

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 ..... 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 ..... 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 ..... 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 ..... 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM<sub>10</sub>可替代源成分谱的建立方法及其应用 ..... 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 ..... 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 ..... 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 ..... 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 ..... 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 ..... 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 ..... 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 ..... 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 ..... 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 ..... 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 ..... 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 ..... 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 ..... 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 ..... 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 ..... 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 ..... 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 ..... 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 ..... 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 ..... 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 ..... 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>对厌氧氨氧化污泥活性的影响 ..... 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 ..... 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N<sub>2</sub>O 产生量的影响 ..... 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 ..... 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 ..... 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 ..... 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 ..... 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 ..... 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 ..... 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 ..... 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 ..... 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 ..... 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 ..... 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 ..... 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 ..... 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 ..... 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 ..... 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 ..... 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 ..... 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N<sub>2</sub>O 产生的影响 ..... 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 ..... 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 ..... 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 ..... 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 ..... 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

# 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征

李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

**摘要:** 基于对 4 个取样尺度 (10、5、2.5、1.25 m) 下亚高山草甸土壤呼吸速率的观测, 对不同尺度土壤呼吸的空间变异特征进行了研究, 分析了不同尺度土壤全氮、有机碳、碳氮比、全硫、土壤温度和土壤水分对土壤呼吸空间异质性的影响, 并对各尺度不同置信水平与估计精度下的必要采样数量进行了计算. 结果表明: 除 1.25 m 和 2.5 m 尺度上土壤温度的空间变异属于弱变异外, 土壤呼吸及其相关因子的空间变异均属于中等变异, 土壤呼吸和土壤温度的变异系数随着取样尺度的增大而增大, 而土壤全氮、有机碳、全硫和土壤水分的变异系数随着取样尺度的增大均有减小的趋势; 不同取样尺度, 影响土壤呼吸的关键因子不同. 在 10 m 尺度, 土壤呼吸与土壤全氮、有机碳呈极显著正相关, 与土壤温度呈显著正相关, 与土壤全硫、碳氮比和土壤水分相关性不显著; 在 5 m 尺度, 与土壤全氮和有机碳呈极显著正相关, 与土壤全硫、碳氮比、土壤水分和土壤温度相关性不显著; 在 2.5 m 尺度, 与土壤有机碳、全氮和土壤水分呈极显著正相关, 与土壤全硫、碳氮比和土壤温度相关性不显著; 在 1.25 m 尺度, 与土壤全氮、有机碳和土壤水分呈极显著正相关, 与碳氮比呈显著负相关, 与土壤温度呈极显著负相关, 与土壤全硫相关性不显著. 随着取样尺度的减小, 土壤水分所起的作用逐渐增大, 相关系数从 0.27~0.49, 土壤温度与土壤呼吸的相关性由显著正相关向极显著负相关变化; 4 个取样尺度 95% 置信水平误差在 10% 和 20% 内必要采样数量分别为 28、21、18、14 个和 7、5、4、4 个, 随着取样尺度的减小, 必需的采样数量减少.

**关键词:** 取样尺度; 土壤因子; 土壤呼吸; 空间变异; 亚高山草甸

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4313-08 DOI: 10.13227/j.hjcx.2014.11.038

## Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales

LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, LI Jun-jian

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** At four different sampling scales (10, 5, 2.5 and 1.25 m) we measured soil respiration and the environmental factors affecting soil respiration in a subalpine meadow at Yundin mountain of Shanxi province. The purpose of the paper was to study the spatial heterogeneities of soil respiration and the environmental factors including soil temperature, soil moisture, total nitrogen, organic carbon, ratio of carbon and nitrogen, and total sulfur. Based on those measurements we analyzed the required sampling number at the four scales. The results showed that spatial variations of the soil respiration and environmental factors at all scales were in the middle range but for the soil temperature at 1.25 m and 2.5 m scales; and that the coefficients of variation in soil respiration and soil temperature increased with increasing sampling scale, but for total nitrogen, organic carbon, total sulfur and soil moisture the coefficients of variation decreased with increasing sampling scales. The environmental factors had different impacts on soil respiration at different sampling scales. Simple correlation analysis showed that at 10 m scale the relationship of soil respiration with total nitrogen ( $P < 0.01$ ), organic carbon ( $P < 0.01$ ) and soil temperature ( $P < 0.05$ ) was significant, but not with total sulfur, C/N and soil moisture; at 5 m sampling scale it was highly significant with total nitrogen, organic carbon, but not with total sulfur, C/N and soil moisture and soil temperature; at 2.5 m scale it was highly significant with total nitrogen, organic carbon and soil moisture, but not with total sulfur, C/N, and soil temperature; and at the smallest sampling scale it was highly significant with total nitrogen, organic carbon and soil moisture, negatively significant with C/N, and negatively significant with soil temperature, but not with total sulfur. The required sampling numbers for 10, 5, 2.5 and 1.25 m sampling scales within  $\pm 10\%$  and  $\pm 20\%$  of its actual mean at the 95% confidence level were 28, 21, 18, 14, and 7, 5, 4, 4, respectively. The results showed a decreasing trend of required sampling number with decreasing sampling scale.

**Key words:** sampling scale; environmental factors; soil respiration rate; spatial heterogeneity; subalpine meadow

陆地生态系统土壤呼吸是将土壤 C 传输到大气的的重要途径<sup>[1]</sup>, 由于土壤中 C 储量大约是大气 C 储量的 2 倍<sup>[2]</sup>, 土壤呼吸的微小变化都能引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的显著变化<sup>[3]</sup>. 土壤呼吸的精确测定是研究陆地生态系统碳循环和地球温暖化的关键问题之

一. 研究表明, 土壤呼吸具有较大的时空变异

收稿日期: 2014-04-18; 修订日期: 2014-06-13

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2012011033-5); 国家自然科学基金项目(41201374)

作者简介: 李洪建(1958~), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生态系统碳循环, E-mail: hongli@sxu.edu.cn

性<sup>[3-5]</sup>. 通常认为土壤温度和土壤水分是控制土壤呼吸季节变化的关键因子<sup>[6-9]</sup>, 在干旱半干旱区域, 由于土壤水分短缺使得土壤水分成为影响土壤呼吸的一个限制因子. 土壤呼吸在空间尺度上的变异与温度、水分条件、植被类型、土壤有机碳、凋落物、根系生物量和人为管理措施等因素有关<sup>[5, 10-15]</sup>. 诸多研究表明不同生态系统间土壤呼吸存在明显的空间变异, 即使在同一样地内土壤呼吸也具有明显的空间变异性<sup>[11-12, 15-18]</sup>, 如韩广轩等<sup>[12]</sup>发现在植株尺度上东北地区玉米农田的土壤呼吸存在着明显的空间异质性, 较高的土壤呼吸速率通常出现在靠近玉米根系的地方; Kosugi 等<sup>[18]</sup>指出东南亚热带雨林样地土壤呼吸速率的变异系数随着取样尺度的增加而增大, 土壤水分高的样点土壤呼吸值低. 土壤呼吸的空间变化给准确估计生态系统土壤呼吸带来困难<sup>[11, 19]</sup>. 因此准确估计一个生态系统土壤碳通量, 尤其是自然条件异质性较大的生态系统, 需要对土壤呼吸的异质性进行深入研究<sup>[5]</sup>. 忽视生态系统土壤呼吸的异质性可能低估或高估土壤 CO<sub>2</sub> 释放量. 较大的取样数量能够提高估计精度, 但是一般情况下受人力、物力和时间的限制在土壤呼吸的测量过程中选取的测量点是很有限制的. 因此, 必须清楚观测样地的必需样本容量, 但这方面的报道却很少<sup>[20-23]</sup>. 本研究通过观测不同取样尺度下亚高山草甸的土壤呼吸及其相关土壤因子, 试图阐明不同取样尺度的土壤呼吸空间变异特征, 分析不同尺度土壤呼吸空间变异性的关键影响因素, 并对各尺度不同置信水平与估计精度下的必要取样数量进行了计算, 以期能为土壤呼吸野外取样方案设计提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省吕梁山中麓的交城、方山、娄烦三县交界处的庞泉沟国家自然保护区, 地理位置 37°47'45"~37°55'50"N、111°22'33"~111°32'22"E 之间. 面积 10 443 hm<sup>2</sup>, 森林覆盖率 74%. 区内气候属寒温性气候, 夏季凉爽多雨, 冬季寒冷干燥, 年均温 3~4℃, 7 月均温 16.1℃, 1 月均温 -10.6℃, 年降水量 600~800 mm, 雨量集中在 6~9 月, 相对湿度 56%, 无霜期 92 d, 日均温 ≥10℃ 积温 2 100℃. 区内自然条件地带变化明显, 从低海拔到高海拔土壤类型依次为褐土、山地褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤、亚高山草甸土; 植被从山麓到山顶依次为

落叶阔叶林带(1 200~1 750 m)、针阔叶混交林带(1 750~2 200 m)、寒温性针叶林带(2 200~2 600 m)、亚高山灌丛草甸带(2 600~2 720 m)<sup>[24]</sup>.

### 1.2 试验地概况

试验样地位于庞泉沟自然保护区内的云顶山亚高山草甸内(地理位置为 37°53'08.5"N, 111°32'18"E, 海拔 2 700 m), 面积约 150 hm<sup>2</sup>. 植被组成以蒿草和多种草类为主, 主要生长的植物有白莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、莓叶萎陵菜(*Potentilla fragarionides*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)、车前(*Plantago asiatica*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、披针苔草(*Carex lanceolata*)、羊茅(*Festuca ovina*)、蒿草(*Kobresia bellardii*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、节节草(*Equisetum ramosissimum*)、野罂粟(*Papaver nudicaule*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、朝天萎陵菜(*Potentilla supina*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)等, 优势种群和群落的详细情况见文献[25~27]. 试验样地的土壤类型为亚高山草甸土, 土层厚度 15~20 cm, 它是冷湿气候条件下有机物残体不易分解的明显标志, 土壤表层有机质含量为 10%~15%.

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 取样方法

2009 年 6 月在云顶山亚高山草甸选取一块面积为 50 m × 50 m 的平坦样地, 在该样地内实行分级网格嵌套布点, 依据空间格局分析取样法和地统计学理论, 首先, 将 50 m × 50 m 样地等距离间隔划分为 25 个 10 m × 10 m 的网格, 以每个网格的顶点作为测量点和取样点, 共 36 个点. 然后依次在上一级样方的基础上划分 5 m × 5 m、2.5 m × 2.5 m 和 1.25 m × 1.25 m 的网格(图 1), 各 36 个. 样地内共布设不同尺度的取样点 144 个. 对每个样点进行编号并记录每个样点的空间相对坐标值.

#### 1.3.2 土壤呼吸测定和校正

用 Li-6400 便携式气体分析系统(Li-cor, Lincoln, NE, USA)和 Li-6400-09 土壤呼吸叶室测定土壤呼吸速率( $R_s$ ). 在每个取样点中各放置 1 个 PVC 环, 插入深度 3 cm 左右, 4 个尺度共安放 144 个. 为了减少安放 PVC 环对土壤呼吸的影响, 提前 1 d 将 PVC 环插入样点的土壤中, 并剪除测定点 PVC 环内地表植被, 以避免植物光合作用对土壤呼吸的影响, 尽量减少对测定点土壤的扰动. 测定于 2009 年 6 月 4 日早上 09:00 开始, 下午 16:00 结束.

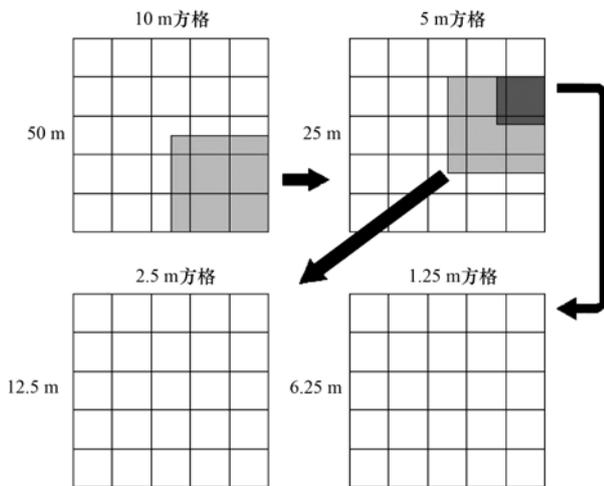


图1 样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

测定顺序依次为 10 m、5 m、2.5 m、1.25 m 网格的各样点。为减少由于测定时间的不同步引起的误差,对于 4 种尺度下重复坐标的样点进行重复测定。测定时,将气室紧密扣合到 PVC 环上,形成密闭气室。每个环测定 3 个循环,计算其平均值作为该测量点的土壤呼吸值。

前人研究表明土壤呼吸有明显的日变化,为了消除日变化对空间变异的叠加效应,笔者选择了与空间异质性测定时天气状况(都是晴朗无云的天气)较为一致的天气进行了日变化测定,测定于 2010 年 7 月 21 日 16:00 开始,间隔 1 h 测定一次,7 月 22 日 18:00 结束,共测定 25 次。利用日变化的研究结果(图 2、3)对空间异质性测定的数据予以校正(详见 2.1 节)。校正方法为:根据实测的结果,计算出每小时实测的土壤呼吸值和土壤温度与 24 h 平均值的比率,而后将空间异质性对应时段测定的土壤呼吸速率值和土壤温度值除以日变化测定对应时段的比率,所得的值即为该样点的土壤呼吸速率

和土壤温度值。在校正的基础上再进行空间异质性分析。

### 1.3.3 环境因子测定

用 Li-6400 自带的土壤温度探针测定 5、10、15 cm 深度的土壤温度( $T_5$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{15}$ )。0~10 cm 深度的土壤含水量(SWC)用土钻法测定。在每个样点土壤呼吸测定完成后,用土钻取 PVC 环中 0~10 cm 深度的土样,装入塑料封口袋,带回实验室,一部分用于测定土壤水分,剩余部分将其自然风干,过 2 mm 土壤筛,用于分析土壤全氮、有机碳和全硫。土壤全氮(TN)和全硫(TS)使用 vario MACRO cube 元素分析仪(德国)测定,土壤有机碳(SOC)用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定,碳氮比( $\text{SOC}/\text{TN}$ ) = 有机碳/全氮。

### 1.4 数据统计分析

用单样本柯尔莫哥洛夫-斯米洛夫(One-sample Kolomogorov-Semirnov, K-S)检验数据是否符合正态分布;采用一维方差(one-way ANOVA)分析在 4 种取样尺度下土壤呼吸速率及土壤因子均值差异的显著性;运用相关分析方法分析土壤理化因子、环境因子与土壤呼吸速率的相关关系。所有的数据分析基于统计分析软件 SPSS 17.0 完成,所有图件利用 Sigmaplot 10.0 绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸和土壤温度的日变化

图 2 为 2010 年 7 月亚高山草甸土壤呼吸和环境因子的日变化趋势。从中可以看出  $T_5$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{15}$  都具有明显的日变化特点,1 d 中这些温度的最低值出现在 06:00 左右,最高值出现在 14:00 左右。 $T_5$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{15}$  的平均值分别为  $15.34 \pm 2.75$  (SD)、 $14.72 \pm 1.99$  和  $14.03 \pm 1.15$ ,测定深度越深,温度越低。 $T_5$ 、 $T_{10}$  和  $T_{15}$  的变异系数依次为 18.3%、13.8%、

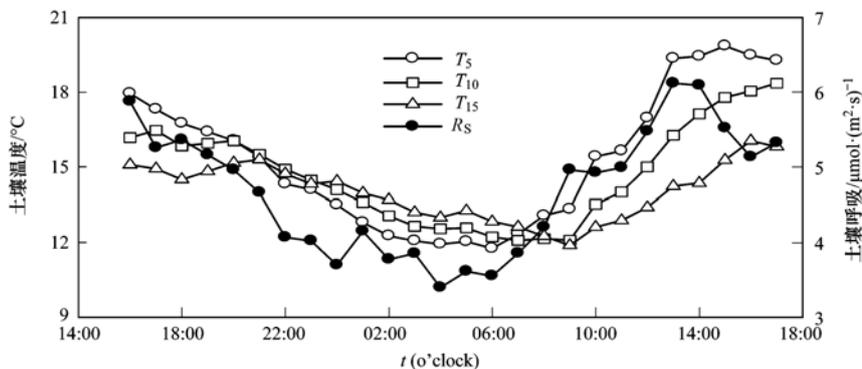


图2 亚高山草甸土壤呼吸及其环境因子的日变化

Fig. 2 Diurnal changes of soil respiration and environmental factors

8.3%,随测定深度增加,变异系数减小.与温度的日变化趋势相一致, $R_s$ 的日变化曲线呈单峰形式,最大值出现在13:00~16:00之间,最低值出现在04:00~06:00之间.与24 h测定的平均值相比较(图3),21:00~次日08:00之间土壤呼吸值低于日平均值,09:00~21:00的土壤呼吸值大于平均值,误差在 $\pm 10\%$ 以内的时段为08:00~11:00和19:00~21:00.

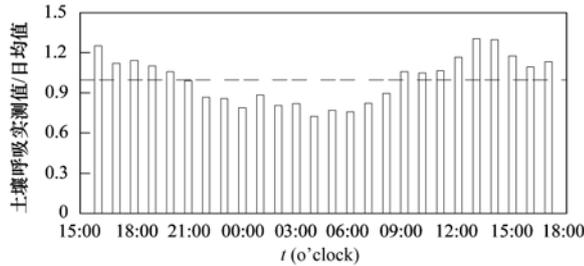


图3 土壤呼吸日变化实测值与24 h平均值(虚线)的比率的日变化

Fig. 3 Diurnal changes of proportion of the measured values and daily mean value (dashed line)

## 2.2 不同尺度下土壤呼吸的空间变异

利用校正后的数据分析不同取样尺度下土壤呼吸及其相关因子的空间变异性,结果见表1.从中可以看出,除1.25 m和2.5 m取样尺度上土壤温度的空间变异属于弱变异外,土壤呼吸及其相关因子的空间变异均属于中等变异.土壤呼吸和土壤温度的变异系数随着取样尺度的增大而增大,变异系数分别为19.10%~26.97%和6.97%~16.65%.土壤全氮、有机碳、全硫和土壤水分的变异系数均随着取样尺度的增大有减小的趋势,分别为15.93%~11.68%、13.32%~10.25%、26.56%~15.29%和12.18%~10.18%.表明土壤全氮、有机碳、全硫和土壤水分在较小的取样尺度上空间变异较大,而土壤呼吸在较大的取样尺度上空间变异较大.单因素方差分析结果表明:4个尺度土壤呼吸速率和土壤碳氮比差异不显著( $P > 0.05$ ),土壤全氮基本显著( $P = 0.067$ )、土壤有机碳和土壤全硫差异显著( $P < 0.05$ )、土壤水分和土壤温度差异极显著( $P < 0.01$ ).

表2 不同尺度下土壤呼吸与土壤因子的相关系数<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficients between soil respiration and controlling factors at different measuring scale

尺度/m	SOC	TN	TS	SOC/TN	SWC	$T_5$	$T_{10}$	$T_{15}$
10.0	0.55**	0.60**	0.01	-0.17	0.27	0.32	0.33*	0.40*
5.0	0.66**	0.45**	0.08	-0.11	0.30	-0.11	-0.12	-0.07
2.5	0.58**	0.48**	0.22	0.23	0.46**	0.09	0.12	-0.03
1.25	0.82**	0.86**	0.14	-0.37*	0.49**	-0.49**	-0.48**	-0.46**

1) \*表示相关性在0.05的显著水平; \*\*表示相关性在0.01的显著水平

表1 土壤呼吸及其相关因子的平均值、标准差和变异系数  
Table 1 Summary of mean, standard deviation and coefficient of variation of soil respiration and controlling factors

土壤指标	尺度/m	平均值	标准差	变异系数/%
土壤呼吸/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	10.0	6.69	1.81	26.97
	5.0	6.97	1.64	23.52
	2.5	7.47	1.61	21.48
	1.25	7.30	1.39	19.10
全氮/%	10.0	0.68	0.09	13.42
	5.0	0.69	0.08	11.68
	2.5	0.72	0.09	12.92
有机碳/%	1.25	0.66	0.11	15.93
	10.0	7.11	0.73	10.25
	5.0	7.47	0.84	11.31
全硫/%	2.5	7.58	1.01	13.26
	1.25	6.97	0.93	13.32
	10.0	0.09	0.01	15.29
土壤水分/%	5.0	0.10	0.02	19.47
	2.5	0.11	0.02	22.35
	1.25	0.11	0.10	26.56
10 cm 土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$	10.0	32.60	3.69	11.33
	5.0	31.92	3.25	10.18
	2.5	31.95	3.71	11.61
	1.25	29.17	3.55	12.18
10 cm 土壤温度/ $^{\circ}\text{C}$	10.0	18.29	3.04	16.65
	5.0	19.45	2.23	11.48
	2.5	18.06	1.26	6.97
	1.25	19.42	1.72	8.87

## 2.3 土壤呼吸空间变异的影响因子

相关分析表明(表2),4个取样尺度下土壤呼吸速率与土壤全氮和有机碳均呈极显著正相关,相关系数分别介于0.45~0.86和0.55~0.82之间;与碳氮比除在1.25 m尺度上呈显著负相关外,其余3个取样尺度相关关系都不显著;在10 m和5 m尺度上,土壤呼吸速率与土壤水分相关不显著,而在2.5 m和1.25 m尺度上呈极显著正相关,相关系数分别为0.46和0.49;除2.5 m和5 m尺度外土壤呼吸速率与3种不同深度的土壤温度呈显著相关,不同的是,10 m尺度与 $T_{10}$ 和 $T_{15}$ 呈显著正相关,与 $T_5$ 呈正相关但不显著,1.25 m尺度与3种深度的温度呈极显著负相关;4个取样尺度下土壤呼吸速率与土壤全硫相关关系均不显著(表2).

## 2.4 必要采样数量的确定

采用科学的抽样方法是准确估算土壤碳通量的基础. 为了更好地估计各参数的均值(或期望值), 并有足够的可靠性和精度, 则必须合理确定取样数或观测数目. 首先对土壤呼吸数据进行正态检验, 取显著性水平  $\alpha = 0.05$ . 检验表明, 4 个尺度土壤呼吸  $P_{K-S}$  均大于 0.05, 服从正态分布, 然后用以下公式进行合理采样数目的估算:

$$n = (T \times CV)^2 / k^2 \quad (1)$$

式中,  $n$  代表必要的样本容量;  $T$  表示  $t$  分布特征值, 由显著性水平  $\alpha$  和自由度  $df = n - 1$  查  $t$  分布表确定;  $CV$  是样本变异系数;  $k$  代表实验允许的误差(在此分别取 5%、10%、15%、20%)<sup>[23]</sup>.

根据公式(1), 求出了在 95% 和 90% 两个置信水平, 5%、10%、15% 和 20% 的估计误差内土壤呼

吸所必要的采样数量(表 3). 由表 3 可知, 当估计误差相同时, 各个尺度必要采样数量随着置信水平降低而减少, 95% 置信水平必要的样本数量高于 90% 置信水平的; 当置信水平相同时, 估计误差越大, 必要样本容量越少; 在同一置信水平和同一估计误差下, 随着取样尺度的减小, 必要采样数量减少; 在同一尺度、同一置信水平下, 必要采样数量随着相对误差的不断增大而不断减少. 研究表明,  $k$  的取值基本上由  $CV$  决定. 当  $CV < 10\%$ 、 $CV = 10\% \sim 20\%$ 、 $CV = 20\% \sim 30\%$  和  $CV > 30\%$  时,  $k$  值分别取 5%、10%、20% 和 30%<sup>[28, 29]</sup>. 根据表 1, 4 个尺度土壤呼吸的变异系数分别为 26.97%、23.52%、21.48% 和 19.10%, 因此本研究样地的必要采样数量在 95% 和 90% 置信水平下分别为 7、5、4、6 和 5、4、3、4.

表 3 不同置信水平与估计精度下必要采样数量

尺度/m	95% 置信水平估计精度				90% 置信水平估计精度			
	95%	90%	85%	80%	95%	90%	85%	80%
10.0	111	28	12	7	79	20	9	5
5.0	85	21	9	5	60	15	7	4
2.5	71	18	8	4	50	13	6	3
1.25	56	14	6	4	40	10	4	3

## 3 讨论

### 3.1 土壤呼吸的空间变异程度

在不同的空间尺度上土壤呼吸都具有较大的空间变异性(表 4), 诸多研究指出土壤呼吸的变异系数介于 20% ~ 50% 之间<sup>[6, 10, 15, 19, 23]</sup>, 甚至有的研究显示超过 100%. 如 Fang 等<sup>[5]</sup> 在佛罗里达种植园测定的土壤呼吸变异系数为 55%; Xu 等<sup>[19]</sup> 的研究表明, 土壤呼吸的变异系数在 30% 左右; Russell 等<sup>[30]</sup> 在一个成熟的白桦林内, 沿一条 40 m 的取样线, 每 2 ~ 4 m 间隔取样一次, 发现土壤呼吸的变异系数在 16% ~ 45% 之间; 闫美芳等<sup>[17]</sup> 报道新疆 2、7 和 12 年生杨树人工林的空间变异系数平均为 28.8%、22.4% 和 19.6%; 韩广轩等<sup>[12]</sup> 对玉米农田土壤呼吸测定的空间变异系数在 27% ~ 72% 之间; Yim 等<sup>[20]</sup> 在日本一个落叶松人工林 30 m × 30 m 样地中用碱液吸收法同步测定了 50 个样点的土壤呼吸速率, 得出土壤呼吸的变异系数为 28%, 认为空间变异系数与叶室覆盖的面积有关; Adachi 等<sup>[22]</sup> 对马来西亚 4 种森林生态系统土壤呼吸研究后得出变异系数介于 40% ~ 45%; Rodeghiero 等<sup>[23]</sup> 采用分层取样法得出高山草甸土

壤呼吸的变异系数为 19%; Chen 等<sup>[31]</sup> 认为典型温带草原的空间变异系数为 33%. 另外, 也有研究报道土壤呼吸的空间变异程度随着取样间距的变化而变化, 如 Rayment 等<sup>[8]</sup> 报道当取样尺度大于 1 m 时土壤呼吸的空间变异随着取样间距的增大而增大, 但增大的幅度并不大; Kosugi 等<sup>[18]</sup> 采用分级网格嵌套布点对东南亚热带雨林 50 m × 50 m 样地的研究表明, 土壤呼吸速率的空间变异随着采样尺度的增大而增大. 本研究中土壤呼吸的变异系数随着取样尺度的增大而增大, 从 19.10% ~ 26.97%, 在报道的范围内. 土壤呼吸的空间变化对准确估算区域土壤呼吸带来极大困难, 进行多尺度的土壤呼吸测定, 了解不同尺度下土壤呼吸与环境因子的关系非常重要<sup>[39]</sup>.

### 3.2 影响土壤呼吸空间变异性的主要因子

在不同的空间尺度上影响土壤呼吸变异性的关键因子不同. 在全球尺度上, 不同生物群落的土壤呼吸与温度、降水量、NPP 之间有着显著的线性关系<sup>[7]</sup>. Martina 等<sup>[15]</sup> 认为: 土壤呼吸的空间变异在 0 ~ 1 m 尺度上, 主要受根系和凋落物的影响; 在 1 ~ 10 m 尺度上, 主要受根系生物量、土壤碳/氮含量、根系含氮量的影响; 在景观尺度上, 地形是主导因

子. Fang 等<sup>[5]</sup>认为,生物量的大小控制土壤呼吸的空间分布,而温度和水分的作用相对较小; Xu 等<sup>[19]</sup>的研究表明,土壤呼吸的空间变化与根系和微生物生物量、土壤的理化性质、土壤温度、土壤水分等因素有关. 本研究表明,在 10 m 尺度,土壤呼吸与土壤全氮和有机碳呈极显著正相关,与土壤温度呈显著正相关,与土壤全硫、碳氮比和土壤水分相关不显著;在 5 m 尺度,与土壤全氮和有机碳呈极显著正相关,与土壤全硫、碳氮比、土壤温度和

土壤水分相关性不显著;在 2.5 m 尺度,与土壤碳氮含量和土壤水分呈极显著正相关,与土壤全硫、碳氮比和土壤温度相关性不显著;在 1.25 m 尺度,与土壤碳氮含量和土壤水分呈极显著正相关、与碳氮比呈显著负相关、与土壤温度呈极显著负相关,与土壤全硫相关性不显著. 可以看出,随着取样尺度的变化,土壤温度和土壤水分所起的作用发生了相应的变化,这主要可能是微地形和植被盖度不同引起的差异造成的.

表 4 不同生态系统土壤呼吸变异系数

Table 4 List of coefficient variation in different ecosystems

序号	研究地点	植被类型	测定方法	变异系数/%	文献
1	美国	橡树林	Li-6200	28 ~ 42	[10]
2	美国	种植园	Li-Cor 6252	55	[5]
3	美国	黄松人工林	Li-6400-09	30	[19]
4	加拿大	白桦林	Li-6400-09	16 ~ 45	[30]
5	中国新疆	2、7 和 12 年生杨树人工林	Li-6400-09	19.6 ~ 28.8	[17]
6	中国锦州	玉米农田	Li-6400-09	27 ~ 72	[12]
7	日本	落叶松人工林	碱液吸收法	28	[20]
8	马来西亚	4 种森林生态系统	Li-6400-09	40 ~ 45	[22]
9	意大利	高山草甸	Li-6400-09	19	[23]
10	中国内蒙古	典型温带草原	碱液吸收法	33	[31]

本研究中 4 个取样尺度下土壤呼吸与土壤全氮、有机碳都呈极显著正相关. 土壤中氮元素的不足会影响植物的光合作用,其含量的变化会影响土壤微生物的活性,进而影响土壤呼吸. 氮的有效性也能影响细根生物量. 当给温带木本植物添加大量的速效氮后细根生物量会急剧增加,而添加无机氮后根冠比急剧降低<sup>[32]</sup>. 土壤有机质含量是微生物进行分解活动排放 CO<sub>2</sub> 的物质基础,对土壤呼吸来说至关重要. 微生物种群和土壤呼吸强度受到土壤中易分解有机质的影响,当土壤中的有机质含量、根系生物量、微生物活性增加时,其土壤呼吸速度就会显著增加<sup>[33]</sup>. 在样地尺度内,大量的研究表明森林生态系统土壤呼吸的空间异质性与土壤碳氮含量密切相关<sup>[6, 19, 34, 35]</sup>. 在区域尺度上,陈书涛等<sup>[13]</sup>指出,土壤有机碳含量、有效磷含量及胸径拟合的方程可解释森林生态系统土壤呼吸 92.8% 的空间变异性; Chen 等<sup>[31]</sup>认为,中国北部 8 个温带草原生态系统的年均土壤呼吸速率与土壤有机碳、全氮和黏粒含量呈显著正相关,与土壤容重和沙粒含量呈显著负相关;李明峰等<sup>[36]</sup>指出内蒙古锡林河流域 4 种草原群落样地土壤有机碳、全氮含量与土壤呼吸有极显著相关关系. 但也有研究表明不同生态系统的土壤呼吸与样地碳氮含量的相关性并不显著<sup>[37, 38]</sup>. 碳氮比也是影响土壤呼吸空间分布的一个

因素,本研究中土壤呼吸的空间变异与碳氮比仅在 1.25 m 取样尺度下呈显著负相关,与 Allaire 等<sup>[39]</sup>的研究结果相一致.

温度、降水一方面直接影响土壤中根系和微生物的呼吸速率,另一方面通过影响植物、微生物生长以及土壤条件从而间接影响土壤呼吸. 有报道指出土壤呼吸的空间变化与土壤水分呈正相关<sup>[40]</sup>、与土壤温度呈负相关<sup>[39, 41]</sup>. 本研究中,4 种取样尺度下土壤呼吸与土壤水分的相关系数分别为 0.27、0.30、0.46、0.49,随着取样尺度的减小,土壤水分所起的作用逐渐增大;而土壤温度与土壤呼吸的相关性随着取样尺度的减小,由正相关向负相关变化,在 10 m 尺度上与 10、15 cm 深度的土壤温度呈显著正相关,在 5 m 尺度上呈负相关但不显著,在 2.5 m 尺度上都不显著,在 1.25 m 尺度上与 3 种不同深度的温度都呈极显著负相关. 土壤温度和土壤呼吸呈负相关,可能是因为该样地受到放牧和旅游活动的破坏,样地植被分布不均,植物种类分布状况对土壤水分有一个再分配过程,引起土壤水分在空间分布上的离散和富集,导致了土壤水分的空间分布具有明显的斑块分布特点<sup>[42]</sup>,而且在采样期间亚高山草甸正值旅游高峰,土壤容易受到踩踏而板结,从而影响土壤对水分的吸收. 土壤水分通过对土壤温度的制冷效应从而间接影响土壤呼吸<sup>[11, 41]</sup>.

### 3.3 必要取样数量

土壤呼吸具有较高的空间变异性, 精确估计样地的土壤呼吸值通常需要较多的取样数量。然而, 利用叶室法测定土壤呼吸时, 受人力、物力和时间的限制测量点的数量是有限的。许多研究使用 10 个或少于 10 个取样点样本均值来代替总体均值, 而且大多研究的取样方案都是随机取样。利用样本均值来代替样地土壤呼吸值可能会有较大的误差, 只有选择合适的样本容量, 才能比较准确地通过样本观察值来估计总体的相关参数。Yim 等<sup>[20]</sup>认为在 95% 置信水平误差在 10% 和 20% 内估算日本落叶松人工林土壤呼吸的必要取样数量分别为 30 个和 8 个, 并指出必要取样数量与叶室覆盖的面积和测定方法有关, 较大的叶室需要较少的取样数量、较小的叶室需要较多的取样数量, 利用碱液吸收法测定土壤呼吸时计算的必要取样数量低于实际需要的取样数量。Davidson 等<sup>[21]</sup>报道了在同样的置信水平和误差下温带针阔混交林土壤呼吸的必要采样数量分别为 41 个和 10 个, 认为必要采样数量与土壤呼吸的空间变异程度和叶室覆盖的面积有很大关系; Adachi 等<sup>[22]</sup>对马来西亚 4 种森林生态系统研究后得出土壤呼吸的必要取样数目取决于土壤呼吸的空间变异程度, 从 67 ~ 85 个和 17 ~ 21 个。本研究表明, 4 个取样尺度 95% 置信水平误差在 10% 和 20% 内必要采样数量分别为 28、21、18、14 个和 7、5、4、4 个, 略低于上述研究所报道的必要采样数量, 可能与样地的植被类型和气候条件有关。本实验所观测的对象为亚高山草甸, 与森林生态系统相比, 草甸的土壤因子、根系生物量分布及其它影响土壤呼吸的因子的空间异质性相对较小, 而且本样地属寒温带性气候, Adachi 等<sup>[22]</sup>认为热带地区所需的采样数量高于温带地区的。随着取样尺度的减小, 必要采样数量减少, 可能是因为土壤呼吸受多种因素的综合作用, 尺度越小土壤呼吸的空间变异越小所导致的。

## 4 结论

(1) 4 个尺度下, 土壤呼吸和土壤温度的变异系数随着取样尺度的增大而增大, 而土壤全氮、有机碳、全硫和土壤水分的变异系数均随着取样尺度的增大而减小的趋势。表明土壤全氮、有机碳、全硫、土壤水分在较小的取样尺度上空间变异较大, 而土壤呼吸在较大的取样尺度上空间变异较大。

(2) 4 个尺度下土壤呼吸速率、土壤碳氮比差

异不显著 ( $P > 0.05$ ), 土壤全氮基本显著 ( $P = 0.067$ )、土壤有机碳、土壤全硫差异显著 ( $P < 0.05$ )、土壤水分和土壤温度在 4 个尺度上差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

(3) 在较大的尺度上土壤呼吸的空间变异性主要受土壤全氮、有机碳和土壤温度的影响, 而在较小的尺度上则受土壤全氮、有机碳和土壤温度、土壤水分的共同影响。

(4) 4 个取样尺度 95% 置信水平误差在 10% 和 20% 内必要采样数量分别为 28、21、18、14 和 7、5、4、4 个, 随着取样尺度的减小, 必要采样数量减少。

### 参考文献:

- [1] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems-recent progress and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 141-153.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.
- [3] 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.
- [4] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond  $Q_{10}$  [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 154-164.
- [5] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* Soil  $CO_2$  efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation[J]. *Plant and Soil*, 1998, **205**(2): 135-146.
- [6] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(2): 217-227.
- [7] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [8] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil  $CO_2$  efflux in a Canadian boreal forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(1): 35-45.
- [9] Li H J, Yan J X, Yue X F, *et al.* Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**(3): 490-503.
- [10] Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A, *et al.* Seasonal and topographic patterns of forest floor  $CO_2$  efflux from an upland oak forest[J]. *Tree Physiology*, 1993, **13**(1): 1-15.
- [11] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil  $CO_2$  efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**(3): 199-209.
- [12] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J]. *生态学报*, 2007,

- 27(12): 5254-5261.
- [13] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1017-1025.
- [14] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 2010, **464**(7288): 579-582.
- [15] Martina J G, Bolstad P V. Variation of soil respiration at three spatial scales: Components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(3): 530-543.
- [16] Vincent G, Shahriari A R, Lucot E, *et al.* Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(9): 2527-2535.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(6): 667-677.
- [20] 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.
- [21] Davidson E A, Savage K, Verchot L V, *et al.* Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113**(1-4): 21-37.
- [22] Adachi M, Bekku Y S, Konuma A, *et al.* Required sample size for estimating soil respiration rates in large areas of two tropical forests and of two types of plantation in Malaysia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **210**(1-3): 455-459.
- [23] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**(1): 106-112.
- [24] 马子清. 山西植被 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. 185-280.
- [25] 李素清, 杨斌盛, 张金屯. 山西云顶山亚高山草甸优势种群和群落的格局分析 [J]. *应用与环境生物学报*, 2007, **13**(1): 9-13.
- [26] 李斌, 李素清, 张金屯. 云顶山亚高山草甸优势种群生态位研究 [J]. *草业学报*, 2010, **19**(1): 6-13.
- [27] 卢爱英, 张先平, 王世裕, 等. 干扰对云顶山亚高山草甸群落物种多样性的影响 [J]. *植物研究*, 2011, **31**(1): 73-78.
- [28] 杨清云, 曾锋. 森林土壤空间变异性及其样本容量的确定 [J]. *水土保持研究*, 2004, **11**(3): 54-56.
- [29] 曾锋, 张金池, 朱丽娟. 下蜀栎林土壤空间变异性及其样本容量的确定 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2005, **29**(2): 51-53.
- [30] Russell C A, Voroney R P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1998, **78**(2): 301-310.
- [31] Chen Q S, Wang Q B, Han X G, *et al.* Temporal and spatial variability and controls of soil respiration in a temperate steppe in northern China [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, **24**(2): doi: 10.1029/2009GB003538.
- [32] Rasse D P. Nitrogen deposition and atmospheric CO<sub>2</sub> interactions on fine root dynamics in temperate forests: a theoretical model analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(5): 486-503.
- [33] Bazzaz F A, Williams W E. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations within a mixed forest: Implications for seedling growth [J]. *Ecology*, 1991, **72**(1): 12-16.
- [34] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(11-12): 1625-1635.
- [35] Saiz G, Green C, Butterbach-Bahl K, *et al.* Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands [J]. *Plant and Soil*, 2006, **287**(1-2): 161-176.
- [36] 李明峰, 董云社, 耿元波, 等. 草原土壤的碳氮分布与 CO<sub>2</sub> 排放通量的相关性分析 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 7-11.
- [37] 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): 1104, doi: 10.1029/2003GB002035
- [38] 施政, 汪家社, 何容, 等. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子 [J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(4): 563-568.
- [39] Allaire S E, Lange S F, Lafond J A, *et al.* Multiscale spatial variability of CO<sub>2</sub> emissions and correlations with physico-chemical soil properties [J]. *Geoderma*, 2012, **170**: 251-260.
- [40] Graf A, Herbst M, Weihermüller L, *et al.* Analyzing spatiotemporal variability of heterotrophic soil respiration at the field scale using orthogonal functions [J]. *Geoderma*, 2012, **181-182**: 91-101.
- [41] Fóti 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.
- [42] 严俊霞, 李君剑, 李洪建, 等. 亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3992-3999.

## CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb .....	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility .....	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013 .....	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter .....	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM <sub>10</sub> .....	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer .....	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region .....	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds .....	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen .....	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake .....	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake .....	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet .....	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an .....	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff .....	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality .....	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process .....	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process .....	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein .....	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution .....	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor .....	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions .....	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress .....	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> .....	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration .....	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe <sup>2+</sup> and Fe <sup>3+</sup> on the Activity of ANAMMOX .....	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N <sub>2</sub> O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge .....	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique .....	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil .....	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil .....	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle .....	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils .....	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis( <i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols .....	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator .....	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales .....	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years .....	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI <sub>Ac</sub> Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity .....	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables .....	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells .....	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals .....	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char .....	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer .....	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N <sub>2</sub> O Releases from Bioreactor Landfill .....	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth .....	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta .....	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation .....	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon .....	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行