

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

**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(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 ..... 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 ..... 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析 ..... 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 ..... 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 ..... 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ<sup>13</sup>C观测的大气 CO<sub>2</sub> 来源解析 ..... 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 ..... 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 ..... 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 ..... 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 ..... 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 ..... 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 ..... 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 ..... 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 ..... 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 ..... 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 ..... 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 ..... 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 ..... 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 ..... 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 ..... 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 ..... 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 ..... 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 ..... 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 ..... 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 ..... 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 ..... 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 ..... 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 ..... 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 ..... 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 下 SBR 中硝化微生物特性 ..... 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 ..... 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 ..... 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 ..... 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 ..... 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 ..... 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO<sub>2</sub> 排放的综合影响 ..... 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 ..... 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 ..... 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 ..... 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 ..... 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 ..... 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 ..... 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 ..... 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 ..... 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 ..... 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 ..... 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 ..... 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 ..... 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 ..... (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

# 福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性

姚雄<sup>1,2</sup>, 余坤勇<sup>1,2</sup>, 曾琪<sup>1</sup>, 杨玉洁<sup>1</sup>, 张今朝<sup>1</sup>, 刘健<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 2. 3S 技术与资源优化利用福建省高校重点实验室, 福州 350002)

**摘要:** 土壤呼吸( $R_s$ )作用的空间异质性对于准确估算水土流失区碳收支具有重要意义。通过对长汀县河田镇 59 个样地的土壤呼吸及土壤全氮(TN)、碳氮比(C/N)、有机碳含量(SOC)、叶面积指数(LAI)、土壤温度( $T_{10}$ )、土壤湿度( $W$ )等影响因子测定的基础上,运用传统和地统计学的方法分析了土壤呼吸及其影响因子的空间异质性。结果表明, $R_s$ 及其影响因子的变异程度大小依次为: LAI > SOC > TN >  $R_s$  > C/N >  $T_{10}$  >  $W$ ;  $R_s$ 与  $T_{10}$ 呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 TN 呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与其他因子的相关性不显著( $P > 0.05$ ); TN、SOC 和  $T_{10}$ 这 3 个因子可以解释土壤呼吸 27% 的空间变化。地统计学分析结果表明:  $R_s$ 具有中等程度的空间自相关性,结构性因子引起的空间异质性占 52.89%,与随机因素的占比(47.11%)相当;  $R_s$ 及其影响因子的分维数大小依次为:  $R_s$  > LAI > C/N >  $T_{10}$  > SOC >  $W$  > TN;  $R_s$ 的空间分布格局与 TN 和  $T_{10}$ 的空间分布格局较为一致,而与 C/N、SOC、LAI 的空间分布格局不同。在 95% 置信水平和 90% 估计精度下, $R_s$ 的合理采样数量为 62 个。

**关键词:** 土壤呼吸; 空间变异; 地统计学; 半方差函数; 植被类型

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4789-11 DOI: 10.13227/j.hjlx.201605005

## Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China

YAO Xiong<sup>1,2</sup>, YU Kun-yong<sup>1,2</sup>, ZENG Qi<sup>1</sup>, YANG Yu-jie<sup>1</sup>, ZHANG Jin-zhao<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. University Key Laboratory for Geomatics Technology and Optimize Resources Utilization in Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The spatial heterogeneity of soil respiration ( $R_s$ ) is of great significance in accurately estimating the carbon budget in erosion areas. This study investigated the soil respiration ( $R_s$ ), total nitrogen (TN), carbon-nitrogen ratio (C/N), soil organic carbon content (SOC), leaf area index (LAI), soil temperature ( $T_{10}$ ), and soil moisture ( $W$ ) in 59 soil samples collected from Hetian Town in Fujian Province. Both classical statistics and geostatistics were used to analyze the spatial heterogeneity of soil respirations and other measured factors. The variability of  $R_s$  and other measured factors in the samples ranked from the largest to the smallest: LAI > SOC > TN >  $R_s$  > C/N >  $T_{10}$  >  $W$ .  $R_s$  was positively correlated with  $T_{10}$  ( $P < 0.01$ ) and with TN ( $P < 0.05$ ), but not significantly correlated with other factors ( $P > 0.05$ ); TN, SOC and  $T_{10}$  could be used to explain the spatial variation of soil respiration among the samples. The results from geo-statistical analysis showed that  $R_s$  was in a medium spatial autocorrelation, with 52.89% of spatial heterogeneity caused by structural factors and 47.11% of spatial heterogeneity resulted from random factor; the fractal dimensions of soil respiration and its interacted factors were ranked as:  $R_s$  > LAI > C/N >  $T_{10}$  > SOC >  $W$  > TN; the spatial distribution patterns of  $R_s$  were similar with those of TN and  $T_{10}$ , but different from those of C/N, SOC or LAI. At the 95% confidence level and 90% estimation accuracy, the reasonable sampling number of  $R_s$  was 62.

**Key words:** soil respiration; spatial heterogeneity; geostatistics; semi-variogram function; vegetation types

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的主要组成部分,其在全球碳循环和碳平衡中起着十分重要的作用,全球每年通过土壤呼吸排放到大气中的  $\text{CO}_2$  约为  $77\text{Pg C}^{[1]}$ 。由于土壤碳库约为大气碳库的 2 倍,土壤呼吸的微小变化均能导致大气中  $\text{CO}_2$  浓度的巨大波动<sup>[2]</sup>,加之土壤呼吸的影响因素很多,给准确量化区域土壤碳通量带来很大困难。因此,如何精确测定土壤呼吸是研究生态系统碳循环和全球气候变暖的热点之一。有研究表明,土壤呼吸在不同尺度上都存在较高的时空变异性<sup>[3,4]</sup>。众多学者指出土壤湿度和土壤温度是土壤呼吸季节变化的主要限制因子<sup>[5,6]</sup>,但其并不能完全解释土壤呼吸的空

间变化<sup>[7]</sup>。Reichstein 等<sup>[8]</sup>研究发现底物的可利用性是控制土壤呼吸空间变化的主要因子,Eberwein 等<sup>[9]</sup>的研究也支持了这一说法;一些研究指出土壤特性、微生物活动、植被类型、冠层结构是影响土壤呼吸空间变异的主要因素<sup>[10~12]</sup>。不同生态系统的土壤呼吸具有明显的空间变异性<sup>[13]</sup>,这种空间变异性给精确估算生态系统土壤呼吸带来相当大的困

收稿日期: 2016-05-02; 修订日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401385); 福建省教育厅 A 类项目(JA14126)

作者简介: 姚雄(1990~),男,博士研究生,主要研究方向为 3S 技术应用, E-mail: 424532024@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: fjliujian@126.com

难,也就是说,忽视生态系统土壤呼吸的空间异质性可能高估或低估土壤碳通量<sup>[14]</sup>. 因此,如何准确估计一个空间尺度上土壤碳通量,尤其是自然条件下空间异质性较大的尺度如区域尺度上的碳通量,需要对土壤呼吸及其影响因子的空间异质性进行深入的研究,但这方面的报道相对较少.

目前主要是采用包括回归分析和相关分析的传统统计方法研究土壤呼吸的空间变化情况,这些分析方法通常通过建立经验回归模型来描述土壤呼吸特征. 近年来,随着地统计学在生态学研究方面的广泛应用<sup>[15,16]</sup>,使得研究较大尺度土壤呼吸空间异质性及变异过程成为可能<sup>[10,17]</sup>. 有研究表明,传统统计学和地统计学分析结果在很大程度上具有可比性<sup>[14,17]</sup>,由于地统计学考虑了土壤呼吸的空间自相关作用,因而,它能更好地研究土壤特性的空间异质性<sup>[18]</sup>,不仅可以揭示土壤特性的空间分布规律,也可以通过土壤特性的空间分布规律解释区域生态过程与功能的变化<sup>[19,20]</sup>. 随着研究的不断深入,采用地统计学进行土壤呼吸的空间变异研究区域主要集中在森林生态系统<sup>[21,22]</sup>、草地生态系统<sup>[15,23]</sup>、农田生态系统<sup>[24,25]</sup>. 张义辉等<sup>[17]</sup>的研究表明,太原盆地土壤呼吸具有高度的空间自相关性,球状模型能很好反映其空间分布特征; Buczko 等<sup>[24]</sup>对农田生态系统土壤碳通量的空间变化进行了研究,发现土壤碳通量的空间变化程度与尺度大小有关.

福建省长汀县河田镇是典型的南方红壤水土流失严重区,长久的水土流失现象导致该区生态系统对环境和气候变化极其敏感,环境和气候的微小变化都可能引起南方红壤水土流失区土壤碳通量的巨大变化. 一些学者对南方红壤区不同植被类型的土壤呼吸特征进行了研究<sup>[26,27]</sup>,但对河田镇土壤呼吸及其影响因子的空间异质性的研究目前尚未见报道,所以了解土壤呼吸及其影响因子的空间变化特征对南方红壤水土流失区碳循环研究意义重大. 为此,本研究以传统统计学和地统计学方法为基础,深入分析了河田镇土壤呼吸及其影响因子的空间异质性,旨在更为透彻地了解河田镇土壤呼吸的空间变异特征及其与影响因子间的关系,同时对准确了解水土流失背景下的南方红壤区土壤 CO<sub>2</sub> 的释放量和释放潜力具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建西部的长汀县河田镇,地处武

夷山脉南段(25°33' ~ 26°48'N、116°18' ~ 116°31'E),属于中亚热带季风气候类型. 全镇低山高丘环绕四周,中部开阔,土壤以红壤为主,属典型的南方红壤丘陵区. 境内年平均气温 17.5 ~ 18.8℃,极端最高气温 39.8℃,极端最低气温 -4.9℃,年均降水量 1 700 mm,年最大降水量达 2 522 mm,年最小降水量为 1 074 mm. 境内森林乔木层主要是马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.),灌木层主要包括黄瑞木(*Adinandra millettii*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.),草本层以芒萁(*Dicranopteris dichotoma* Bernh.)为主. 土地利用现状以林地、耕地、水域及水利设施用地、住宅用地为主. 由于历史原因,研究区山地天然植被遭到严重毁坏,转为代之的是马尾松人工林,林下水土流失严重,成为南方典型的水土流失严重区(图 1).

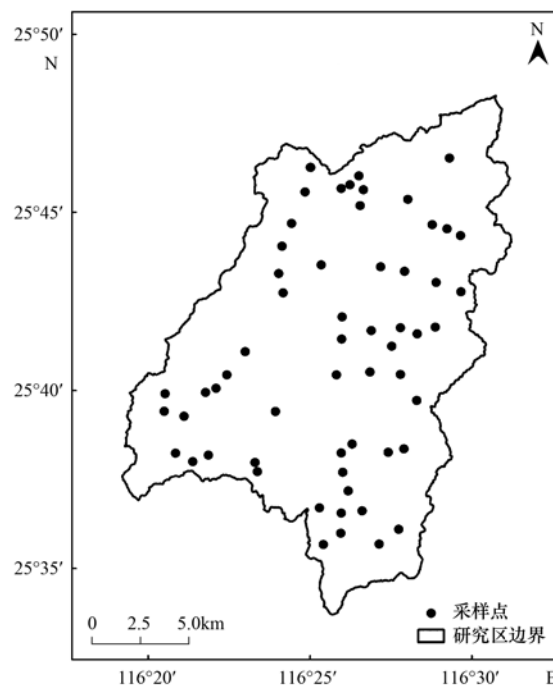


图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Geographic locations of the study area

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样地设置

2015 年 1 月,在研究区 114 个二类样地点的基础上,结合区域地形、植被特征、水文情况等因素布设 59 个 25.82 m × 25.82 m 的标准样地(图 1),样地面积为 667 m<sup>2</sup>,包括 32 个马尾松人工林样地、17 个杉木人工林样地和 10 个阔叶树林样地,样地基本情况见表 1.

#### 1.2.2 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率  $R_s$  [ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ] 采用 LI-

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of test plots

样地号	优势树种	坡度/(°)	海拔/m	坡位	坡向	样地号	优势树种	坡度/(°)	海拔/m	坡位	坡向
1	杉木	14	298	中	东北	31	马尾松	11	311	中	东
2	马尾松	8	296	中	西南	32	杉木	7	322	上	北
3	马尾松	6	312	上	东北	33	马尾松	12	322	中	西
4	马尾松	15	324	下	西北	34	杉木	14	302	下	东
5	马尾松	17	320	下	东	35	马尾松	7	316	下	南
6	杉木	20	393	下	北	36	马尾松	6	300	上	西南
7	阔叶树	4	358	中	东北	37	马尾松	1	309	中	西北
8	阔叶树	19	446	中	东	38	马尾松	15	312	中	南
9	阔叶树	14	399	中	东北	39	马尾松	9	298	上	东
10	阔叶树	26	556	上	西北	40	马尾松	7	299	下	西北
11	阔叶树	41	522	中	南	41	马尾松	17	307	中	西北
12	杉木	24	466	下	北	42	马尾松	9	287	下	西北
13	杉木	5	407	中	北	43	马尾松	13	314	中	西南
14	杉木	14	323	下	西北	44	马尾松	4	313	中	北
15	阔叶树	9	338	中	东北	45	马尾松	20	329	上	西
16	阔叶树	10	316	中	东南	46	杉木	7	314	下	东北
17	阔叶树	14	322	上	东南	47	杉木	24	403	下	北
18	杉木	18	346	中	西北	48	马尾松	7	338	中	西北
19	杉木	1	352	下	西北	49	马尾松	22	363	上	东南
20	杉木	16	392	中	东北	50	马尾松	4	327	中	西
21	杉木	35	374	上	西南	51	马尾松	11	307	上	北
22	杉木	24	420	中	南	52	马尾松	6	300	中	东南
23	杉木	16	330	下	北	53	马尾松	12	301	下	东北
24	杉木	11	352	下	北	54	杉木	5	318	中	东南
25	马尾松	16	303	下	西北	55	马尾松	4	328	下	西南
26	马尾松	6	312	下	东北	56	马尾松	20	348	中	东南
27	马尾松	19	326	下	西南	57	阔叶树	25	386	上	南
28	马尾松	6	371	中	西	58	阔叶树	15	356	下	西南
29	马尾松	18	299	中	东南	59	马尾松	7	331	中	北
30	马尾松	12	299	上	西						

8100(Li-COR Inc, Lincoln, NE, USA) 土壤呼吸测定系统进行测定. 在每个样地内随机安放 3 个直径 20 cm, 高度约 10 cm 的底端经过削尖处理的 PVC 环, 插入深度约 6 cm. 为了减少放置 PVC 环对土壤呼吸的影响, 提前 1 d 将 PVC 环插入土壤中, 同时为了避免植物光合作用对土壤呼吸的作用, 剪除 PVC 环内的地表植被. 测定于 2015 年 1 月 6 ~ 14 日期间早上 09:00 开始, 下午 16:00 结束. 测定时, 将 LI-8100 自带气室扣在 PVC 环上, 检查气室的气密性, 形成密闭气室. 每个 PVC 环测定 3 次重复, 每个样地测定 9 组数据, 取其均值作为该样地的  $R_s$  值.

### 1.2.3 影响因子测定

10 cm 深度土壤温度  $T_{10}$  (°C) 采用 8100-201 土壤温度探头测定, 土壤湿度  $W$  (%) 采用 8100-202 土壤水分探头测定, 二者均连接于 LI-8100, 与土壤呼吸同步测定. 测定时, 将两探针同时插入 PVC 环附近, 测定结束后, 仪器自动记录  $R_s$  对应 10 cm 深度的  $T_{10}$  和  $W$ .

叶面积指数 LAI 采用 LAI-2200 (Li-COR Inc, Lincoln, NE, USA) 进行测定. 测定时, 先在空地测定记录一个冠上  $A$  值, 再进入样地内测定 4 次冠下  $B$  值, 测定结束后, 仪器自动记录 LAI 值. 每个样地重复测定 3 次, 取其平均值作为该样地的 LAI 值.

在每个样地 PVC 环附近设立一个典型土壤垂直剖面, 采集土样时先去除地表凋落物, 然后距表层 0 ~ 20 cm 取约 500 g 土样装入塑料封口袋, 并带回实验室. 袋内土样经自然风干, 去掉杂物, 磨碎, 取部分土样过 0.149 mm 土筛, 用于土壤全氮 TN (%)、全碳 TC (%)、有机碳 SOC (%) 的测定. 土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法测定, 土壤全氮、全碳使用 vario max 常量元素分析仪 (Elementar, Germany) 测定, 碳氮比  $C/N = TC/TN$ .

### 1.3 数据处理分析

#### 1.3.1 传统统计分析

由于数据的非正态分布会导致变异函数曲线产生畸变, 引起结果的不准确性. 因此, 本研究运用单

样本 K-S 检验法检验数据是否服从正态分布<sup>[4]</sup>, 检验时取显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 如果  $P_{K-S} > 0.05$ , 则可认为数据符合正态分布, 可直接用于地统计分析, 若  $P_{K-S} < 0.05$ , 则需要将数据进行对数转换后才可用于地统计分析. 采用 Pearson 相关分析方法分析土壤呼吸  $R_s$  与底物供应因子(TN、C/N、SOC)、生物因子(LAI)和环境因子( $T_{10}$ 、 $W$ )之间的相关关系. 运用逐步回归分析方法构建土壤呼吸与其影响因子的多元回归模型. 采用主成分分析方法提取影响土壤呼吸的主成分. 上述数据分析均是基于 SPSS 21.0 统计软件进行.

合理的样本数目对于降低采样成本及准确估算区域土壤呼吸具有重要意义, 采用以下公式进行合理采样数量的确定<sup>[28]</sup>:

$$N = \frac{(t \times CV)^2}{k^2} \quad (1)$$

$$k = 1 - P \quad (2)$$

式中,  $N$  为合理采样数;  $t$  代表与显著性水平相对应的  $t$  分布的双侧分位数;  $CV$  为样本的变异系数;  $k$  表示实验允许的误差;  $P$  表示估计精度.

### 1.3.2 地统计分析

采用半方差分析法计算土壤呼吸及其影响因子的空间异质性程度, 采用半方差函数建立理论模型分析其空间变异特征. 半方差函数也叫半变异函数, 是以区域化变量理论为基础, 研究空间分布中有一定随机性和结构性的自然现象<sup>[15,29]</sup>. 半方差函数的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (3)$$

式中,  $\gamma(h)$  代表半方差函数, 是所有空间相距  $h$  的点间的平均方差;  $h$  为两样点之间的空间相距距离;  $N(h)$  是取样间隔为  $h$  时的样点对总数;  $Z(X_i)$  和  $Z(X_i + h)$  分别表示变量  $Z(X)$  在空间位置  $X_i$  和  $X_i + h$  上的实测值.

根据半变异函数模型得到块金值( $C_0$ )、基台值( $C_0 + C$ )、变程( $A$ )和分形维数( $D$ ). 这些参数可以反映区域化变量在一定尺度上的空间变异程度和相关性. 块金值  $C_0$  反映了由随机因素引起的空间变异程度. 基台值  $C_0 + C$  反映了由结构方差  $C$  和块金方差  $C_0$  引起的总空间变异程度. 块金值与基台值的比值  $C_0 / (C_0 + C)$  越小, 说明空间相关性越强. 变程  $A$  反映了空间自相关的范围, 即在变程范围内可认为存在空间自相关性. 分形维数  $D$  是在半变异函数模型基础上计算出来的参数值, 可以反

映空间分布格局的复杂性, 该值越大, 表示土壤呼吸的空间依赖性较弱, 空间分布特征较为复杂<sup>[30]</sup>. 上述数据分析均是通过 GS + 10.0 地统计学软件完成的, 同时采用 ArcGIS 9.3 软件进行 Kriging 插值, Kriging 各参数取值参照半方差函数模型参数进行设置, 以此绘制土壤呼吸及其影响因子的空间分布图.

## 2 结果与分析

### 2.1 传统统计分析

#### 2.1.1 描述统计分析

表 2 为研究区土壤呼吸及其影响因子的描述性统计分析结果. 从中可知, C/N 和  $W$  左偏, 而 TN、SOC、LAI、 $T_{10}$ 、 $R_s$  均右偏; 除 LAI、 $T_{10}$  和  $R_s$  呈高峰态外, 其余影响因子均呈低峰态. 对原始数据进行单样本 K-S 检验结果表明,  $R_s$  及其影响因子均符合正态分布 ( $P_{K-S} > 0.05$ ), 说明原始数据满足平稳假设, 可直接利用原始数据进行地统计分析, 不需要对其进行对数转换.

变异系数 (CV) 是衡量变量各个观测值变异程度的一个统计量. 根据变异系数的大小可以将变量的变异程度划分为三类: ①  $CV < 10\%$  属于弱变异性; ②  $10\% \leq CV \leq 100\%$  属于中等变异性; ③  $CV > 100\%$  属于强变异性. 从表 2 可知, 土壤呼吸  $R_s$  及其影响因子的变异系数大小依次为: LAI > SOC > TN >  $R_s$  > C/N >  $T_{10}$  >  $W$ , 除  $W$  的空间变异属于弱变异外, 其余各指标的空间变异均属于中等变异性. TN、SOC、LAI 的变异系数较大, 在 50.00% ~ 54.43% 之间. C/N、 $T_{10}$ 、 $R_s$  的变异系数较小, 分别为 34.69%、22.77% 和 39.22%.

表 2 中各个统计量仅是从传统统计角度描述土壤呼吸及其影响因子的变化情况, 这些统计量可以在一定程度上反映土壤呼吸及其影响因子的整体水平和变化趋势, 但是并不能反映这些影响因子在空间上是如何变化的, 也不能定量刻画影响因子的空间分布特征随取样位置的变化而变化. 土壤呼吸空间异质性的研究, 不仅要知道相关因子变异的大小, 更要了解这些变异在空间上是怎样分布的. 显然, 传统统计分析无法实现这些目的, 而地统计分析是实现这些目的的有效工具.

#### 2.1.2 简单相关分析

表 3 为土壤呼吸及其影响因子的简单相关分析结果. 从中可知,  $R_s$  与  $T_{10}$  呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与 TN 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 与 C/N、

表 2 土壤呼吸及其影响因子的描述性统计分析 ( $n = 59$ )Table 2 Descriptive statistical analysis of soil respiration and its influencing factors ( $n = 59$ )

指标 <sup>1)</sup>	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度	变异系数/%	分布型
TN	0.03	0.27	0.12	0.06	0.27	-0.98	50.00	正态
C/N	1.87	14.17	8.62	2.99	-0.42	-0.68	34.69	正态
SOC	0.29	4.75	1.97	1.03	0.24	-0.39	52.28	正态
LAI	0.78	6.28	2.37	1.29	1.30	1.47	54.43	正态
$T_{10}$	5.12	18.04	11.64	2.65	0.06	0.16	22.77	正态
$W$	8.50	13.39	11.08	1.10	-0.03	-0.13	9.93	正态
$R_s$	0.43	2.47	1.02	0.40	1.01	1.89	39.22	正态

1)表中 TN、C/N、SOC、LAI、 $T_{10}$ 、 $W$ 、 $R_s$  分别表示土壤全氮(%)、土壤全碳/土壤全氮、土壤有机碳(%)、叶面积指数、10cm 深度的土壤温度(°C)、土壤湿度(%)、土壤呼吸[ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ],下同

SOC、LAI、 $W$  相关性不显著( $P > 0.05$ ),表明在空间尺度上,环境因子、土壤底物供应共同影响着  $R_s$ .  $R_s$  与  $T_{10}$  的相关系数( $r = 0.428$ )大于  $R_s$  和 TN( $r = 0.209$ )的相关系数,说明  $T_{10}$  对研究区  $R_s$  的空间分布的影响要大于 TN 对  $R_s$  的空间分布的影响. 采用多元逐步回归方法对  $R_s$  和 TN、C/N、SOC、 $T_{10}$ 、 $W$  进行拟合,拟合方程为:  $R_s = 0.14 + 4.037 \text{ TN} - 0.019 \text{ SOC} + 0.065 T_{10}$  ( $R^2 = 0.27, P = 0.000$ ),拟合结果表明,在空间尺度上, $R_s$  的变化主要受 TN、

SOC 和  $T_{10}$  的影响,TN、SOC 和  $T_{10}$  这 3 个因子可以解释  $R_s$  空间变化的 27%. 利用 SPSS 21.0 软件进行土壤呼吸及其影响因子的主成分分析(表 4),结果表明代表土壤底物供应因子和生物因子的主成分 1(TN、SOC 和 LAI)可以解释  $R_s$  空间变异的 51.07%,代表环境因子的主成分 2( $T_{10}$ )和主成分 3( $W$ )可以分别解释  $R_s$  空间变异的 20.54% 和 12.85%,3 个主成分累计可以解释  $R_s$  空间变异的 84.46%.

表 3 土壤呼吸和环境因子的相关性矩阵<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation matrix for soil respiration and its environmental factors

	TN	C/N	SOC	LAI	$T_{10}$	$W$	$R_s$
TN	1						
C/N	0.742 **	1					
SOC	0.887 **	0.803 **	1				
LAI	0.606 **	0.456 **	0.453 **	1			
$T_{10}$	0.062	0.081	0.093	-0.157	1		
$W$	-0.349 **	-0.094	-0.255	-0.334 **	0.110	1	
$R_s$	0.209 *	0.110	0.095	0.124	0.428 **	0.122	1

1) \* 表示显著性水平 0.05; \*\* 表示显著性水平 0.01

表 4 土壤呼吸及其影响因子的主成分分析结果

Table 4 Principal components analysis results of soil respiration and its influencing factors

成分	主成分 1	主成分 2	主成分 3
特征值	4.09	1.64	1.03
方差贡献率/%	51.07	20.54	12.85
累计贡献率/%	51.07	71.61	84.46
TN	0.96	-0.02	-0.01
C/N	0.86	-0.01	0.33
SOC	0.93	-0.01	0.18
特征向量 LAI	0.66	-0.20	-0.35
$T_{10}$	0.09	0.92	0.04
$W$	-0.37	0.20	0.81
$R_s$	0.19	0.85	-0.31

## 2.2 地统计分析

### 2.2.1 半方差函数分析

表 5 为  $R_s$  及其影响因子半方差函数分析结果.

从中可知,除 C/N 和 LAI 的理论模型属于随机分布的线性模型外, $R_s$  及其他影响因子的理论模型均属于聚集状的分布模式(高斯、球状、指数),其中 TN、 $R_s$  的最优模型为高斯模型, SOC 和  $T_{10}$  的最优模型均为球状模型, $W$  的最优模型为指数模型.  $R_s$  及其影响因子的理论模型的拟合系数均大于 0.7,其中 SOC 的拟合系数最低,为 0.704, TN、C/N、LAI、 $W$  和  $R_s$  的拟合系数均大于 0.9. 说明高斯模型可以很好地反映研究区  $R_s$  的空间分布特征.

块金值和基台值的比值 [ $C_0/(C_0 + C)$ ]能反映系统变量的空间自相关程度. 根据  $C_0/(C_0 + C)$  大小可以将系统变量的空间自相关程度划分为三类: ①  $C_0/(C_0 + C) < 25\%$  属于空间相关性较强; ②  $25\% \leq C_0/(C_0 + C) \leq 75\%$  属于空间相关性中等; ③  $C_0/(C_0 + C) > 75\%$  属于空间相关性较弱. 由表 5

可知,  $R_s$  及其影响因子的  $C_0/(C_0 + C)$  大小依次为:  $LAI > R_s > C/N > TN > SOC > T_{10} > W$ .  $TN$ 、 $C/N$ 、 $LAI$  和  $R_s$  的  $C_0/(C_0 + C)$  分别为 28.26%、36.75%、56.03% 和 47.11%, 表明他们具有中等程度的空间自相关性, 结构因素引起的空间异质性分别占 71.74%、63.25%、43.97% 和 52.89, 随机部分分别占 28.26%、36.75%、56.03% 和 47.11%, 说明植被、气候、地形等结构因素对  $TN$ 、 $C/N$  的空间异质性起着主导作用, 随机因素对  $LAI$  的空间异质性起着主导作用, 结构因素和随机因素对  $R_s$  的空间异质性起的作用相当;  $SOC$ 、 $T_{10}$  和  $W$  的  $C_0/(C_0 + C)$  均低于 25%, 表明他们具有较强程度的空间自

相关性, 空间异质性的变化主要受结构性因素的影响, 随机因素引起的空间异质性较小.

空间自相关距离(变程)是描述变量属性相似范围的一种指标, 其值大小对  $R_s$  测定点的科学合理有效设计具有重要的指导意义. 因此, 要进一步研究  $R_s$  及其影响因子的空间分布和变异特征, 需要对其变量异质性的尺度进行探讨. 从表 6 可知, 在研究区域内, 土壤呼吸  $R_s$  及其影响因子的空间自相关距离均有明显的差异,  $TN$ 、 $C/N$  的变程均大于 10 000 m,  $TN$  的变程最大, 达 12 557 m,  $T_{10}$  的变程最小, 仅为 4 710 m, 说明影响  $R_s$  及其影响因子的生态过程尺度有明显差异.

表 5 土壤呼吸及其影响因子的半方差函数理论模型参数

Table 5 Parameters of semi-variogram function theoretical models for soil respiration and its influencing factors

指标	模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程/m	决定系数	离差平方和
TN	高斯	0.001 3	0.004 6	0.282 6	12 557	0.964	2.622E-07
C/N	线性	4.123 4	11.221 6	0.367 5	10 330	0.946	1.830
SOC	球状	0.090 0	0.996 0	0.090 4	5 940	0.704	0.035
LAI	线性	0.809 4	1.444 6	0.560 3	8 084	0.995	5.53E-04
$T_{10}$	球状	0.560 0	7.626 0	0.073 4	4 710	0.899	1.100
W	指数	0.001 0	1.503 0	0.000 7	6 810	0.914	0.034
$R_s$	高斯	0.089 5	0.190 0	0.471 1	7 552	0.865	1.45E-03

### 2.2.2 分维数分析

表 6 为  $R_s$  及其影响因子在各向同性和各向异性下的分维数. 一般来说, 变量的分维数越大, 其空间分布格局越复杂. 从表 6 可知, 在各向同性下,  $R_s$  及其影响因子的双对数半方差函数的拟合系数均大于 0.7, 表明他们具有较好的分性特征, 存在空间尺度上的依赖性.  $R_s$  及其影响因子的分维数大小依次为:  $R_s > LAI > C/N > T_{10} > SOC > W > TN$ , 说明  $R_s$  的空间分布格局最复杂, 其次是  $LAI$  的空间分布格局, 而  $TN$  的空间分布结构最简单.

在各向异性下,  $R_s$  在 45° 方向上的分维值最大, 达 1.958, 其次是 90° 方向上的分维值为

1.899, 0° 和 135° 方向上的分维值分别为 1.731 和 1.861, 说明  $R_s$  在 45° 方向上的空间分布格局最为复杂, 在 0° 方向上的空间分布格局最简单. 与  $R_s$  相似,  $TN$  和  $T_{10}$  在 45° 方向上的空间分布格局最为复杂, 在 0° 方向上的空间分布格局最简单, 说明  $TN$  和  $T_{10}$  的空间分布模式与  $R_s$  较为一致, 这一结论与相关分析得到的结论相一致.  $C/N$  和  $LAI$  在 4 个方向上的分维值均较大, 说明  $C/N$  和  $LAI$  在 4 个方向上的空间分布结构较为复杂, 这与各向同性下的分析一致.  $C/N$  在 45° 方向上的空间分布格局最为复杂, 说明  $C/N$  在此方向上的分布模式与  $R_s$  相一致.

表 6 土壤呼吸及其影响因子的分维数

Table 6 Fractal dimension of soil respiration and its influencing factors

指标	各向同性		各向异性							
	分维值	$R^2$	0°分维值	$R^2$	45°分维值	$R^2$	90°分维值	$R^2$	135°分维值	$R^2$
TN	1.763	0.810	1.574	0.959	1.858	0.447	1.820	0.430	1.775	0.680
C/N	1.834	0.793	1.808	0.530	1.924	0.194	1.790	0.860	1.828	0.672
SOC	1.796	0.982	1.665	0.921	1.813	0.866	1.962	0.999	1.801	0.990
LAI	1.860	0.960	1.910	0.429	1.536	0.995	1.909	0.607	1.980	0.025
$T_{10}$	1.808	0.732	1.752	0.271	1.905	0.859	1.786	0.791	1.793	0.550
W	1.784	0.869	1.755	0.764	1.799	0.515	1.879	0.469	1.725	0.635
$R_s$	1.876	0.740	1.731	0.955	1.958	0.036	1.899	0.401	1.861	0.337



### 2.2.3 空间分布特征

图2为Kriging插值法绘制的土壤呼吸及其影响因子的空间分布。从中可以看出,  $R_s$  的空间分布较为复杂, 具有明显的斑块分布特征, 高值区主要分布在研究区中部和西部, 低值区主要分布在研究区东南部和东北部。TN和 $T_{10}$ 的分布规律与 $R_s$ 极为相似, 中部和西部值较高, 东南部和东北部值较低, 这与分维数

分析的结论一致。W的空间分布与 $R_s$ 在东北部较为相似, 西南较高, 具有明显的斑块分布特点。C/N、SOC、LAI的分布模式与 $R_s$ 较为不同, 高值区主要分布在研究区北部, 低值区主要在南部。以上分析表明,  $R_s$ 的空间分布格局与TN和 $T_{10}$ 的空间分布格局较为一致, 而与C/N、SOC、LAI的空间分布格局不同。

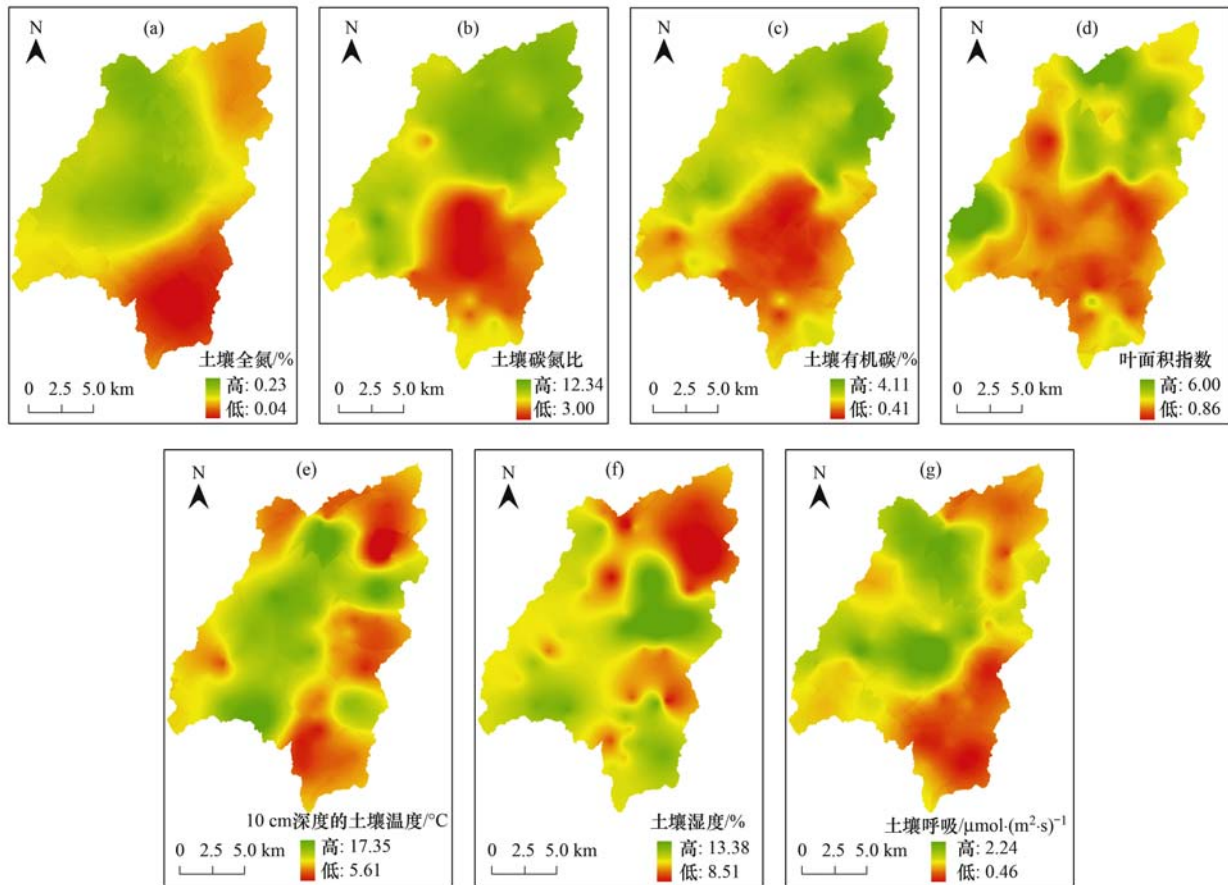


图2 土壤呼吸及其影响因子空间分布

Fig. 2 Spatial distribution maps of soil respiration and its influencing factors

### 2.3 合理采样数量的确定

表7是 $R_s$ 及其影响因子在不同置信水平与估计精度下的合理采样数目计算结果。从中可以看出,  $R_s$ 及其影响因子的变动系数越大, 所需要的取样数目也越大; 在同一置信水平下, 估计误差越大, 所需要的取样数目越小; 在估计精度相同条件下, 合理的取样数量随置信水平的增加而增加。

$R_s$ 及其影响因子中, LAI的变异系数最大为54.43%, W的变异系数最小仅为9.93% (表2), 因此在2个置信水平和4种估计精度下, 各指标采样数目大小依次为: LAI > SOC > TN >  $R_s$  > C/N >  $T_{10}$  > W; 各指标在95%置信水平下的采样数量要大于

在90%置信水平下取样数量, 如 $R_s$ 在90%置信水平下, 4个估计精度的取样数量仅需172、43、11、5, 而在95%置信水平下要分别达到247、62、16、8才能满足精度要求。以上分析表明,  $R_s$ 及其影响因子的采样数量随着置信水平和估计精度的增加而出现较大幅度的上升。

李世清等研究指出<sup>[28]</sup>, 式(1)中 $k$ 的取值由变异系数CV决定: ①CV < 10%时,  $k$ 取5%; ②10% ≤ CV < 20%时,  $k$ 取10%; ③20% ≤ CV < 30%时,  $k$ 取20%; ④CV > 30%时,  $k$ 取30%。根据表2, TN、C/N、SOC、LAI、 $T_{10}$ 、W、 $R_s$ 的变异系数分别为50.00%、34.69%、52.28%、54.43%、22.77%、

表 7 不同置信水平与估计精度下的合理采样数目

Table 7 Sample capacity under different confidence levels and estimated precisions

指标	95% 置信水平估计精度				90% 置信水平估计精度			
	95%	90%	80%	70%	95%	90%	80%	70%
TN	400	100	25	12	280	70	18	8
C/N	193	49	13	6	135	34	9	4
SOC	438	110	28	13	306	77	20	9
LAI	475	119	30	14	332	83	21	10
$T_{10}$	83	21	6	3	58	15	4	2
$W$	16	4	1	1	12	3	1	1
$R_s$	247	62	16	8	172	43	11	5

9.93%、39.22%，他们在研究区的合理取样数目在 95% 和 90% 置信水平下分别为 12、6、13、14、6、16、8 和 8、4、9、10、4、12、5。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤呼吸空间变异程度

土壤呼吸的空间变异性存在于各种空间尺度上,主要表现在群丛水平、景观水平、区域尺度和生物群系尺度<sup>[31]</sup>。要准确估算具有代表性的区域碳收支就必须分析土壤呼吸的空间变异程度。变异系数通常被用来简单地量化土壤呼吸的空间变异程度。

在群丛水平上,由于土壤本身具有很大的异质性,所以在此尺度上观测到的土壤呼吸存在空间的变异性。诸多研究表明土壤呼吸的变异系数介于 20%~60% 之间<sup>[4,13,14,32]</sup>,即属于中等变异性,少数研究指出土壤呼吸的变异系数超过 100%<sup>[35]</sup>,属于强变异性。如闫美芳等<sup>[13]</sup>研究发现新疆伊犁地区 2、7 和 12 年生杨树人工林的土壤呼吸空间变异系数分别为 28.8%、22.4%、19.6%;严俊霞等<sup>[32]</sup>研究指出华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异系数为 35.30%;Cambardella 等<sup>[33]</sup>对农田生态系统的土壤呼吸进行了研究,结果发现农田受到人类耕作的影响,其土壤呼吸的变异系数达 150%,属于强变异性。因而,在测定小尺度下的土壤呼吸时,要采用合理的取样方法,如分层抽样和随机取样等。

在区域尺度上,由于土壤特性、生物因子、土地利用管理方式等的交互影响作用,土壤呼吸表现出较大的空间变异性。秦璐等<sup>[10]</sup>对于干旱区艾比湖湿地的土壤呼吸进行连续一年的测定,研究发现土壤呼吸的空间变异系数为 167.37%;张义辉等<sup>[17]</sup>报道太原盆地 7、9 和 11 月的土壤呼吸变异系数分别为 42%、44% 和 59%。本研究中土壤呼吸的变异系数为 39.22%,与张义辉等<sup>[17]</sup>的研究结果较为一

致,而与秦璐等<sup>[10]</sup>的研究结果差异较大,主要原因在于时间尺度的不同。因此,要精确估测土壤呼吸,需要充分考虑其时空异质性,目前本研究仅是从空间尺度对土壤呼吸进行异质性分析,尚未考虑时间异质性对土壤呼吸造成的影响,有关土壤呼吸的时间异质性有待进一步地探讨。

#### 3.2 土壤呼吸空间变异的影响因子

在不同的空间尺度上,影响土壤呼吸空间变异性的主要因子不同。在区域尺度上,土壤呼吸是不同生态系统对气候、生物因子(如叶面积指数、生产力)、土壤条件等的交互影响下的产物。秦璐等<sup>[10]</sup>的研究表明,土壤有机碳是影响土壤呼吸空间变化的主要因素,土壤含水量对其空间分布影响不大;张义辉等<sup>[17]</sup>指出土壤水分是影响太原盆地土壤呼吸空间分布的主要因子。本研究结果表明,代表土壤底物供应因子和生物因子的主成分 1(TN、SOC 和 LAI)可以解释  $R_s$  空间变化的 51.07%,代表环境因子的主成分 2( $T_{10}$ )和主成分 3( $W$ )可以分别解释  $R_s$  空间变化的 20.54% 和 12.85%,3 个主成分累计可以解释  $R_s$  空间变异的 84.46%(表 4),与前人的研究结果相一致<sup>[32]</sup>。另一方面,影响土壤性质空间变异的原因可归结内在因素和外在因素两方面。内在因素是土壤性质空间变异的基础条件,主要包括母质、植被、气候、地形在内的结构性因子,外在因素是土壤性质空间相关性降低的主要原因,主要包括施肥、耕作在内的随机性因子<sup>[34]</sup>。本研究的结果显示,土壤呼吸的块金值与基台值的比值 [ $C_0/(C_0+C)$ ] 为 47.11%(表 5),反映了土壤呼吸在区域研究尺度上具有中等空间相关性,并且结构性因子和随机性因子共同影响土壤呼吸的空间变异,与前人的研究结果相一致<sup>[35]</sup>。

研究区土壤呼吸具有明显的空间异质性,高值区主要分布在研究区中部和西部,主要原因一是这些区域植被类型丰富,针阔叶混交林较多,林下有稠

密的草本植物覆盖,土壤碳氮含量高[图 2(a)~2(c)];二是该区域接近城镇中心,城镇景观优势度相对较高,人类对土壤生态过程的干扰程度大,加之此区域处于汀江周围,水分充足,土壤含水量高,从而使土壤呼吸表现出较高值.研究区的东南部为土壤呼吸的低值区,是因为该区域为水土流失严重区,长期的水土流失使得该区域植被盖度相对较低,土壤质地变差,土壤有机碳含量降低[图 2(c)].研究区东北部亦为土壤呼吸低值区,其可能原因是该区域位于高纬度区,纬度本身不是影响土壤呼吸的驱动因素<sup>[36]</sup>,但是它可以代表辐射、温度等多种因子的共同作用,进而影响土壤呼吸.因此,在忽略其他影响因子对土壤呼吸的差异性时,可以认为,研究区土壤温度高的区域亦是土壤呼吸高值区域.有研究指出,地形和年降水量也是影响区域尺度上土壤呼吸空间分布的重要因子<sup>[37]</sup>,本研究尚未考虑这两个因子与土壤呼吸空间分布之间的关系,主要是因为本文所选取的研究区年降水量丰富,区域间的差异度不大,而地形因子与纬度一样,不是直接影响土壤呼吸的驱动因素,而是通过影响土壤温度、土壤湿度的变化间接影响土壤呼吸空间分布.

尽管有许多研究表明土壤特性和生物量是区域尺度长时间范围内土壤呼吸空间变化的主要原因<sup>[10,38]</sup>,但是在短时间内的土壤呼吸的空间异质性主要与土壤温度有关.本研究中传统统计分析和地统计分析均表明土壤温度( $T_{10}$ )是土壤呼吸空间变异的主导因子,这可能与研究区植被覆盖率较高、降水量丰富、测定时的土壤温度大多在 $10^{\circ}\text{C}$ 左右有关.此外,本研究中,研究区土壤全氮(TN)与土壤呼吸呈显著正相关,这与严俊霞等<sup>[32]</sup>的研究结果相一致.土壤氮含量通过多种方式影响土壤呼吸,氮含量的不足会影响植物的生长、发育,氮含量可以通过影响生产力而间接影响土壤呼吸.添加氮可以刺激植物的初级生产,为土壤呼吸提供更多的底物,进而影响土壤呼吸.综上,研究区的土壤呼吸受到土壤温度、土壤全氮等多种因素的影响,有关区域尺度上土壤呼吸影响因子的相互作用机制研究工作,有待进一步的研究与验证.

### 3.3 土壤呼吸的合理采样数目

采样数目会影响土壤呼吸 Kriging 插值图的质量.一般而言,采样点的数量越多,土壤呼吸插值图越精确.然而,在野外测定土壤呼吸时,由于受到人力、物力及时间的限制,所能获取到的测量点数是有限的.因此,合理的取样策略对于土壤呼吸的精

确估计以及采样成本的降低具有重要意义.对于土壤呼吸 Kriging 插值图来说,稳定准确的半方差函数模型的构建是分析土壤呼吸空间变异的前提.Webster 等<sup>[39]</sup>指出,要获取稳定准确的半方差函数需要 50~100 个采样点,本研究的采样点(59 个)位于报道范围区间内.只有选择合理的样本容量,才可以比较准确地利用样本实测值来估计总体的相关参数.严俊霞等<sup>[32]</sup>认为在 95% 和 90% 置信水平精度在 90% 以上估算山西高原落叶松人工林的合理采样数量分别是 48 个和 34 个.李洪建等<sup>[4]</sup>报道了同样置信水平和精度条件下不同取样尺度的亚高山草甸土壤呼吸的合理取样数目取决于取样尺度,从 14~28 个和 10~20 个,并认为合理取样数目随着取样尺度的增大而增加.本研究表明,在 95% 和 90% 置信水平精度在 90% 以上的合理采样数目分别是 62 个和 43 个,均大于上述研究所报道的合理取样数量,主要原因在于上述研究是基于群丛水平,而本研究是在区域尺度上分析得来.以上结果对于研究区域尺度上土壤呼吸的合理采样数量具有一定参考意义,但要设计研究区具体的采样策略,如随机采样和均匀采样,有待进一步研究.

## 4 结论

(1)  $R_s$  及其影响因子均符合正态分布( $P_{K-S} > 0.05$ ),除  $W$  的空间变异属于弱变异外,其余各指标的空间变异均属于中等变异.

(2)  $R_s$  与  $T_{10}$  呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 TN 呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与 C/N、SOC、LAI、 $W$  相关性不显著( $P > 0.05$ ); TN、SOC 和  $T_{10}$  这 3 个因子可以解释  $R_s$  空间变化的 27%; 前 3 个主成分累计可以解释  $R_s$  空间变异的 84.46%.

(3)  $R_s$  具有中等程度的空间自相关性,结构因素和随机因素对其空间异质性影响作用相当; TN 和 C/N 具有中等程度的空间自相关性,结构性因素对其空间异质性起着主导作用; LAI 具有中等程度的空间自相关性,随机部分对其空间异质性起着主导作用; SOC、 $T_{10}$  和  $W$  具有高度的空间自相关性,结构性因素对其空间异质性起着主导作用;  $R_s$  及其影响因子变程范围处于 4 710~12 557 m.

(4)  $R_s$  的空间分布格局较为复杂,具有明显的斑块分布特征,高值区主要分布在研究区中部和西部,低值区主要分布东南部和东北部,其空间分布格局与 TN 和  $T_{10}$  较为一致,而与 C/N、SOC 和 LAI 不同.

(5)随着置信水平和估计精度的降低, $R_s$  及其影响因子的合理采样数目均出现不同程度的下降。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9** (1): 23-36.
- [ 2 ] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8** (12): 1205-1216.
- [ 3 ] Tang J W, Baldocchi D D. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(1): 183-207.
- [ 4 ] 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 等. 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4313-4320.
- Li H J, Gao Y F, Yan J X, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a subalpine meadow at different sampling scales [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4313-4320.
- [ 5 ] Wang X, Yan Y C, Zhao S, *et al.* Variation of soil respiration and its environmental factors in Hulunber meadow steppe [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(1): 1-4.
- [ 6 ] Moinet G Y K, Cieraad E, Hunt J E, *et al.* Soil heterotrophic respiration is insensitive to changes in soil water content but related to microbial access to organic matter [J]. *Geoderma*, 2016, **274**: 68-78.
- [ 7 ] Yim M H, Joo S J, Shutou K, *et al.* Spatial variability of soil respiration in a larch plantation; estimation of the number of sampling points required [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, **175**(1-3): 585-588.
- [ 8 ] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, *et al.* Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17** (4), doi: 10.1029/2003GB002035.
- [ 9 ] Eberwein J R, Oikawa P Y, Allsman L A, *et al.* Carbon availability regulates soil respiration response to nitrogen and temperature [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 158-164.
- [ 10 ] 秦璐, 吕光辉, 张雪妮, 等. 干旱区艾比湖湿地土壤呼吸的空间异质性[J]. *干旱区地理*, 2014, **37**(4): 704-712.
- Qin L, Lv G H, Zhang X N, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration at Ebinur Lake Wetland Nature Reserve in arid area [J]. *Arid Land Geography*, 2014, **37**(4): 704-712.
- [ 11 ] Su Y G, Huang G, Lin Y J, *et al.* No synergistic effects of water and nitrogen addition on soil microbial communities and soil respiration in a temperate desert [J]. *Catena*, 2016, **142**: 126-133.
- [ 12 ] Zeng X H, Zhang W J, Shen H T, *et al.* Soil respiration response in different vegetation types at Mount Taihang, China [J]. *Catena*, 2014, **116**: 78-85.
- [ 13 ] 闫美芳, 张新时, 周广胜. 不同树龄杨树 (*Populus balsamifera*) 人工林的土壤呼吸空间异质性[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(6): 1378-1384.
- Yan M F, Zhang X S, Zhou G S. Spatial heterogeneity of soil respiration in *Populus balsamifera* plantation at different developmental stages [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32** (6): 1378-1384.
- [ 14 ] 严俊霞, 李洪建, 李君剑. 庞泉沟自然保护区针阔混交林土壤呼吸的空间异质性[J]. *生态学报*, 2015, **35**(24): 8184-8193.
- Yan J X, Li H J, Li J J. Spatial heterogeneity of soil respiration in a conifer-broadleaf mixed forest in the Pangquangou Nature Reserve Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(24): 8184-8193.
- [ 15 ] F6ti S, Balogh J, Herbst M, *et al.* Meta-analysis of field scale spatial variability of grassland soil CO<sub>2</sub> efflux: interaction of biotic and abiotic drivers [J]. *Catena*, 2016, **143**: 78-89.
- [ 16 ] 赵维俊, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山青海云杉林群落结构的空间异质性 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26** (9): 2591-2599.
- Zhao W J, Liu X D, Jing W M, *et al.* Spatial heterogeneity of community structure of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(9): 2591-2599.
- [ 17 ] 张义辉, 李洪建, 荣燕美, 等. 太原盆地土壤呼吸的空间异质性[J]. *生态学报*, 2010, **30**(23): 6606-6612.
- Zhang Y H, Li H J, Rong Y M, *et al.* Study on spatial heterogeneity of soil respiration in Taiyuan Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(23): 6606-6612.
- [ 18 ] 王猛, 李贵才, 王军邦. 典型草原通量塔通量贡献区地上生物量和叶面积指数的时空变异 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(3): 637-643.
- Wang M, Li G C, Wang J B. Spatiotemporal variations of aboveground biomass and leaf area index of typical grassland in tower flux footprint [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(3): 637-643.
- [ 19 ] 郭晓伟, 骆士寿, 李意德, 等. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳密度空间分布特征 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(23): 7878-7886.
- Guo X W, Luo T S, Li Y D, *et al.* Spatial distribution characteristics of soil organic carbon density in a tropical mountain rainforest of Jianfengling, Hainan Island, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(23): 7878-7886.
- [ 20 ] 薛志婧, 马露莎, 安韶山, 等. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量 [J]. *生态学报*, 2015, **35** (9): 2917-2925.
- Xue Z J, Ma L S, An S S, *et al.* Soil organic carbon density and stock at the catchment scale of a hilly region of the loess plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(9): 2917-2925.
- [ 21 ] Kosugi Y, Mitani T, Itoh M, *et al.* Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **147**(1-2): 35-47.
- [ 22 ] Wu X G, Yuan J J, Ma S L, *et al.* Seasonal spatial pattern of soil respiration in a temperate urban forest in Beijing [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, **14**(4): 1122-1130.
- [ 23 ] F6ti S, Balogh J, Nagy Z, *et al.* Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland [J]. *Geoderma*, 2014, **213**: 245-254.
- [ 24 ] Buczko U, Bachmann S, Gropp M, *et al.* Spatial variability at different scales and sampling requirements for in situ soil CO<sub>2</sub>

- efflux measurements on an arable soil[J]. *Catena*, 2015, **131**: 46-55.
- [25] Prolingheuer N, Scharnagl B, Graf A, *et al.* On the spatial variation of soil rhizospheric and heterotrophic respiration in a winter wheat stand[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **195-196**: 24-31.
- [26] 谢锦升, 杨智杰, 曾宏达, 等. 侵蚀红壤植被恢复过程中土壤呼吸与土壤性质的关系[J]. *福建林学院学报*, 2009, **29**(4): 320-325.
- Xie J S, Yang Z J, Zeng H D, *et al.* Relationship between soil respiration and soil properties during the revegetation of eroded red soil in subtropics of China[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2009, **29**(4): 320-325.
- [27] 肖胜生, 熊永, 段剑, 等. 基于组分区分的南方红壤丘陵土壤呼吸对植被类型转换的响应[J]. *农业工程学报*, 2015, **31**(14): 123-131.
- Xiao S S, Xiong Y, Duan J, *et al.* Responses of soil respiration to vegetation type conversion in south hilly red soil based on main components [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(14): 123-131.
- [28] 李世清, 高亚军, 李生秀. 土壤养分的空间变异性及确定样本容量的研究[J]. *土壤与环境*, 2000, **9**(1): 56-59.
- Li S Q, Gao Y J, Li S X. Study on spatial variability of soil nutrient and determining number of sample [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, **9**(1): 56-59.
- [29] 张旭, 国庆喜. 地形对天然次生林空间格局的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2007, **35**(1): 68-70, 75.
- Zhang X, Guo Q X. Influence of topography on vegetation pattern in secondary forests[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, **35**(1): 68-70, 75.
- [30] 邵方丽, 余新晓, 杨志坚, 等. 天然杨桦次生林表层土壤水分与枯落物的空间异质性[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(3): 199-204.
- Shao F L, Yu X X, Yang Z J, *et al.* Spatial heterogeneity of topsoil moisture and litter lay in natural *Populus davidiana-Betula platyphylla* secondary forests [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(3): 199-204.
- [31] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- Luo Y Q, Zhou X H. Soil respiration and the environment[M]. Jiang L F, Qu L Y, Zhou Y M, *et al.*, trans. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [32] 严俊霞, 李洪建, 李君剑, 等. 山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1793-1801.
- Yan J X, Li H J, Li J J, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a planted larch forest in Shanxi Plateau [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1793-1801.
- [33] Cambardlla C A, Moorman T B, Parkin T B, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(5): 1501-1511.
- [34] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(4): 689-704.
- Wei S J, Luo B Z, Sun L, *et al.* Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(4): 689-704.
- [35] 孟春, 王立海, 沈微. 小兴安岭针阔混交林择伐6a后林地土壤呼吸速率空间变异性[J]. *东北林业大学学报*, 2011, **39**(3): 72-75.
- Meng C, Wang L H, Shen W. Spatial heterogeneity analysis of forest soil respiration rate in a conifer-broadleaved mixed forest in Xiaoxing'anling forest region six years after selective cutting[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, **39**(3): 72-75.
- [36] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests [J]. *Nature*, 2000, **404**(6780): 861-865.
- [37] McCulley R L, Burke I C, Nelson J A, *et al.* Regional patterns in carbon cycling across the Great Plains of North America[J]. *Ecosystems*, 2005, **8**(1): 106-121.
- [38] Litton C M, Ryan M G, Knight D H, *et al.* Soil-surface carbon dioxide efflux and microbial biomass in relation to tree density 13 years after a stand replacing fire in a lodgepole pine ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(5): 680-696.
- [39] Webster R, Oliver M A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties[J]. *Journal of Soil Science*, 1992, **43**(1): 177-192.

## CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation .....	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing .....	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing .....	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou .....	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	..... YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
<sup>13</sup> C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO <sub>2</sub> During Youth Olympic Games, Nanjing .....	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff .....	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations .....	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure .....	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions .....	..... LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds .....	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province .....	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake .....	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs .....	..... HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake .....	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi .....	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons .....	..... WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization .....	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake .....	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media .....	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example .....	..... LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin .....	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China .....	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics .....	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs .....	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation .....	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO <sub>2</sub> Using QCM-D and AFM .....	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling .....	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank .....	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Addition .....	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition .....	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield .....	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor .....	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits .....	..... WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) .....	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO <sub>2</sub> Emission from Soils of Summer-maize Field .....	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China .....	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis .....	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City .....	..... CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin .....	..... LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain .....	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots .....	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration .....	..... CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures .....	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake .....	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal .....	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes .....	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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  
赵进才 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12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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