

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苳的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性

严俊霞, 李洪建*, 李君剑, 武江星

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要: 基于对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林样地3个取样尺度(4、2、1 m)土壤呼吸(R_s)及其影响因子的观测, 运用传统和地统计学的方法分析了 R_s 的空间变异性及其与影响因子之间的内在联系。传统统计分析表明: R_s 及其它相关因子的空间变异均属于中等变异; R_s 与10 cm、15 cm深度的土壤温度(T_{10} 、 T_{15})和全氮(N)呈极显著正相关($P < 0.01$), 与凋落物含水量(L_w)呈显著正相关($P < 0.05$), 与碳/氮比(C/N)呈显著负相关($P < 0.01$), 与5 cm深度的土壤温度(T_5)、土壤水分(W_s)、凋落物量(L_v)和全碳(C)相关性不显著($P > 0.05$); 多元逐步回归分析表明: L_m 、 T_{10} 、N和 W_s 这4个因子能解释土壤呼吸空间变化的36%。地统计学分析表明: R_s 具有中等程度的空间自相关性, 随机部分引起的空间异质性占39.5%, 结构因素占60.5%, 气候、地形、土壤等结构因素起着主导作用; 不同土壤指标的变程不相同, R_s 和 T_{10} 的变程差异不大, 在25 m左右; 土壤各指标的半方差大小依次为: $L_w(1.95) > C/N(1.91) > N(1.91) > C(1.89) > R_s(1.78) > L_m(1.77) > W_s(1.69) > T_{10}(1.42)$ 。 R_s 的空间分布模式与 T_{10} 、 L_m 、C和N的空间分布模式较为一致, 而与 W_s 、C/N比的空间分布模式不同; 在同一置信水平和估计精度下, 不同土壤指标的必要采样数量不相同, 取决于该指标的空间变异程度。

关键词: 土壤呼吸; 空间特征; 半方差函数; 落叶松人工林; 庞泉沟自然保护区

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1793-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.039

Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau

YAN Jun-xia, LI Hong-jian*, LI Jun-jian, WU Jiang-xing

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

Abstract: Based on the data from a planted larch forest in Panquangou Natural Reserve of Shanxi Province, at three sampling scales (4, 2, and 1 m, respectively), soil respiration (R_s) and its affecting factors including soil temperature at 5 cm (T_5), 10 cm (T_{10}), and 15 cm (T_{15}) depths, soil water content (W_s), litter mass (L_w), litter moisture (L_m), soil total carbon (C), and soil total nitrogen (N) were determined. The spatial heterogeneities of R_s and the environmental factors were further analyzed and their intrinsic correlations were established. The results of traditional statistics showed that the spatial variations of R_s and the all measured factors were in the middle range; R_s were highly significantly positively correlated with T_{10} , T_{15} , and N ($P < 0.01$); significantly positively correlated with L_m ($P < 0.05$); highly significantly negatively correlated with C/N ratio ($P < 0.01$); and not significantly correlated with T_5 , W_s , L_w and C ($P > 0.05$). Multiple stepwise regression analysis indicated that the four factors of L_m , T_{10} , N, and W_s together accounted for 36% of R_s heterogeneity. The results of geo-statistical analysis demonstrated that R_s was in a medium spatial autocorrelation; random and structural factors accounted for 39.5% and 60.5% of R_s heterogeneity, respectively. And the factors such as climate, landform, and soil played a leading role. The results also illustrated that the ranges for soil factors were different and the range for both R_s and T_{10} was 25 meters. The fractal dimension of the soil index was in the following order: L_w and C/N ratio (1.95) $> N(1.91) > C(1.89) > R_s(1.78) > L_m(1.77) > W_s(1.69) > T_{10}(1.42)$. The spatial distribution of R_s was in consistent agreement with those of T_{10} , L_m , C, and N; but different with those of W_s and C/N ratio. With a fixed confidence level and certain estimated accuracy, the required sampling number of each item differed, corresponding to its spatial variation degree.

Key words: soil respiration; spatial characteristics; semi-variance analysis; larch plantation; Pangquangou Nature Reserve area

土壤呼吸是土壤C传输到大气的重要途径^[1]。因为土壤中C储量的大小约是大气C储量的2倍^[2], 土壤呼吸的微小变化都可能引起大气CO₂浓度的较大变化^[3]。同时由于土壤呼吸以及其影响因子的不确定性, 给准确估算区域土壤呼吸量带来较大的不确定性。因此, 土壤呼吸的精确测定是研究不同区域生态系统碳循环和碳平衡的主要内容之一。研究表明, 土壤呼吸在各种尺度上都具有较大的时空变异性^[3~5]。随着连续测量技术(如叶室法、

涡度相关法等)的发展, 量化土壤呼吸的时间变化越来越容易^[6]。而土壤呼吸空间变异的量化却具有较大困难, 与取样尺度、取样数量和研究对象的空間差异有关, 需要进行深入研究^[7]。许多研究表明

收稿日期: 2014-10-27; 修订日期: 2014-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201374, 41130528); 山西省基础研究项目(2014011032-1)

作者简介: 严俊霞(1976~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为生态系统碳循环, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hongli@sxu.edu.cn

土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸季节变化的关键因子^[8~10]。然而,土壤温度和土壤水分并不能完全解释土壤呼吸的空间变化^[11, 12]。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、地形、凋落物、根系生物量和人为管理措施等因素有关^[7]。但是,不同生态系统、不同样地、甚至是同一样地的不同季节,影响土壤呼吸空间异质性的主导因子都不相同,因为影响土壤自养呼吸和异养呼吸的因子在不同时期可能不同^[13]。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^[12, 14],忽视生态系统土壤呼吸的异质性可能低估或高估土壤 CO₂ 释放量。较大的取样数量无疑能够提高对样品的估计精度,但是受人力、物力和时间的限制在土壤呼吸的测量过程中取样点的数量往往是有限的。因此,如何准确确定一定精度水平下观测样地的必需样本容量,权衡取样数量与人力投入的关系非常重要,但这方面的报道相对较少^[11, 15]。

目前研究土壤呼吸的空间变化大多都是利用传统的方法如变异系数、相关分析和回归分析等。这些分析方法通过曲线拟合的方式来描述土壤特征的属性。由于受到独立性假设前提的限制,忽略了空间自相关的作用。随着地统计学在生态学研究中的广泛应用,使得研究土壤呼吸的空间变异性成为可能^[16~18]。研究表明,地统计学是研究土壤特征空间异质性特征的较好方法^[19],能更好地适用于区域化变量空间分布特征的描述。地统计学方法不仅能够揭示属性变量在空间上的变异、分布和相关特征,而且可以将空间格局和生态过程相联系,解释空间格局对生态过程与功能的影响^[20, 21]。山西庞泉沟国家级自然保护区华北落叶松、云杉森林生态系统是黄土高原地区具有代表性的森林植物类群。本研究采用传统统计分析和地统计分析的方法,对庞泉沟自然保护区落叶松人工林土壤呼吸的空间变异程度、空间变异结构参数及合理取样数量进行了分析,并对环境因子、生物因子和土壤特性与土壤呼吸空间变异的关系做了探讨,以期复杂地形山区土壤呼吸的研究提供基础数据,为区域碳循环研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区及试验地概况

1.1.1 试验区概况

试验在山西省吕梁山麓的庞泉沟国家自然保

护区内进行,地理位置 37°47'45" ~ 37°55'50"N, 111°22'33" ~ 111°32'22"E。保护区面积 10 443 hm², 森林覆盖率 74% 以上。区内气候属寒温性气候:夏秋季凉爽多雨,冬春季寒冷干燥;年均气温 3 ~ 4℃, 7 月月均气温 16.1℃, 1 月月均气温 -10.6℃;年降水量 600 ~ 800 mm,集中于 6 ~ 9 月;相对湿度 56%,无霜期 92 d,日均温 ≥10℃ 的积温在 2 100℃ 左右。试验区内自然条件地带变化比较明显,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、针阔叶混交林带、寒温性针叶林带和亚高山灌丛草甸带^[22]。森林以华北落叶松、白桦、云杉、山杨为主,分别占林地总面积的 39.8%、18.4%、14.1% 和 13.2%^[23]。

1.1.2 试验样地

试验样地位于汾河主要支流文峪河上游、庞泉沟的支流八道沟入口附近。样地海拔高度 1 795 m。地理位置 37°50'52.6"N, 111°28'08.6"E。试验用林为 20 世纪 70 年代末期人工种植的华北落叶松林,也是本区植被恢复的主要林种之一。林龄约 20 ~ 30 a。胸径 11.1 cm ± 3.7 cm。密度 1 666 株·hm⁻²。林下有明显的凋落物层和枯枝落叶,厚 2 ~ 3 cm,但无明显腐殖质层,亦无明显草本植物或灌木。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法

在华北落叶松人工林中选取面积为 20 m × 20 m 的区域作为供试样地。样地坡度 3° 左右,西南高东北低。在该样地内用分级网格嵌套法布置测定点。首先,将 20 m × 20 m 样地等距离间隔划分为 25 个 4 m × 4 m 的网格,以各网格的顶点作为测定点和取样点,共 36 个。然后依次在上一级样方的基础上分别划分 2 m × 2 m 和 1 m × 1 m 的网格(图 1)。依次类推,样地内共布设不同尺度的取样点 108 个,并对每个样点进行编号并记录每个样点的空间相对坐标值。同时测定样地内树木的胸径、树高。

1.2.2 土壤呼吸

用美国 Licor 公司的 LI-6400 便携式气体分析系统(Li-cor, Lincoln, NE, USA)连接 09 土壤呼吸叶室测定土壤呼吸速率(R_s)。测定前 1 d 在每个取样点各放置 1 个 PVC 环,插入深度 3 cm 左右,为了减少安放 PVC 环对土壤呼吸的影响,同时剪除 PVC 环内的地表植被,以避免植物光合作用对土壤呼吸的影响,并尽量减少对测定点土壤的扰动。测定于 2009 年 6 月进行。早上 09:00 开始,下午 15:00 结

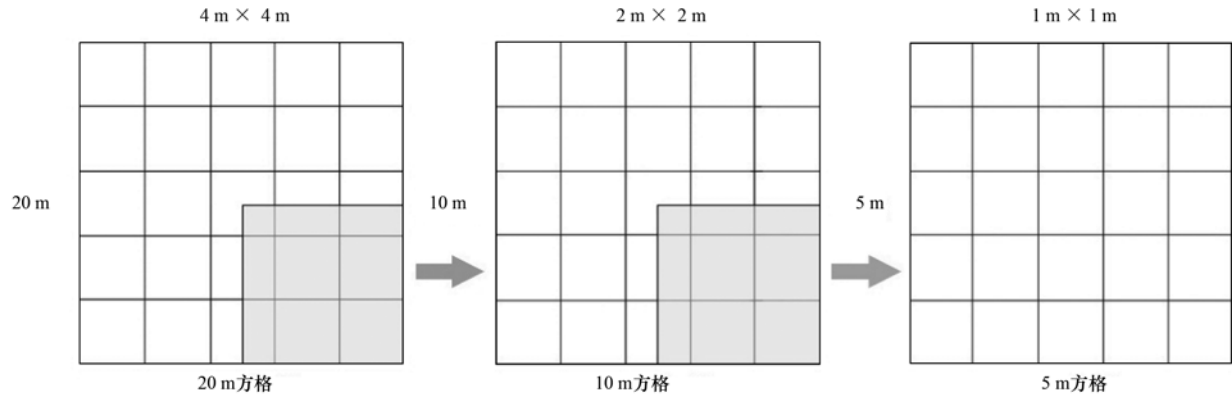


图1 样点分布示意
Fig. 1 Distribution of the sampling points

束. 测定顺序依次为 4 m、2 m、1 m 网格的各样点. 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, 取均值作为该测量点的土壤呼吸值.

1.2.3 环境因子测定

用 LI -6400 的土壤温度探针测定 5 cm (T_5)、10 cm (T_{10}) 和 15 cm (T_{15}) 深度的土壤温度值. 10 cm 深度的土壤温度与土壤呼吸同时测定, 呼吸测定结束后补测 5 cm 和 15 cm 深度的土壤温度, 人工记录. 0 ~ 10 cm 深度的土壤含水量 (W_s) 用土钻法测定. 在每个样点土壤呼吸测定完成后, 首先取 PVC 环内全部凋落物, 然后用土钻取 0 ~ 10 cm 深度的土壤装入封口袋内. 凋落物室内 65℃ 烘干后计算凋落物含水率 (L_m , %) 和单位面积上的凋落物量 (L_w , $t \cdot hm^{-2}$); 所取土样部分用于测定土壤水分 (105℃ 烘干), 部分自然风干, 过 2 mm 土壤筛, 使用 vario MACRO cube 元素分析仪 (德国) 测定土壤全氮 (N)、全碳 (C) 和全硫 (S). 碳氮比 (C/N) = 全碳/全氮.

1.3 数据处理与统计

1.3.1 经典统计

采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, 检验时取显著性水平 $\alpha = 0.05$. 采用 Pearson 相关分析分析环境因子、土壤特性和生物因子与土壤呼吸的相关关系; 采用逐步回归分析法构建土壤呼吸与其影响因子的复合模型; 采用主成分分析提取影响土壤呼吸的主成分. 上述分析均利用 SPSS 17.0 软件进行.

采用以下公式确定土壤样本容量:

$$N = (T \times CV)^2 / k^2 \tag{1}$$

式中, N 代表合理的样本容量, T 表示与显著性水平

相对应的 t 分布的两侧分位数, CV 是样本变异系数, k 代表试验允许的误差^[24].

1.3.2 地统计分析

用 GS + 9.0 (Gamma Design Software, Inc.) 进行半方差函数模型拟合和参数计算; 利用 Surfer 8.0 (Golden Software, Inc.) 绘制土壤呼吸及其相关因子空间分布的等值线图.

2 结果与分析

2.1 传统统计分析

2.1.1 常规统计分析

常规统计分析表明 (表 1), R_s 及其它相关因子的空间变异均属于中等变异 ($10\% \leq CV \leq 100\%$). R_s 和 L_m 的变异系数较大, 分别为 35.30% 和 46.97%; L_w 、C 和 N 的变异系数较为接近, 在 20% 左右; T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 和 W_s 的变异系数均较小, 在 11% ~ 16% 之间. 对数据进行 K-S 检验结果表明, T_{15} 、 L_m 、C、N 和 C/N 比均不符合正态分布 ($P_{K-S} < 0.05$), 对数转换后符合正态分布 ($P_{K-S} > 0.05$); R_s 、 T_5 、 T_{10} 、 W_s 和 L_m 均符合正态分布 ($P_{K-S} > 0.05$), 数据满足平稳假设, 不需要进行对数转换就可以进行地统计学分析.

2.1.2 简单相关分析

简单相关分析表明, R_s 与 T_{10} 、 T_{15} 和 N 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 L_m 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 C/N 比呈显著负相关 ($P < 0.01$), 与 T_5 、 W_s 、 L_w 和 C 相关性不显著 ($P > 0.05$) (表 2). 采用多元逐步回归方法对 R_s 和其相关因子进行拟合, 方程为: $R_s = 0.064L_m + 0.391T_{10} + 12.557N - 0.063W_s - 1.598$ ($R^2 = 0.36$, $P = 0.000$), L_m 、 T_{10} 、N 和 W_s 这 4 个因子能解释 R_s 变化的 36%. 根据方

程各因子偏相关系数的大小,环境因子对 R_s 影响程度的大小分别为 $T_{10} > L_m > N > W_s$. 主成分分析结果表明(表3),代表土壤底物供应的主成分1(C和N)能解释 R_s 空间变异的27.42%,代表环境因子的

主成分2(T_{10} 和 W_s)能解释 R_s 空间变异的21.95%,代表生物因子的主成分3(L_m)和4(L_w)分别能解释 R_s 空间变异的18.34%和13.29%,4个主成分累计能解释 R_s 空间变异的81%.

表1 土壤呼吸及其影响因子的描述统计分析¹⁾

Table 1 Descriptive statistics results of soil respiration and its influencing factors

指标	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	分布型
$R_s/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	2.34	0.83	35.30	0.93	0.90	正态
$T_5/^\circ\text{C}$	8.27	1.12	13.53	0.45	1.92	正态
$T_{10}/^\circ\text{C}$	8.06	0.93	11.57	0.89	2.98	正态
$T_{15}/^\circ\text{C}$	7.95	1.24	15.53	1.45	3.16	非正态
$W_s/\%$	19.01	2.54	13.34	0.24	1.44	正态
$L_w/\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	28.84	7.26	25.18	0.77	1.58	正态
$L_m/\%$	11.34	5.33	46.97	1.58	2.69	非正态
C/%	1.27	0.25	19.85	0.82	0.78	非正态
N/%	0.10	0.02	22.31	1.66	4.10	非正态
C/N 比	12.66	1.87	14.77	0.25	-0.21	非正态

1)表中 R_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 W_s 、 L_w 、 L_m 、C、N 和 C/N 比分别代表土壤呼吸 [$\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]、5 cm、10 cm、15 cm 深度的土壤温度($^\circ\text{C}$)、土壤水分(%)、凋落物量($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)、凋落物含水量(%)、土壤全碳(%)、全氮(%)和全碳/全氮,下同

表2 土壤呼吸及其影响因子之间的相关性矩阵¹⁾

Table 2 Correlation matrix of soil respiration and its influencing factors

	R_s	T_5	T_{10}	T_{15}	W_s	L_w	L_m	C	N	C/N 比
R_s	1									
T_5	0.04	1								
T_{10}	0.34 **	0.65 **	1							
T_{15}	0.31 **	0.32 **	0.71 **	1						
W_s	-0.15	-0.28 **	-0.43 **	-0.53 **	1					
L_w	0.14	0.08	0.00	0.10	-0.24 *	1				
L_m	0.20 *	-0.33 **	-0.37 **	-0.22 *	0.40 **	0.34 **	1			
C	0.17	-0.00	-0.09	-0.14	0.31 **	0.05	0.04	1		
N	0.29 **	-0.30 **	-0.11	0.14	0.21 *	0.08	0.10	0.79 **	1	
C/N 比	-0.20 *	0.47 **	0.05	-0.40 **	0.09	-0.07	-0.20 *	0.24 *	-0.39 **	1

1) * 表示显著性水平 0.05; ** 表示显著性水平 0.01

表3 主成分分析结果

Table 3 Results of the principal components analysis

成分	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
特征值	2.19	1.76	1.47	1.06
差异百分率/%	27.42	21.95	18.34	13.29
累计贡献率/%	27.42	49.37	67.72	81.00
特征向量				
R_s	0.25	0.72	-0.09	0.04
T_{10}	-0.45	0.65	0.27	0.07
W_s	0.60	-0.60	0.04	-0.11
L_m	0.16	0.34	-0.51	0.64
L_w	0.53	-0.14	-0.69	0.18
C	0.74	0.12	0.59	0.27
N	0.82	0.38	0.28	-0.19
C/N 比	-0.22	-0.41	0.47	0.71

2.2 空间变异特征分析

2.2.1 半方差函数分析

利用 R_s 、 T_{10} 、 W_s 和 L_w 的测定数据, L_m 、 C 、 N 和 C/N 比则利用对数转换后的数据进行半方差函数分析. 结果表明(表4), 除 L_w 的理论模型为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分布的模型, 其中 R_s 、 T_{10} 和 W_s 的理论模型为高斯模型, N 为球形模型, C 、 C/N 比和 L_m 为指数模型, 表明 L_w 分布比较随机, 而其他因子呈聚集状的分布模式. 除 L_w 外, 其他指标模型拟合的决定系数较高, 都在 0.95 以上.

块金值和基台值之比 $[C_0/(C_0 + C)]$ 反映了系统变量的空间自相关程度. T_{10} 、 L_m 、 C 、 N 和 C/N 比的 $C_0/(C_0 + C)$ 值都低于 9%, 表明他们具有较强的空间自相关性, 随机因素引起的异质性较小, 空间异质性的变化主要由结构因素如气候、地形和土壤成土母

质等自然因素引起的; R_s 和 W_s 的 $C_0/(C_0 + C)$ 值分别为 39.5% 和 33.1%, 表明 R_s 和 W_s 具有中等程度的空间自相关性, 随机部分引起 R_s 和 L_w 的空间异质性分别占 39.5% 和 33.1%, 结构因素占 60.5% 和 66.9%, 气候、地形、土壤等结构因素起着主导作用; L_w 的 $C_0/(C_0 + C)$ 值为 100%, 表明 L_w 不具有空间自相关性, 其空间变异完全由随机因素引起.

变程是研究某种属性相似范围的一种测度. 在本研究中, R_s 和 T_{10} 的变程差异不大, 在 25 m 左右; W_s 、 L_w 和 L_m 的变程在 15 m 左右; C 、 N 和 C/N 比的变程在 6~9 m 之间(表4), 表明影响 R_s 和其影响因子的生态过程尺度略有差异. 根据半方差函数理论, 空间自相关距离要大于采样点的最大距离才适用于空间异质性分析. 在本试验中, 各指标的空间自相关距离都大于最大取样间距 4 m, 因此本试验取样间距是合理的.

表4 土壤呼吸及其影响因子的变异函数模型及其参数

Table 4 Parameters of 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
R_s	高斯	0.35	0.89	0.39	26.10	0.99	54E-05
T_{10}	高斯	0.22	2.44	0.09	24.09	0.99	3.19E-03
W_s	高斯	3.86	11.65	0.33	17.56	0.98	1.2E-03
L_w	线性	67.64	67.64	1.00	13.08	0.00	47.4
L_m	指数	0.002	0.25	0.007	13.17	0.97	6.93E-05
N	球形	0.003	0.05	0.06	7.80	0.99	8.64E-09
C	指数	0.0001	0.05	0.002	9.06	0.96	2.36E-06
C/N 比	指数	0.0001	0.004	0.03	6.42	0.99	6.66E-10

2.2.2 分维数分析

分维数分析表明, 在各向同性下, 不同指标的双对数半方差函数的直线拟合程度有明显的差异(表5). 除凋落物量 R^2 仅为 0.49、拟合效果较差外, 其他指标的拟合效果均较高, R^2 都大于 0.90. 因此, R_s 、 T_{10} 、 W_s 、 L_m 、 C 、 N 、 C/N 比具有较好的分形特征, 存在尺度上的依赖性. 土壤各指标的分维数大小依次为: $L_w(1.95) = C/N \text{ 比}(1.95) > N(1.91) > C(1.89) > R_s(1.78) > L_m(1.77) > W_s(1.69) > T_{10}(1.42)$. 随着分维数的递减, 空间分布格局对尺度的依赖性下降, 也就是说, L_w 依赖于尺度的变异最小, 空间分布结构最复杂, 而土壤温度的空间分布格局最简单.

在各向异性下, R_s 在 45° 方向上的分维数最大为 1.93, 0° 方向次之为 1.83, 90° 和 135° 方向分维数较小分别为 1.67 和 1.72, 说明 R_s 在 0° 和 45° 方向空间分布较为复杂. 与 R_s 相似, T_{10} 和 L_m 在 0° 和 45° 方向上的分维数较大(1.61 和 1.96, 1.90 和

1.90), 在 90° 和 135° 方向分维数较小(1.42 和 1.08, 1.71 和 1.67), 可见 T_{10} 和 L_m 的空间分布与 R_s 的空间分布较为一致. 土壤水分在各方向分维数差异不大, 各向异性不明显. L_w 和 C/N 比在 0°、45°、90° 和 135° 方向上的分维数均较大, 说明在所有方向上 L_w 和 C/N 比依赖尺度的变异最小, 空间分布格局最为复杂, 和同向性下一致. 土壤全碳和全氮在 0° 方向上的分维数较大, 空间分布格局较为复杂, 与 R_s 的空间分布在此方向上较为一致.

2.2.3 空间分布格局

T_{10} 的分布规律与 R_s 极为相似, 测定区域东部较低, 西北角较高; 而 W_s 的分布规律与 R_s 不同, 高值区在测定区域的东南角, 西北角的值较低; L_w 的空间分布较为复杂, 具有明显的斑块分布特点, 但总体来看, 北部和南部较高, 中间较低; L_m 的空间分布与 R_s 在南部和东北角较为相似, 西南较低, 东南较高, 东北较低; C 和 N 的空间分布模式与 R_s 的分布模式较为接近, 西北角较高, 东南角较低; C/N 比

表 5 土壤呼吸及其影响因子的分维值¹⁾

指标	各向同性	各向异性			
		0°	45°	90°	135°
R_s	1.78(0.98)	1.83(0.99)	1.93(0.10)	1.67(0.93)	1.72(0.60)
T_{10}	1.42(0.99)	1.61(0.99)	1.96(0.36)	1.42(0.99)	1.08(1.00)
W_s	1.69(1.00)	1.66(0.99)	1.75(0.84)	1.71(0.92)	1.64(0.93)
L_w	1.95(0.49)	1.98(0.17)	1.76(0.85)	1.95(0.01)	1.90(0.99)
L_m	1.77(0.99)	1.90(0.60)	1.90(0.47)	1.71(0.98)	1.67(0.99)
C	1.89(0.94)	1.96(0.69)	1.69(0.97)	1.84(0.77)	1.47(0.99)
N	1.91(1.00)	1.97(0.42)	1.62(0.91)	1.83(0.66)	1.54(0.99)
C/N 比	1.95(0.91)	1.97(0.04)	1.92(0.99)	1.94(0.24)	1.89(0.98)

1) 括号中的数据代表决定系数(R^2)

的空间分布模式与 R_s 不同,东部较高,西北角较低(图 2). 以上分析表明, R_s 的空间分布模式与 T_{10} 、 L_m 、C 和 N 的空间分布模式较为一致,而与 W_s 、C/N 比的空间分布模式不同,这一结论与相关分析相一致.

2.3 合理采样数目的确定

在同一置信水平和估计精度下,不同指标的必要采样数量不相同,取决于该指标的空间变异程度

(表 6). 根据表 1,由于 R_s 和 L_m 空间变异系数较大(分别为 35.3% 和 45.97%),因此其必要取样数量也较多. 如,野外取样时 R_s 和 L_m 最少取样个数分别要大于 21 和 38 个才能达到 95% 的置信水平和 85% 的估计精度;而对于空间变异程度较小的 T_{10} 和 W_s 则只需要 3 个随机取样就能满足此精度的要求; C 和 N 比则最少需要取 7~8 个样.

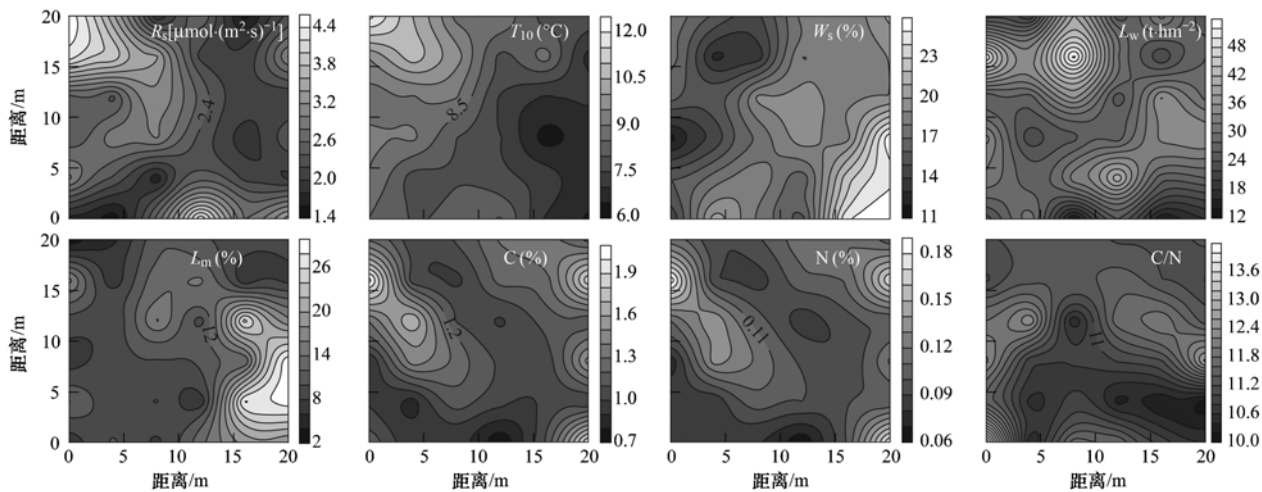


图 2 土壤呼吸及其影响因子空间分布

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

表 6 不同置信水平与估计精度下必要采样数量

指标	95% 置信水平估计精度			90% 置信水平估计精度		
	95%	90%	85%	95%	90%	85%
R_s	191	48	21	135	34	15
T_5	28	7	3	20	5	2
T_{10}	21	5	2	14	4	2
T_{15}	37	9	4	26	7	3
W_s	27	7	3	19	5	2
L_w	97	24	11	69	17	8
L_m	339	85	38	239	60	27
C	61	15	7	43	11	5
N	76	19	8	54	13	6
C/N 比	34	8	4	24	6	3

3 讨论

3.1 土壤呼吸空间变异程度

在各种取样尺度上土壤呼吸都存在空间变异^[10, 25]. 准确估算区域碳收支的基础不仅要了解碳通量的时间变化,更重要的是要分析他们的空间变异性. 变异系数常被简单用来量化土壤呼吸的空间变异程度. 不同生态系统土壤呼吸的空间变异系数不同,取决于许多因素. 如草地的变异系数为 35%^[26]、温带林从 10% ~ 100%^[27]、雨林从 26% ~ 62%^[15, 18]、松树人工林从 21% ~ 55%^[5, 11, 12]、玉米农田从 27% ~ 72%^[28]、橡树林从 28% ~ 42%^[27]、白桦林从 16% ~ 45%^[29]、2、7 和 12 年生杨树人工林分别为 28.8%、22.4% 和 19.6%^[30]. 本研究中土壤呼吸的变异系数为 35.30%,位于报道范围的中值区. 为了能代表整个群丛土壤碳通量的空间异质性,不仅应该使用合理的取样方案,如分层取样等,而且要有多次重复^[10].

土壤呼吸空间自相关的变程随取样尺寸和时间间隔的不同而不同. 本研究中,土壤呼吸空间自相关的变程为 26 m,与东南亚热带雨林土壤呼吸的变程 24.7 m 较为一致^[18],高于德国山毛榉林(6 m 左右)和匈牙利沙质草地的变程(0 ~ 3.6 m)^[17, 31],低于中国西双版纳的热带雨林干季和湿季的变程(32.9 m 和 45.4 m)^[16]. 这些结果表明了在较大的尺度上观测土壤呼吸的重要性. 由于涡度相关法能够代表上风向大约 10 ~ 1 000 m 的尺度,即生态系统尺度,在这个尺度上的土壤呼吸也被考虑可以与利用涡度相关法观测的土壤呼吸值相比较^[32].

3.2 影响土壤呼吸空间变异的因子

一般而言,群丛尺度上土壤呼吸的空间变化主要是由土壤物理性质、生物因子、营养的可利用性以及干扰历史的较大变动引起的. 例如,对加利福尼亚州的一个美国黄松人工幼林研究表明,土壤呼吸空间变化的 84% 是由细根生物量、微生物生物量及土壤的物理化学性质(即土壤温度和水分、土壤氮和有机质、容重和 pH)等引起的^[12]. 凋落物层含水量的变化能解释瑞典挪威云杉林大部分土壤呼吸的空间变化^[33]. 生物量的大小控制着佛罗里达州湿地松人工林土壤呼吸的空间分布,而温度和水分的作用相对较小^[5]. 本研究结果表明,代表土壤底物供应的主成分 1(C 和 N)能解释 R_s 空间变异的 27.42%,代表环境因子的主成分 2(T_{10} 和 W_s)能解释 R_s 空间变异的 21.95%,代表生物因子的主成分

3(L_m)和 4(L_w)分别能解释 R_s 空间变异的 18.34% 和 13.29%,4 个主成分累计能解释 R_s 空间变异的 81%. 生物因子如细根生物量、群落结构参数等同样对土壤呼吸的空间异质性有较大的影响^[34],本研究没有对它们与土壤呼吸空间异质性的关系进行探讨,它们对土壤呼吸异质性的影响还需要进一步研究.

尽管土壤呼吸的空间变化受到许多因子影响,但是通常情况下对限制因子响应更为明显. 在低温时(低于 5℃)土壤呼吸对湿度的反应不敏感,但在温度较高时(10 ~ 20℃)反应敏感^[35]. 本研究中 2 种分析方法都表明土壤温度是影响土壤呼吸空间异质性的主要因子之一,这可能是与该样地海拔较高(1 795 m)、植被盖度较大,测定时的土壤温度大多都低于 10℃ 有关. 土壤温度影响着植物的生长、发育和土壤的形成. 土壤中各种生物化学过程,如微生物活动所引起的生物化学过程和非生命的化学过程,都受到土壤温度的影响. 土壤温度对微生物活性的影响极其明显. 大多数土壤微生物的活动要求有 15 ~ 45℃ 的温度条件. 超出这个范围(过低或过高),微生物的活动就会受到抑制,从而影响土壤呼吸. 此外,本研究中,凋落物含水量也能部分解释土壤呼吸的空间变化. 凋落物通过两个途径影响土壤呼吸,一是自身分解产生 CO_2 ,二是新鲜凋落物的输入对土壤中原有有机质的分解有刺激作用,即“激发效应”^[36, 37]. 许多研究表明去除或添加凋落物会导致土壤呼吸显著降低或增加^[38~40]. 再者,去除和添加凋落物也会显著影响土壤微生物生物量和活性,从而影响微生物异养呼吸速率^[41, 42]. 本研究中,凋落物含水量与土壤呼吸的相关系数为 0.20,达到显著水平($P < 0.05$),与 Gärdenäs 的研究结论相一致^[33]. 这可能与该样地凋落物层较厚,地表温度显著高于土层温度,凋落物含水量及其较高的温度通过影响凋落物的分解速率从而影响土壤微生物呼吸有关. 本研究结果也表明落叶松人工林的土壤全氮含量与土壤呼吸呈显著正相关,与前人的研究结果相一致^[12, 18]. 在森林生态系统中,由于土壤碳氮循环过程和动态变化是紧密耦合、紧密联系的^[43],因此土壤氮的有效性能影响土壤呼吸和碳动态. 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^[44]. 因

此, C/N 比、土壤总碳和总氮对土壤呼吸的影响是复杂的, 有时掩盖了一个明确的关系。综上所述, 该样地的土壤呼吸同时受到土壤温度、土壤全氮、凋落物含水量等多种因素的影响; 同时说明, 这些影响因子是交互在一起发生作用的, 很难单独区分开单个因子所起的作用, 需要进行进一步研究。

3.3 土壤呼吸的合理取样数量

土壤呼吸在样地内、样地间和不同生态系统间的空间变异性使得在各种尺度上都需要进行更多的重复取样, 这样才能精确估计样地的土壤呼吸值。然而, 受人力、物力和时间的限制, 利用叶室法测定土壤呼吸时测量点的数量通常是有限的。许多研究用 10 个或少于 10 个取样点的样本均值来代替总体均值, 而且大多研究的取样方法都是随机取样。利用样本均值来代替样地土壤呼吸值可能会带来很大的误差, 只有选择合理的样本容量, 才能比较准确地利用样本观察值来估计总体的相关参数。研究表明, 日本落叶松人工林在 95% 置信水平误差在 10% 和 20% 内估算土壤呼吸的必要取样数量分别为 30 个和 8 个, 并且必要取样数量的多少与测定方法和叶室覆盖的面积有关, 基于碱液吸收法计算的必要取样数量低于实际需要的取样数量, 较大的叶室需要的取样数量较少、较小的叶室需要的取样数量较多^[11]; 温带针阔混交林在同样的置信水平和误差下的必要采样数量分别为 41 个和 10 个, 必要采样数量与土壤呼吸的空间异质性大小和叶室覆盖的面积有很大关系^[45]; 马来西亚 4 种森林生态系统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^[15]。本研究中, 要达到 95% 置信水平误差在 10% 和 15% 内土壤呼吸的必要采样数量分别为 48 和 21, 大于本区亚高山草甸在同样置信水平和精度范围的取样数量^[46]。这个结果能够为该样地或其他自然条件类似的样地, 进行土壤呼吸长期观测时取样方案的设计提供参考。

4 结论

山西庞泉沟自然保护区落叶松人工林 R_s 的空间变异属于中等变异, 变异系数为 35.3%; R_s 与 T_{10} 、 T_{15} 和 N 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 L_m 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 C/N 比呈显著负相关 ($P < 0.01$), 与 T_5 、 W_s 、 L_w 和 C 相关不显著 ($P > 0.05$); L_m 、 T_{10} 、 N 和 W_s 这 4 个因子能解释土壤呼吸空间变化的 36%。 R_s 具有中等程度的空间自相关性, 随机部分引起的空间异质性占 39.5%, 结构

因素占 60.5%, 气候、地形、土壤等结构因素起着主导作用; 不同指标的变程不相同, R_s 和 T_{10} 的变程差异不大, 在 25 m 左右; R_s 的空间分布模式与 T_{10} 、 L_m 、 C 和 N 的空间分布模式较为一致, 而与 W_s 、 C/N 比的空间分布模式不同; 在同一置信水平和估计精度下, 不同指标的必要采样数量不相同, 取决于该指标的空间变异程度。本研究表明, 只有通过合理的采样数量才能保证测定结果的可靠性。

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] Dore S, Fry D L, Stephens S L. Spatial heterogeneity of soil CO_2 efflux after harvest and prescribed fire in a California mixed conifer forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **319**: 150-160.
- [7] Ngao J, Epron D, Delpierre N, *et al.* Spatial variability of soil CO_2 efflux linked to soil parameters and ecosystem characteristics in a temperate beech forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **154-155**: 136-146.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO_2 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.
- [13] 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.

- [14] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**(3): 199-209.
- [15] 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.
- [16] Song Q H, Tan Z H, Zhang Y P, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a seasonal rainforest with complex terrain [J]. *iForest-Biogeoeciences and Forestry*, 2013, **6**(2): 65-72.
- [17] Föti 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.
- [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] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, **205**(1-2): 20-37.
- [20] Hillel D. Research in soil physics: A review [J]. *Soil Science*, 1991, **151**(1): 30-34.
- [21] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives [J]. *Geoderma*, 1999, **89**(1-2): 1-45.
- [22] 马子清. 山西植被 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. 185-280.
- [23] 李世广, 张峰. 山西庞泉沟国家级自然保护区生物多样性与保护管理 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2014. 1-8.
- [24] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**(1): 106-112.
- [25] Martin 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.
- [26] van den Pol-van Dasselaar A, Corré W J, Priemé A, *et al.* Spatial variability of methane, nitrous oxide, and carbon dioxide emissions from drained grasslands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**(3): 810-817.
- [27] Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A, *et al.* Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest [J]. *Tree Physiology*, 1993, **13**(1): 1-15.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Sørensen A R, Buchmann N. Spatial and temporal variations in soil respiration in relation to stand structure and soil parameters in an unmanaged beech forest [J]. *Tree Physiology*, 2005, **25**(11): 1427-1436.
- [32] Schmid H P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **87**(2-3): 179-200.
- [33] Gärdenäs A I. Soil respiration fluxes measured along a hydrological gradient in a Norway spruce stand in south Sweden (Skogaby) [J]. *Plant and Soil*, 2000, **221**(2): 273-280.
- [34] Luan J W, Liu S R, Zhu X L. Roles of biotic and abiotic variables in determining spatial variation of soil respiration in secondary oak and planted pine forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **44**(1): 143-150.
- [35] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 72-78.
- [36] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, *et al.* Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(10): 2224-2232.
- [37] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(9): 1363-1371.
- [38] 余再鹏, 万晓华, 胡振宏, 等. 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(10): 2529-2538.
- [39] Wang Q K, He T X, Wang S L, *et al.* Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **178-179**: 152-160.
- [40] Schaefer D A, Feng W T, Zou X M. Plant carbon inputs and environmental factors strongly affect soil respiration in a subtropical forest of southwestern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(5): 1000-1007.
- [41] Li Y Q, Xu M, Sun O J, *et al.* Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(12): 2111-2114.
- [42] Brant J B, Sulzman E W, Myrold D D. Microbial community utilization of added carbon substrates in response to long-term carbon input manipulation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(8): 2219-2232.
- [43] Prasolova N V, Xu Z H, Saffigna P G, *et al.* Spatial-temporal variability of soil moisture, nitrogen availability indices and other chemical properties in hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantations of subtropical Australia [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, **136**(1-3): 1-10.
- [44] Rasse D P. Nitrogen deposition and atmospheric CO₂ interactions on fine root dynamics in temperate forests: a theoretical model analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(5): 486-503.
- [45] 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.
- [46] 李洪建, 严俊霞, 高玉凤, 等. 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特性 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4313-4320.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行