao Y, Zhang J G, *et al.* Profiled distribution of soil organic and inorganic carbon under different land use types in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 339-347.
- [5] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究[J]. 土壤学报, 2016, **53**(6): 1433-1443.
- Guo Y, Li X L, Wang X J, *et al.* Profile distribution of soil inorganic and organic carbon in farmland in arid and semi-arid areas of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(6): 1433-1443.
- [6] 夏品华, 喻理飞, 寇永珍, 等. 贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(4): 1479-1485.
- Xia P H, Yu L F, Kou Y Z, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with enzyme activity in the Caohai wetland of the Guizhou Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(4): 1479-1485.
- [7] Chen C, Hu K L, Li H, *et al.* Three-dimensional mapping of soil organic carbon by combining Kriging method with profile depth function[J]. PLoS One, 2015, **10**(6): e0129038.
- [8] Yang R M, Zhang G L, Yang F, *et al.* Precise estimation of soil organic carbon stocks in the northeast Tibetan Plateau[J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 21842.
- [9] 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 等. 江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3422-3428.
- Wang Y Z, Xiao H A, Zhou P, *et al.* Distribution and dynamics of cropland soil organic carbon in Jiangnan plain: a case study of Qianjiang city[J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3422-3428.
- [10] 石玲, 戴万宏. 安徽省几种主要土壤有机碳含量及其组分研究[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(2): 145-149.
- Shi L, Dai W H. Soil organic carbon and its fraction in Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, **30**(2): 145-149.
- [11] 顾成军, 史学正, 于东升, 等. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子——土壤类型与土地利用比较[J]. 土壤学报, 2013, **50**(3): 425-432.
- Gu C J, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Main factor controlling SOC spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(3): 425-432.
- [12] 汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 等. 吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2788-2792.
- Tang J, Zhang W H, Li Z Y, *et al.* Research on vertical distribution pattern and reserve of organic carbon in paddy field soil of Qianqiao, Jilin[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2788-2792.
- [13] Teng M J, Zeng L X, Xiao W F, *et al.* Spatial variability of soil organic carbon in Three Gorges Reservoir area, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **599-600**: 1308-1316.
- [14] Wang T, Kang F F, Cheng X Q, *et al.* Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China[J]. CATENA, 2017, **155**: 41-52.

- [15] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 皖北平原蒙城县农田土壤有机碳空间变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2014, **51**(5): 1153-1159.
Ma Y X, Li X S, Li D C, *et al.* Spatial variation of soil organic carbon content in farmland and its influencing factors in Mengcheng County, northern Anhui Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(5): 1153-1159.
- [16] Liu F, Zhang G L, Sun Y J, *et al.* Mapping the three-dimensional distribution of soil organic matter across a subtropical hilly landscape[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, **77**(4): 1241-1253.
- [17] Liu F, Rossiter D G, Song X D, *et al.* A similarity-based method for three-dimensional prediction of soil organic matter concentration[J]. *Geoderma*, 2016, **263**: 254-263.
- [18] Taghizadeh-Mehrjardi R, Nabiollahi K, Kerry R. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran[J]. *Geoderma*, 2016, **266**: 98-110.
- [19] Minasny B, McBratney A B, Mendonca-Santos M L, *et al.* Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2006, **44**(3): 233-244.
- [20] Kempen B, Brus D J, Stoorvogel J J. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions[J]. *Geoderma*, 2011, **162**(1-2): 107-123.
- [21] 张宏玲, 于东升, 王宁, 等. 成都典型区轮作与土壤特征类型对有机碳密度影响力比较研究[J]. 土壤, 2014, **46**(3): 419-425.
Zhang H L, Yu D S, Wang N, *et al.* Comparative study of crop rotation systems and soil characteristic types influence on organic carbon density of the typical area in Chengdu[J]. *Soils*, 2014, **46**(3): 419-425.
- [22] Liu X L, Li T, Zhang S R, *et al.* The role of land use, construction and road on terrestrial carbon stocks in a newly urbanized area of western Chengdu, China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, **147**: 88-95.
- [23] 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.
Lu R K. Methods for agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000.
- [24] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 等. 基于定性和定量辅助变量的土壤有机质空间分布预测——以四川三台县为例[J]. 地理科学进展, 2014, **33**(2): 259-269.
Li Q Q, Wang C Q, Yue T X, *et al.* Prediction of distribution of soil organic matter based on qualitative and quantitative auxiliary variables: a case study in Santai County in Sichuan Province[J]. *Progress in Geography*, 2014, **33**(2): 259-269.
- [25] 李珊, 李启权, 张浩, 等. 泸州植烟土壤有效态微量元素含量空间变异及其影响因素[J]. 土壤, 2016, **48**(6): 1215-1222.
Li S, Li Q Q, Zhang H, *et al.* Spatial variability of soil available microelement contents and their influencing factors in Luzhou's tobacco planting area, southwestern Sichuan[J]. *Soils*, 2016, **48**(6): 1215-1222.
- [26] Abegaz A, Winowiecki L A, Vågen T G, *et al.* Spatial and temporal dynamics of soil organic carbon in landscapes of the upper Blue Nile Basin of the Ethiopian Highlands [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **218**: 190-208.
- [27] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. 数理医药学杂志, 2006, **19**(1): 51-53.
Li L X, Gao Y H, Zhang Y. The application of dummy variable in statistics analysis [J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2006, **19**(1): 51-53.
- [28] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, **54**(5): 1047-1056.
Yang F, Xu Y, Cui Y, *et al.* Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(5): 1047-1056.
- [29] 奚小环, 杨忠芳, 廖启林, 等. 中国典型地区土壤碳储量研究[J]. 第四纪研究, 2010, **30**(3): 573-583.
Xi X H, Yang Z F, Liao Q L, *et al.* Soil organic carbon storage in typical regions of China[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(3): 573-583.
- [30] 成都市土壤普查成果资料汇编委员会. 成都土壤[M]. 成都: 成都市农牧局, 1993.
- [31] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(1): 34-42.
Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Spatial variability of soil organic carbon and related controlling factors in Renshou County, Sichuan Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(1): 34-42.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)