

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)
嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)
蜈蚣草中砷与砷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录	(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	
《环境科学》征稿简则(4454)	
信息(4463,4530,4573,4581)	

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性

严俊霞, 梁雅南, 李洪建*, 李君剑

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要: 基于在3个取样尺度(4、2、1 m)对庞泉沟自然保护区的落叶松人工林(*Larix principis-rupprechtii*)土壤呼吸速率(R_s)以及生物和非生物因子的观测数据, 对不同取样尺度 R_s 的空间变异性进行了研究, 分析了不同取样尺度下5、10和15 cm深度的土壤温度(T_5 、 T_{10} 、 T_{15})、10 cm深度的土壤水分(W_s)、土壤全氮(N)、全碳(C)、碳氮比(C/N)、全硫(S)、凋落物量(L_w)和凋落物含水量(L_m)对 R_s 空间变异的影响, 并计算了3种尺度各变量在不同置信水平与估计精度下的最佳采样数量。结果表明, ①除4 m取样尺度的C/N比、2 m的 W_s 和1 m的 T_{10} 、 T_{15} 的空间变异属于弱变异外, R_s 及其它相关因子的空间变异均属于中等变异; R_s 、C/N比和S的变异系数随着取样尺度的增大而减小, N、C、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 则相反。②随着取样尺度的减小, R_s 、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 的空间自相关性减弱, 而C、N和C/N比的空间自相关性增强, S则随着取样间距的减小空间自相关性先减弱后增强。③不同取样尺度下影响 R_s 空间变异的关键因子不同, 在较大的尺度上土壤温度是影响 R_s 空间变异性的主要因素, 而在较小的尺度上则受C、 L_m 和 L_w 的共同影响。④随着置信水平和估计精度的减低, R_s 及其影响因子的合理取样数目逐渐减少; R_s 、C/N比和S的取样数目随着取样间距的减小而增加, 而N、C、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 的取样数量则减少。

关键词: 取样尺度; 土壤因子; 土壤呼吸; 空间变异; 落叶松人工林

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4591-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.035

Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales

YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian*, LI Jun-jian

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

Abstract: Based on observations of soil respiration rate (R_s) and both biotic and abiotic factors in Pangquangou Nature Reserve at three sampling scales (4, 2, and 1 m), we studied the spatial heterogeneity of R_s and the factors, and analyzed impacts of soil temperature at the 5, 10 and 15 cm depth (T_5 , T_{10} , T_{15}), soil moisture over the depth of 0-10 cm (W_s), and soil total nitrogen (N), soil total organic carbon (C), ratio of carbon and nitrogen (C/N), soil total sulfur (S), litter fall mass (L_w) and litter fall moisture (L_m) on the spatial heterogeneity of R_s , respectively. We also calculated the minimum sampling number of all the factors at different confidence levels and under the responding estimation accuracy. The results showed that: ①the spatial heterogeneity of C/N at 4 m sampling scale, W_s at 2 m sampling scale and T_{10} , T_{15} at 1 m sampling scale had low variability, while the spatial variation of R_s and other related factors had medium variability. Coefficients of variation of R_s , C/N and S decreased with the increase of the sampling scales, but those of N, C, W_s , T_5 , T_{10} , T_{15} , L_w and L_m showed contrary trend; ②the spatial autocorrelation of R_s , W_s , T_5 , T_{10} , T_{15} , L_w and L_m decreased with the decrease of sampling scales but the spatial autocorrelation of C, N, C/N increased with the decrease of sampling scales, and the spatial autocorrelation of S decreased with the decrease of the sampling scales at initial stage and then increased; ③the key factors that influenced the spatial heterogeneity of soil respiration were different at different sampling scales. Soil temperature was the key factor influencing the spatial heterogeneity of R_s at a larger scale. However, at a smaller scale, the spatial heterogeneity of R_s was influenced by C, L_w and L_m ; ④the minimum sampling number for soil respiration measurement and its influencing factors reduced greatly with the decrease of confidence level and responding estimation accuracy. The sampling numbers of R_s , C/N and S increased with the decrease of sampling scales, while those of N, C, W_s , T_5 , T_{10} , T_{15} , L_w and L_m decreased.

Key words: sampling scale; soil factors; soil respiration; spatial heterogeneity; larch plantation

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,也是土壤与大气之间碳交换的主要输出途径^[1],其微小变化可能引起大气CO₂浓度的显著变化^[2]。土壤呼吸受到生物因子和非生物因子的共同作用,在不同的时空尺度上都具有较大的变异性^[3~5]。不仅不同生态系统间土壤呼吸存在明显的

空间变异,而且在相同生态系统内土壤呼吸也具有

收稿日期: 2015-04-23; 修订日期: 2015-07-20

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

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

明显的空间变异^[6~9]. 土壤呼吸的空间变异程度也随着取样间距的变化而变化,如加拿大北方森林^[10]、东南亚热带雨林^[11]和亚高山草甸^[12]土壤呼吸的空间变异系数(CV)值随着取样间距的增大而增大. 土壤呼吸的空间变异性增加了评估及预测土壤呼吸速率的难度. 因此,为了精确估计生态系统的土壤呼吸量,非常有必要解决土壤呼吸作用小尺度上的空间变异性^[5].

影响土壤呼吸的因子很多,在不同时间和空间尺度上不同生态系统的影响土壤呼吸的因子各不相同^[13~15]. 土壤温度和土壤水分是控制土壤呼吸的关键因子^[10, 16~18],然而这些变量只能解释土壤呼吸时间变异的绝大部分,很难解释土壤呼吸的空间变异. 土壤呼吸的空间变异与温度、水分条件、土壤有机碳、植被类型、凋落物、根系生物量和人为管理措施等因素有关^[5, 8, 19~21]. 森林生态系统更容易受土壤物理化学性质、气候因子、植被类型和微生物群落结构等因素的影响而表现出明显的空间差异,这种差异存在于各种尺度上(群丛尺度、景观尺度、区域尺度和生物群系尺度)^[22, 23]. 研究表明,在不同的研究区域和不同尺度上控制土壤呼吸空间变异的关键因子不同. 如 Martina 等^[21]的研究表明, Chequamegon 国家森林公园土壤呼吸的空间变异性在 0~1 m 尺度上主要受根系和凋落物的控制,在 1~10 m 尺度上主要受根系生物量、土壤碳/氮含量和根系含氮量的控制,在景观尺度上地形是关键控制因子. 因此,了解不同取样尺度下土壤呼吸的控制因素及其与土壤呼吸的关系对于分析区域碳循环非常重要.

庞泉沟国家级自然保护区的华北落叶松是山西高原地区具有代表性的森林植物类群. 本研究利用动态气室法观测了华北落叶松人工林 3 种取样间距的土壤呼吸,试图阐明不同取样间距的土壤呼吸及其影响因子的空间变异程度、空间变异结构参数,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 试验地概况

试验在山西省庞泉沟国家自然保护区内进行,保护区自然概况详见文献^[12]. 试验样地位于区内文峪河上游支流八道沟入口附近,地理位置为 37°50'52.6" N, 111°28'08.6" E, 海拔高度为 1 795 m. 试验用林为人工种植的华北落叶松林,林龄约 35 a, 胸径(11.1 ± 3.7) cm, 密度 1 666 株·hm⁻². 样地地形为缓坡,坡度 3°~5°,林下有明显的凋落物层,厚 2~3 cm,无明显腐殖质层,亦无明显草本植物或灌丛.

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法

本研究用分级网格嵌套法布置测定点. 在所选华北落叶松人工林样地内设立 1 个 20 m×20 m 的样地,将大样方分割成 25 个 4 m×4 m 的单元格,以各单元格的顶点作为测定点和取样点,共 36 个;在上一级样方的基础上分别划分 2 m×2 m 和 1 m×1 m 的单元格(图 1). 样地内共布设不同尺度的取样点 108 个.

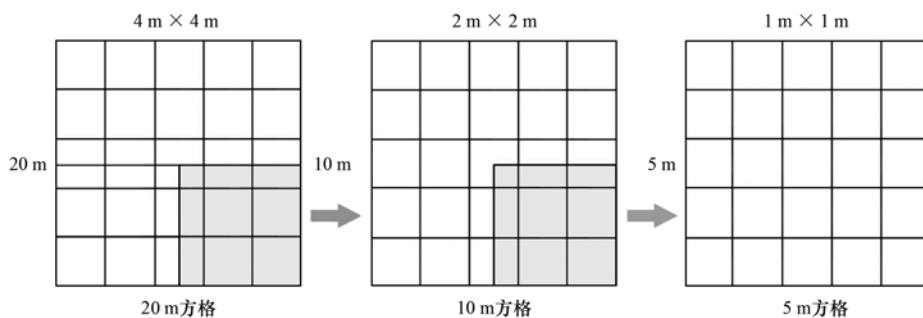


图 1 样点分布示意

Fig. 1 Distributions of soil sampling points

1.2.2 土壤呼吸测定

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 土壤呼吸气室测定土壤呼吸速率(R_s). 测定前一天在每个取样

点各放置 1 个 PVC 环,插入深度 3 cm 左右,以减少安放 PVC 环对土壤呼吸的影响,同时为了避免植物对土壤呼吸的影响,剪除 PVC 环内的地表植被,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 结束。测定顺序依次为 4、2 和 1 m 尺度的各样点。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

不同深度的土壤温度用 LI-6400 的土壤温度探针测定。用土钻法测定 0~10 cm 深度的土壤含水量(W_s)。每个样点土壤呼吸测定完成后,首先取 PVC 环内凋落物,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 , $t \cdot hm^{-2}$); 所取土样部分样品用于测定土壤水分(105℃ 烘干),部分样品自然风干,过 2 mm 土壤筛,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 数据统计分析

用 SPSS 17.0 软件的描述统计、正态检验、相关分析和因子分析进行统计分析处理;用 GS+(7.0)软件进行半方差函数模型拟合和参数计算;所有图件利用 Sigmaplot 10.0 绘制。

采用针对区域纯随机取样构造的最佳取样数量公式计算各土壤样本容量:

$$N = \left(\frac{t_a \times \text{Std}}{X \times (1 - P)} \right)^2$$

式中, N 为需要的取样数量, t_a 为与显著性水平相对应的 t 分布的双侧分位数,Std 是样本标准差, P 为估计精度, X 为样本的平均值^[24, 25]。

2 结果与分析

2.1 不同尺度下土壤呼吸的统计特征分析

3 个取样尺度土壤呼吸及其影响因子实测值的统计分析和 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验结果见表 1。3 个取样尺度下, R_s 的均值、最大值和最小值均存在一定的差异。4、2 和 1 m 取样尺度下土壤呼吸的变异范围分别为 1.46~4.55、1.02~3.76 和 1.02~4.84 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 平均值分别为 2.64、1.97 和 2.40 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ (表 1、图 2)。对数据进行 K-S 检验,结果表明,除 S 符合对数正态分布($P_{K-S} < 0.05$)外, R_s 及其它相关因子均符合正态分布($P_{K-S} > 0.05$),符合地统计分析对数据分布状态的要求(表 1)。

变异系数能够反映总体内部各样本间的变异程度,除 4 m 取样间隔的 C/N 比、2 m 的 W_s 、1 m 的

T_{10} 、 T_{15} 的空间变异属于弱变异外($CV \leq 10\%$), R_s 及其它相关因子的空间变异均属于中等变异($10\% \leq CV \leq 100\%$) (图 2)。总体来看, S 和 L_m 的变异系数较大,在 38%~69% 之间; L_w 、 C 和 N 的变异系数较为接近,在 20% 左右; T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 W_s 和 C/N 比的变异系数均较小,在 6%~19% 之间。 R_s 、 C/N 比和 S 的变异系数随着取样尺度的增大而减小,变异系数分别为 36.11%~30.27%、14.10%~11.28% 和 68.59%~38.76%。 N 、 C 、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 的变异系数均随着取样尺度的增大而增大的趋势,分别为 20.66%~25.87%、10.25%~13.32%、15.29%~26.56% 和 10.18%~12.18%。表明 N 、 C 、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 在较大的取样尺度上空间变异较大,而土壤呼吸在较小的取样尺度上空间变异较大。

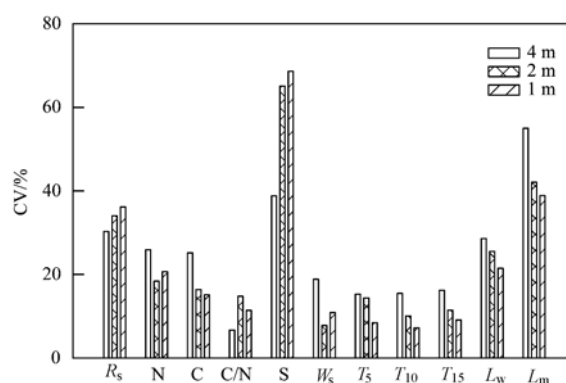


图 2 土壤呼吸及其影响因子的变异系数

Fig. 2 Coefficients of variation of soil respiration and controlling factors

2.2 不同尺度下土壤呼吸空间变异的影响因子

皮尔逊相关分析表明,4 m 尺度 R_s 仅与 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.49、0.57 和 0.58,与其他因子的相关性都不显著($P > 0.05$); 2 m 尺度上 R_s 仅与 C/N 比呈负显著相关($P < 0.05$, $r = -0.35$),与其他因子相关性都不显著($P > 0.05$); 1 m 尺度上 R_s 与 L_w 和 C 呈显著正相关($P < 0.05$, r 为 0.34, 0.34),与 L_m 呈极显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.66$),与其他因子相关都不显著($P > 0.05$) (表 2)。以上结果表明不同的取样尺度下影响土壤呼吸空间变异的关键因子不同,在较大的尺度上土壤温度是影响 R_s 空间变异性的关键因素,而在较小的尺度上 R_s 的空间变异则受 C 、 L_m 和 L_w 的共同影响。

主成分分析结果表明(表 3),在 4 m 取样间距下,特征值大于 1 的有 4 个主成分,主要反映土壤温

表 1 土壤呼吸及其相关因子统计特征值¹⁾

Table 1 Statistical characteristics of soil respiration and controlling factors

项目	取样间距 /m	平均值	标准差	95% 置信区域		最小值	最大值	中位值	峰度	偏度	分布型
				下界	上界						
R_s	4	2.64	0.80	2.38	2.93	1.46	4.55	2.52	0.80	0.10	正态
	2	1.97	0.67	1.72	2.20	1.02	3.76	1.88	0.98	0.86	正态
	1	2.40	0.87	2.11	2.70	1.02	4.84	2.25	1.10	1.71	正态
N	4	0.107	0.028	0.097	0.116	0.061	0.187	0.100	1.47	2.37	正态
	2	0.097	0.018	0.091	0.103	0.077	0.171	0.094	2.24	7.76	正态
	1	0.099	0.021	0.092	0.106	0.050	0.171	0.098	1.11	3.70	正态
C	4	1.20	0.30	1.09	1.30	0.71	2.05	1.12	1.34	1.55	正态
	2	1.23	0.20	1.16	1.30	0.90	1.88	1.21	1.15	2.01	正态
	1	1.38	0.21	1.31	1.45	0.87	1.88	1.34	0.49	0.56	正态
C/N	4	11.28	0.76	11.10	11.54	10.09	14.06	11.19	1.50	4.10	正态
	2	12.60	1.86	12.25	13.36	10.58	16.19	12.44	0.49	-0.92	正态
	1	14.10	1.60	13.56	14.64	10.99	16.87	14.13	-0.36	-0.72	正态
S	4	0.021	0.008	0.018	0.023	0.005	0.031	0.024	-0.80	-0.87	非正态
	2	0.028	0.018	0.022	0.034	0.005	0.114	0.025	3.18	14.34	非正态
	1	0.031	0.022	0.023	0.038	0.005	0.130	0.029	3.11	13.70	非正态
W_s	4	18.19	3.42	16.98	19.36	11.59	25.86	18.11	0.56	0.31	正态
	2	19.13	1.48	18.60	19.67	15.58	23.46	18.89	0.54	1.20	正态
	1	19.69	2.14	18.96	20.41	15.64	26.25	19.33	0.85	1.54	正态
T_5	4	7.74	1.18	7.33	8.16	5.60	11.20	7.70	0.62	0.81	正态
	2	8.50	1.22	8.16	9.00	6.60	12.80	8.70	1.21	3.73	正态
	1	8.56	0.72	8.31	8.80	6.70	9.90	8.60	-0.51	0.06	正态
T_{10}	4	8.25	1.28	7.82	8.71	6.28	12.16	7.99	0.89	1.21	正态
	2	7.89	0.79	7.63	8.19	6.33	9.11	8.02	-0.40	-0.95	正态
	1	8.05	0.58	7.85	8.24	6.80	9.00	8.01	-0.38	-0.61	正态
T_{15}	4	8.86	1.44	8.35	9.35	6.60	13.40	8.50	1.00	1.49	正态
	2	7.74	0.88	7.40	8.01	6.30	10.30	7.75	0.95	1.35	正态
	1	7.26	0.66	7.04	7.48	6.10	9.40	7.30	0.84	1.95	正态
L_w	4	29.29	8.37	26.35	32.18	13.26	52.83	26.95	0.66	0.98	正态
	2	28.30	7.21	25.62	30.80	17.26	54.54	26.39	1.41	3.64	正态
	1	28.93	6.22	26.82	31.03	17.26	41.29	28.63	0.01	-0.52	正态
L_m	4	12.40	6.81	9.97	14.72	2.48	29.59	10.14	1.39	1.28	正态
	2	11.07	4.66	9.19	12.45	5.49	26.85	9.83	1.70	3.61	正态
	1	10.55	4.10	9.16	11.94	5.49	21.50	9.25	1.14	0.59	正态

1) 表中 R_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 W_s 、 L_w 、 L_m 、C、N、C/N 和 S 分别代表土壤呼吸 [$\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$]、5 cm、10 cm 和 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 (%)、全碳/全氮和全硫 (%)

表 2 土壤呼吸及其影响因子的相关性矩阵¹⁾

Table 2 Correlation matrix of soil respiration and its influencing factors

取样间距/m	W_s	T_5	T_{10}	T_{15}	L_w	L_m	N	C	S	C/N
4	-0.19	0.49 **	0.57 **	0.58 **	0.03	-0.15	0.23	0.20	-0.17	-0.10
2	-0.06	-0.16	0.18	0.08	0.03	0.24	0.26	-0.02	-0.09	-0.35 *
1	-0.06	0.02	-0.10	-0.11	0.34 *	0.66 **	0.30	0.34 *	0.10	-0.08

1) * 表示显著性水平; ** 表示显著性水平

度和土壤水分的第一主成分的贡献率为 40.82%，主要反映土壤碳氮含量的第二主成分的贡献率为 19.70%，主要反映 C/N 比的第三主成分和反映 L_w 的第四主成分的贡献率分别为 10.68% 和 10.17%，前 4 个主成分的累计贡献率为 81.36%，表明 4 个主成分可解释土壤呼吸空间变异的 81.36%；在 2 m 取样间距下，特征值大于 1 的 4 个主成分累计能解释土壤呼吸空间变异的 73.50%，主要反映土壤温度的第一主成分的贡献率为 24.07%，主要反映

土壤碳氮含量的第二主成分的贡献率为 18.53%，主要反映凋落物含水量的第三主成分和反映凋落物量的第四主成分的贡献率分别为 17.01% 和 13.89%；在 1 m 取样间距下，特征值大于 1 的有 5 个主成分，主要反映土壤碳氮含量的第一主成分能解释 R_s 空间变异的 27.68%，主要反映凋落物含水量的第二主成分能解释 19.73%，主要反映土壤水分的第三主成分和反映土壤温度的第四主成分分别能解释 14.51% 和 14.20%，主要反映土壤硫含量的

第五主成分能解释 9.22%, 5 个主成分累计能解释 85.34%.

表 3 载荷因子转置矩阵和累计贡献率

Table 3 Rotated component matrix and total variance explained

取样间距 /m	成分	特征值	贡献率 /%	累计贡献 率/%	特征向量										
					W_s	T_5	T_{10}	T_{15}	L_w	L_m	N	C	S	C/N	R_s
4	主成分 1	4.49	40.82	40.82	-0.79	0.95	0.96	0.96	0.14	-0.68	-0.17	-0.13	-0.52	0.21	0.53
	主成分 2	2.17	19.70	60.52	0.27	0.05	0.09	0.14	0.06	0.09	0.96	0.92	-0.14	-0.23	0.47
	主成分 3	1.17	10.68	71.20	-0.16	-0.02	-0.08	-0.07	-0.46	-0.35	0.14	0.32	0.23	0.76	-0.22
	主成分 4	1.12	10.17	81.36	-0.32	-0.06	-0.03	0	0.85	0.25	0.06	0.16	0.18	0.38	-0.14
2	主成分 1	2.65	24.07	24.07	-0.44	0.81	0.61	0.31	-0.10	-0.26	-0.54	-0.10	0.69	0.63	-0.30
	主成分 2	2.04	18.53	42.60	-0.22	0.17	0.37	0.70	-0.05	-0.41	0.77	0.67	-0.15	-0.18	0.27
	主成分 3	1.87	17.01	59.61	-0.29	0.24	0.15	0.39	0.60	0.72	-0.05	-0.40	0.16	-0.51	0.47
	主成分 4	1.53	13.89	73.50	0.01	0.13	-0.45	-0.14	0.66	0.31	0.28	0.58	0.34	0.39	-0.30
1	主成分 1	3.04	27.68	27.68	0.34	-0.6	-0.45	-0.14	0.22	0.48	0.90	0.78	0.32	-0.56	0.49
	主成分 2	2.17	19.73	47.41	0.22	0.66	0.33	-0.35	0.40	0.70	-0.22	0.21	0.32	0.57	0.54
	主成分 3	1.60	14.51	61.92	0.63	0.25	0.62	0.45	-0.55	-0.08	0.25	0.36	0.08	-0.02	-0.21
	主成分 4	1.56	14.20	76.12	-0.50	0.16	0.44	0.73	0.43	0.12	0.16	-0.11	-0.15	-0.40	0.36
	主成分 5	1.01	9.22	85.34	-0.15	0.13	0.13	-0.13	0.17	-0.28	0.06	-0.08	0.85	-0.23	-0.24

2.3 不同尺度下土壤呼吸的半方差函数分析

半方差函数分析表明(表 4), 4 m 取样尺度的 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、S 和 1 m 的 T_5 、 T_{10} 、C、N、C/N、S 的块金系数在 25% 以下, 表明这些变量具有强烈的空间自相关性, 其变异主要受结构因素的影响; 4 m 取样间隔的 R_s 、 L_m 、C、N、C/N 和 2 m 的 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_m 、C、N、C/N、S 和 1 m 尺度 T_{15} 的块金系数在 25% ~ 75% 之间, 表明这些变量具有中等的空间自相关性, 其变异受随机因素和结构因素共同影响; 4 m 取样间隔的 L_w 和 2 m 的 R_s 、 L_w 和 1 m 尺度的 R_s 、 W_s 、 L_w 、 L_m 的块金系数高于 75%, 表明这些变量的空间自相关性很弱, 其变异主要受随机因素的影响. 随着取样尺度的减小, R_s 、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 的空间自相关性减弱, 而 C、N 和 C/N 的空间自相关性增强, S 则随着取样间距的减小空间自相关性先减弱后增强. 表明随着采样间距的减小, R_s 、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 在采样间距以内的不可估计误差逐渐增大, 其空间结构的表现能力在逐渐减弱.

变程是空间自相关性的最大距离, 在该值上自相关性为 0, 大于该距离的区域化变量不存在空间自相关性. 随着取样尺度的减小, 土壤呼吸及其影响因子的变程均减小, 可能是因为取样尺度越小, 各指标均一性降低. 同一取样尺度下, 土壤呼吸及其影响因子的空间自相关范围差异不大, 4、2 和 1 m 取样尺度的变程分别在 16.86 ~ 25.37、4.62 ~ 8.43 和 1.45 ~ 4.21 m 之间, 说明 R_s 和其影响因子的生态过程基本在相同的尺度上起作用.

2.4 不同尺度下合理取样数量分析

在同一置信水平和估计精度下, 不同指标的合理取样数量不相同, 取决于该指标的空间变异程度(表 5), 如 S 的变异系数最大, 其所要求的采样数也最高, 4、2 和 1 m 取样间距 95% 置信水平、10% 的相对误差条件下分别为 56、159 和 193 个; 土壤温度要求的采样数最少, T_{10} 在 4、2 和 1 m 取样间距、95% 置信水平和 10% 的相对误差条件下分别为 9、4 和 2 个. 从表 5 可以看出, 随着置信水平和估计精度的减低, 土壤呼吸及其影响因子的合理取样数目大幅度减少; R_s 、C/N 比和 S 的取样数目随着取样间距的减小而增加, 而 N、C、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 正好相反.

3 讨论

不同的空间尺度上土壤呼吸空间异质性的主要控制因子不同. 全球尺度上, 不同生物群落的土壤呼吸作用与温度、降水量和净初级生产力之间呈显著线性相关^[17]. Martin 等指出^[21], 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/氮含量和根系含氮量的影响, 在景观尺度上地形是主导因子. Fang 等认为^[5], 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. 欧洲山毛榉林土壤呼吸的空间变化与土壤容重、土壤碳氮比和叶面积指数密切相关, 而与根系生物量、凋落物碳含量、土壤碳含量、林分断面积相关不显著^[26]. 本研究表明不同的取样尺度下影响土壤呼

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

项目	取样间距/m	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	4	球形	0.217	0.799	0.272	16.86	0.974	2.528E-03
	2	线性	0.392	0.499	0.786	8.43	0.102	6.852E-03
	1	球形	0.686	0.824	0.833	4.21	0.501	0.0263
W_s	4	线性	0.830	14.707	0.056	16.86	0.939	3.510
	2	线性	1.251	2.454	0.510	8.43	0.858	0.066
	1	线性	4.190	5.031	0.833	4.21	0.654	2.869
T_5	4	线性	0.001	1.818	0.017	16.86	0.983	0.0909
	2	线性	0.461	1.549	0.298	8.43	0.848	0.0578
	1	球形	0.125	0.575	0.217	3.39	0.899	3.548E-03
T_{10}	4	线性	0.001	2.094	0.000	16.86	0.984	0.0860
	2	指数	0.188	0.632	0.297	5.76	0.974	2.471E-04
	1	球形	0.09	0.417	0.216	4.66	0.999	2.358E-05
T_{15}	4	线性	0.001	2.625	0.000	16.86	0.986	0.156
	2	线性	0.307	0.875	0.351	8.43	0.937	8.013E-03
	1	线性	0.283	0.505	0.560	4.21	0.752	4.418E-03
L_w	4	线性	57.600	76.641	0.752	16.86	0.103	147.8
	2	线性	45.20	57.495	0.786	8.43	0.004	51.07
	1	线性	34.50	41.428	0.833	4.21	0.311	64.34
L_m	4	线性	15.550	58.944	0.264	16.86	0.974	14.11
	2	指数	6.870	24.710	0.278	4.62	0.782	2.352
	1	线性	13.930	18.052	0.772	4.21	0.173	19.34
N	4	线性	0.000 5	0.000 8	0.625	16.86	0.983	5.270E-10
	2	线性	0.000 3	0.000 4	0.750	8.43	0.385	1.388E-09
	1	球形	0.000 1	0.000 4	0.250	2.04	0.844	7.803E-10
C	4	线性	0.057	0.098	0.582	16.86	0.986	6.716E-06
	2	线性	0.015	0.049	0.306	8.43	0.991	2.846E-06
	1	球形	0.007	0.044	0.159	1.45	0.049	4.114E-05
C/N	4	线性	0.401	0.583	0.698	16.86	0.831	1.851E-03
	2	线性	1.999	4.040	0.495	8.43	0.663	0.551
	1	球形	0.588	2.534	0.232	2.45	0.990	3.103E-03
S	4	球形	0.000 0	0.000 1	0.000	25.31	0.984	3.535E-11
	2	线性	0.000 2	0.000 4	0.500	8.43	0.784	2.948E-09
	1	球形	0.000 1	0.000 4	0.250	4.21	0.772	8.859E-09

吸空间变异的关键因子不同,在 4 m 尺度上土壤温度是影响 R_s 空间变异性的关键因素,而在 1 m 尺度上 R_s 的空间变异则受 C、 L_m 和 L_w 的共同影响。

温度对植物的生长、发育和功能都有重要的影响,是调节陆地生态系统许多生物地球化学过程的关键因素之一。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。Luan 等^[27]指出土壤温度在时间上的变异系数大于空间的,其对小尺度上 R_s 的空间异质性影响较小,只可用来解释较大尺度上 R_s 的空间变异性。本

研究中,4 m 尺度 R_s 仅与 T_5 、 T_{10} 和 T_{15} 呈极显著正相关,与其他因子都相关不显著,可能与土壤温度的空间 CV 值在 4 m 尺度最大有关。 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 的空间 CV 值均随着取样尺度的增大而增大,分别从 8.45%~15.27%、7.19%~15.46% 和 9.10%~16.22%,3 个取样尺度下的变异系数相差 7%,在 1 m 尺度上土壤温度的差异很小,其变化不足以引起土壤呼吸速率发生明显的变化。

土壤中氮的变化可能影响微生物的活性,最终影响土壤呼吸的排放^[28]。许多研究表明氮添加会显著影响森林土壤呼吸,但结论并不一致。如在亚热带常绿林添加氮后显著增加了土壤呼吸,增加量取决于氮添加量^[29]。而对樟树林的研究则表明了氮添加处理显著抑制了土壤呼吸,低氮、中氮和高

表 5 不同置信水平与估计精度下必要采样数量

Table 5 Sample capacity at different confidence levels and estimated precisions

项目	取样间距/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%
R_s	4	141	35	16	9	99	25	11	6
	2	178	44	20	11	125	31	14	8
	1	202	50	22	13	142	36	16	9
N	4	105	26	12	7	74	19	8	5
	2	53	13	6	3	37	9	4	2
	1	69	17	8	4	49	12	5	3
C	4	96	24	11	6	68	17	8	4
	2	41	10	5	3	29	7	3	2
	1	36	9	4	2	25	6	3	2
S	4	223	56	25	14	157	39	17	10
	2	635	159	71	40	447	112	50	28
	1	774	193	86	48	545	136	61	34
W_s	4	54	14	6	3	38	10	4	2
	2	9	2	1	1	6	2	1	1
	1	18	5	2	1	13	3	1	1
T_5	4	36	9	4	2	25	6	3	2
	2	32	8	4	2	22	6	2	1
	1	11	3	1	1	8	2	1	1
T_{10}	4	37	9	4	2	26	7	3	2
	2	15	4	2	1	11	3	1	1
	1	8	2	1	1	6	1	1	1
T_{15}	4	41	10	5	3	29	7	3	2
	2	20	5	2	1	14	3	2	1
	1	13	3	1	1	9	2	1	1
L_w	4	125	31	14	8	88	22	10	6
	2	100	25	11	6	70	18	8	4
	1	71	18	8	4	50	13	6	3
L_m	4	463	116	51	29	326	82	36	20
	2	272	68	30	17	192	48	21	12
	1	232	58	26	15	163	41	18	10

氮处理土壤呼吸年累积量分别较对照下降了 37.66%、30.62% 和 38.95%^[30],其原因可能是由于氮素与碳的亲合性降低了碳素的可利用性,进而会对微生物的代谢活动产生阻碍,减缓了 CO₂ 的排放^[28]. 施氮处理后出现不同的结果可能是样地原有含氮量不同造成的,在氮含量饱和的区域施氮抑制了土壤呼吸,在氮缺乏的地区施氮促进了土壤呼吸^[31]. 但也有研究认为施氮对土壤呼吸作用影响并不显著^[32]. 土壤有机碳是土壤微生物底物供应的主要来源,土壤有机碳含量是影响土壤呼吸速率的重要因素之一. 陈书涛等^[20]认为土壤有机碳是影响土壤呼吸空间异质性的关键因子,无论是在较少扰动的生态系统还是在扰动的生态系统中,土壤呼吸与有机碳含量的关系均可用幂函数描述. 本研究中,2 m 尺度上 R_s 仅与 C/N 比呈负显著相关,与

其他因子相关都不显著. Khomik 等^[33] 和 Longdoz 等^[34] 也报道了土壤呼吸的空间变化与 C/N 比呈负相关. 但也有研究表明土壤呼吸的空间变化与土壤 C/N 比呈显著正相关^[26].

凋落物作为土壤有机质输入的主要来源,是真菌或微生物进行生命活动的物质基础,而且对土壤的温湿度也会产生影响,进而影响土壤呼吸速率^[28]. 去除凋落物导致米老排人工林和杉木人工林 CO₂ 年排放量分别减少 29.8% 和 6.10%^[35]. 王光军等指出^[36],去除凋落物比对照处理的土壤呼吸低 15%,加倍凋落物处理比对照处理高 17.0%. Li 等^[37] 报道了去除凋落物后加勒比松人工林和次生雨林的土壤呼吸速率分别减低了 25% 和 15%. 这些研究都表明了凋落物量对土壤呼吸速率有很大的

影响. 本研究中, 1 m 尺度上 R_s 与 L_w 呈显著正相关, 与 L_m 呈极显著正相关, 与其他因子相关都不显著, 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, 土壤微生物呼吸占土壤总呼吸比例较高有关. 地统计学分析的结果也证明了这一点, 在 1 m 尺度上, R_s 具有较弱的空间自相关性, 究其原因可能是 L_w 和 L_m 的空间自相关性都很弱造成的.

根系生物量也是影响土壤呼吸速率的关键影响因素之一. 韩广轩等^[8]对玉米农田的土壤呼吸研究表明, 根系生物量的分布格局是影响土壤呼吸作用空间异质性的关键因素. 在空间尺度上, 土壤呼吸作用与根系生物量呈显著的线性关系, 而土壤湿度、土壤有机质、全氮和碳氮比对土壤呼吸作用空间异质性的影响并不显著. 美国黄松人工幼林土壤呼吸空间变化的 84% 是由微生物生物量、细根生物量及土壤的物理化学性质等引起的^[6]. 张晓雨等^[38]指出小麦生长季土壤呼吸作用与根系生物量呈显著线性关系, 根系呼吸在分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期占土壤总呼吸的 28.2%、44.0%、56.9% 和 56.2%. 本研究中, 在 4 m 取样间距下, 特征值大于 1 的前 4 个主成分的累计贡献率为 81.36%; 在 2 m 取样间距下, 特征值大于 1 的 4 个主成分累计能解释土壤呼吸空间变异的 73.50%; 在 1 m 取样间距下, 特征值大于 1 的 5 个主成分累计能解释 85.34%, 表明除本研究测定的因子之外, 还有一些因子如根系生物量及其分布、微生物生物量等因子可能对土壤呼吸起作用.

4 结论

(1) 3 种尺度下, R_s 、C/N 比和 S 的变异系数随着取样尺度的增大而减小, N、C、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 的变异系数均随着取样尺度的增大而有增大的趋势. 除 S 不符合正态分布, R_s 及其它相关因子均符合正态分布.

(2) 随着取样尺度的减小, R_s 、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 的空间自相关性减弱, 而 C、N 和 C/N 的空间自相关性增强, S 则随着取样间距的减小空间自相关性先减弱后增强. 表明随着采样间距的减小, R_s 、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 在采样间距以内的不可估计误差逐渐增大, 其空间结构的表达能力在逐渐减弱.

(3) 不同的取样尺度下影响土壤呼吸空间变异的关键因子不同, 在较大的尺度上土壤温度是影响 R_s 空间变异性的关键因素, 而在较小的尺度上则受

C、 L_m 和 L_w 的共同影响.

(4) 随着置信水平和估计精度的减低, 土壤呼吸及其影响因子的合理取样数目大幅度减少; R_s 、C/N 比和 S 的取样数目随着取样间距的减小而增加, 而 N、C、 W_s 、 T_5 、 T_{10} 、 T_{15} 、 L_w 和 L_m 正好相反.

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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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-Biogeosciences and Forestry*, 2013, **6**(2): 65-72.
- [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] 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.
- [12] 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.
- [13] 谢薇, 陈书涛, 胡正华. 中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 334-340.
- [14] 陈书涛, 胡正华, 张勇, 等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2184-2192.
- [15] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(7): 778-785.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 李伟斌, 袁凤辉, 王鸿儒. 森林生态系统土壤呼吸空间异质性研究进展[J]. *世界林业研究*, 2014, **27**(2): 11-16.
- [23] 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其影响因子研究进展[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(4): 689-704.
- [24] Petersen R G, Calvin L D. Sampling [A]. In: Klute C A, (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* [M]. (2nd ed.). Madison, WI, USA: American Society of Agronomy Inc, 1986. 33-51.
- [25] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**(1): 106-112.
- [26] Ngao J, Epron D, Delpierre N, *et al.* Spatial variability of soil CO₂ efflux linked to soil parameters and ecosystem characteristics in a temperate beech forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **154-155**: 136-146.
- [27] Luan J W, Liu S R, Zhu X L, *et al.* 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.
- [28] 周萍, 刘国彬, 薛莲. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. *草业学报*, 2009, **18**(2): 184-193.
- [29] Gao Q, Hasselquist N J, Palmroth S, *et al.* Short-term response of soil respiration to nitrogen fertilization in a subtropical evergreen forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **76**: 297-300.
- [30] 郑威, 闫文德, 王光军, 等. 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(11): 3425-3433.
- [31] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 等. 华西南屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(4): 728-738.
- [32] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(5): 1156-1168.
- [33] Khomik M, Arain M A, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1-4): 244-256.
- [34] Longdoz B, Yernaux M, Aubinet M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution [J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(8): 907-917.
- [35] 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.
- [36] 王光军, 田大伦, 闫文德, 等. 改变凋落物输入对杉木人工林土壤呼吸的短期影响[J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(4): 739-747.
- [37] 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.
- [38] 张晓雨, 张赛, 王龙昌, 等. 秸秆覆盖条件下小麦生长季根系呼吸对土壤呼吸作用的贡献[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(11): 2846-2852.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinpo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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