

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性

严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要: 区域土壤呼吸通量估算大多用样地尺度的测定结果进行外推, 因此对样地尺度土壤呼吸(R_s)及其影响因子的空间关系和取样尺度、取样数量对测定结果的准确性进行评价非常重要. 以山西省庞泉沟自然保护区针阔混交林作为研究样地, 运用传统统计分析与地统计相结合的方法, 分析了4、2、1 m取样尺度下土壤水分(W_s)、土壤温度(T_{10})、凋落物量(L_w)、凋落物含水量(L_m)、土壤全碳(C)、全氮(N)和全碳/全氮(C/N)对土壤呼吸速率(R_s)空间变异的影响. 结果表明3个取样间隔下, R_s 的均值没有显著差异, 但其变异程度随着取样尺度的增大而增加, 变异系数在16%~22%之间. 在4 m取样间隔下, R_s 与 W_s 、 L_w 、C、C/N呈极显著正相关($P < 0.01$), 与N呈显著正相关($P < 0.05$); 在2 m取样间隔下, R_s 与 T_{10} 呈极显著负相关($P < 0.01$), 与其他因子相关不显著; 在1 m取样间隔下, R_s 与其他影响因子的相关性都不显著. 随着取样尺度的减小, R_s 的空间自相关性逐渐减弱, 由高度自相关变为弱相关, 表明随着采样距离的减小, 结构因素对 R_s 的作用减弱, 随机因素的作用逐渐增大. 同一置信水平下相同取样数量随着取样尺度的减小, 估计误差降低. 95%置信水平下, 2 m和1 m取样尺度时9个样本产生的 R_s 误差在 $\pm 12\%$ 左右, 而4 m尺度的误差为 $\pm 16\%$; 90%置信水平下, 2 m和1 m取样尺度时9个样本产生的误差在 $\pm 10\%$ 以内, 4 m尺度则为 $\pm 13\%$. 研究结果可以为样地尺度进行 R_s 季节测定样点的科学布设提供依据.

关键词: 取样尺度; 取样数量; 土壤呼吸; 空间异质性; 针阔叶混交林

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0383-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806044

Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest

YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, LI Hong-jian

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

Abstract: By upscaling the observed results at the plot scale, the carbon efflux from soils in a region can be estimated. Therefore, it is very important to investigate the spatial relations of soil respiration (R_s) and its environment and to evaluate the effect of the sampling scale and number on the accuracy of R_s measurement at the spatial scale. Based on field observation data for a mixed broadleaf-conifer forest in the Pangquangou Nature Reserve of the Shanxi Province, two analysis methods, that is, traditional statistics and geostatistics, were used to analyze the influence of the soil water content (W_s), soil temperature (T_{10}), litter mass (L_w), litter moisture content (L_m), soil total carbon (C), total nitrogen (N), and ratio of C/N and sulfur (S) on the R_s heterogeneity at 4, 2, and 1 m sampling scales. The results show no significant differences between the average R_s values for the three sampling scales, but the degree of variation of R_s , which was evaluated based on the coefficient of determination, increases with increasing sampling scales, ranging from 16% to 22%. At the 4 m sampling interval, the correlations between R_s and W_s , L_w , C, and C/N are highly significant ($P < 0.01$) and significant for N ($P < 0.05$). At the 2 m sampling interval, R_s shows a highly negative significant correlation with T_{10} ($P < 0.01$) and insignificant correlations with the other factors. At the 1 m sampling interval, significant relations between R_s and all other factors were not observed. With the decrease of the sampling interval scale, the spatial autocorrelation of R_s decreases gradually, ranging from high to weak autocorrelations. This indicates that the role the structural factors play decreases with the decrease of the sampling scale, but that of the random factors increases gradually. At the same confidence level for a certain sampling number, the estimated error in R_s decreases with decreasing sampling scale. The analysis of the effect of the sampling number at different sampling scales on the accuracy of R_s shows that the error of R_s at both the 2 and 1 m sampling scales is approximately $\pm 12\%$ at the 95% confidence interval and $\pm 16\%$ at the 4 m sampling scale. At the 90% confidence interval, the error of R_s at both the 2 and 1 m sampling scales is less than $\pm 10\%$; at the 4 m scale, it is $\pm 13\%$. Our results provide insights into how to arrange the sampling sites at the plot scale to measure the seasonal R_s .

Key words: sampling scale; sampling number; soil respiration; spatial heterogeneity; mixed broadleaf-conifer forest

土壤呼吸是陆地生态系统将土壤碳传输到大气的重要途径^[1]. 森林生态系统的土壤呼吸约占陆地生态系统呼吸的60%~90%^[2], 是全球碳循环的主要贡献者. 准确估算森林生态系统的土壤呼吸对区域碳收支研究具有重要意义. 目前生态系统的土壤

呼吸估算大多是基于样地尺度, 用样地内一定数量

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771548); 山西省高等学校科技创新项目(20151115)

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

气室所测定的呼吸值代表样地生态系统的平均值,或通过建立土壤呼吸与环境因子的关系计算年土壤 CO_2 通量值^[3].但是土壤呼吸又具有明显的空间变化特点,这些变化具有一定的尺度依赖性^[4].在全球尺度上,土壤呼吸具有明显的地带性特征,主要受植被和气候的地带性变化影响^[5,6];在区域尺度上,立地条件^[7]、景观^[8]、土地利用类型^[9,10]和群落类型^[11]影响土壤呼吸.在样地内,土壤呼吸受植物根系分布^[12]、林分及冠层结构^[13,14]、凋落物分布及其含水量^[15]甚至微生物群落特征^[16]等因素的影响而变化.有关土壤呼吸与环境因子的空间关系的研究越来越得到重视^[17,18].准确测定土壤呼吸的前提条件是在时间尺度上增加测定频率、在空间上增加取样数量,但是受设备和人力资源的限制,为得到土壤呼吸的“真值”,一个样地内的取样数量不可能无限多,实践中往往是取样数量与估计精度之间的权衡:既能保证一定的精度要求又能减低取样数量.Yim等^[19]对一个40年林龄的日本落叶松的研究表明,95%概率水平下、误差10%和20%时的必要取样数量为30和8个.而Adachi等^[20]对热带4种生态系统土壤呼吸的研究表明,95%概率水平下、误差小于10%时的必要取样数量为67~85个,误差在20%以内的取样数量在17~21个之间.显然,取样数量不同测定精度不同.在时间尺度上,有学者等在一个温带雨林利用高频率取样(每天24个)的土壤呼吸数据^[21],通过随机选择数据分析表明,每天取样2次可以保证日尺度土壤呼吸误差在10%以内,仅在白天取样2次亦可达到要求.估计年土壤呼吸量时,取样数量从每年4~6次会大大增加土壤呼吸的准确性.用分层取样代替随机取样可以减少取样数量并增加土壤呼吸测定结果的可靠性^[21,22].因此了解不同生态系统在样地尺度上土壤呼吸的空间变化模式及其与控制因子的关系,对于准确估算样地土壤呼吸年通量以及将样地尺度土壤呼吸结果上推至景观和区域尺度具有非常重要的意义^[14,23,24].

山西庞泉沟自然保护区地处吕梁山脉中段,是华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)的主要分布地之一.区内植被垂直分布特征明显:海拔2400~2831 m为亚高山灌丛草甸带,土壤为山地草甸土;1850~2600 m为寒温性针叶林带,植被主要以华北落叶松为主,伴有白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、红桦(*Betula albo-sinensis* Burk.)和青杆(*Picea wilsonii* Mast).郁闭度0.7~0.9.海拔1650~1850 m之间为温性针阔叶混交林,以油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、辽东栎(*Quercus*

wutaishansea Mary)、山杨(*Populus davidiana*)和华北落叶松为主,郁闭度0.5~0.7,土壤类型主要为山地淋溶褐土和棕色森林土.年平均降雨量822.6 mm,年平均气温4.3℃,无霜期100~125 d^[25].本研究基于3个取样尺度下观测的庞泉沟自然保护区针阔混交林的土壤呼吸及环境因子数据,采用相关分析、主成分分析和半变异函数,试图阐明不同取样间隔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,分析不同取样尺度下土壤呼吸空间异质性的关键影响因子,并分析了不同尺度下取样数量对土壤呼吸精度的影响,以期为样地尺度的土壤呼吸野外取样方案设计提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区和试验地概况

试验样地位于保护区内的八道沟沟口附近,地理位置37°53′08.4″N、111°25′56.6″E,海拔1790~1795 m,植被为天然次生的针阔叶混交林,以云杉(*Picea asperata* Mast.)+华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)+桦树(*Betula*)为主.林木平均胸径(16.1±10.2)cm,树高约15 m,林木密度725株·hm⁻².林木盖度75%以上.林下草灌层比较明显,主要有刺梨(*Ribes burejense*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、黄端香(*Daphne giraldii*)、披针苔草(*Carex lanceolata*)、紫点杓兰(*Cypripedium guttatum*)等植物,草灌盖度50%以上;林下有明显枯枝落叶层,厚2~4 cm,腐殖质层厚1~3 cm.试验地坡向东,坡度5°~8°左右;土壤为山地棕壤,土层厚度大于50 cm.

1.2 试验设计及测定因子

1.2.1 试验设计

本试验目的是研究在空间尺度上取样距离间隔对土壤呼吸以及影响土壤呼吸因子的空间变化特征.空间尺度分别为4、2和1 m这3个尺度.试验设计用嵌套取样法^[26].2012年6月在一个面积约80 m×180 m的针阔叶混交林中选取地面相对平缓、植被分布相对具有代表性的区域作为试验区域.在该区域内选择一块面积为20 m×16 m的试验样地.首先,将20 m×16 m样地等距离间隔划分为4 m×4 m的网格20个;在此基础上在网格下方建立2 m×2 m的网格25个;同样在2 m×2 m的网格基础上建立1 m×1 m网格25个(图1).4 m、2 m和1 m这3个尺度的取样个数分别为30、36和36个,样点一共102个.以每个网格的顶点作为土壤呼吸测定点和取样点.测定前对每个样点进行编号并记录每个样点的空间相对坐标值和20 m×16

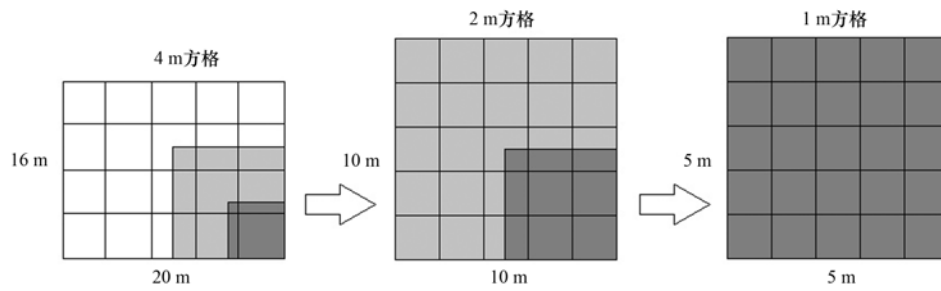


图1 土壤呼吸及环境因子取样点分布示意

Fig. 1 Locations of the sampling points for soil respiration and environmental factor measurements

m 样地内及外扩 4 m 区域以内 ($24\text{ m} \times 28\text{ m}$) 的林木 (胸径 $> 5\text{ cm}$) 在每个网格内位置。

1.2.2 土壤呼吸测定

为减小人为扰动和植物光合作用对土壤呼吸测定结果的影响, 在每个网格顶点提前 1 d 放置一个测定土壤呼吸的 PVC 环, 插入土壤 3 cm 深度左右, 并贴近地表除去环内活体植物。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)。测定于 2012 年 6 月 10 日早上 09:00 开始, 下午 15:00 结束。测定顺序依次为 4、2、1 m 网格的各样点。尽管土壤温度日变化引起的土壤呼吸日变化在其他生态系统中非常重要, 但是在郁闭度非常高的森林, 土壤温度的日变化相对较小。之前相同月份课题组对土壤温度和土壤呼吸间隔 2 h 的 24 h 测定表明, 10 cm 深度的土壤温度和土壤呼吸的日变异系数分别为 8% 和 13%。因此对测定时段的土壤温度变化不进行校正, 只对土壤呼吸值利用 24 h 土壤呼吸的测定结果进行线性校核。土壤呼吸测定时, 将气室紧密扣合到 PVC 环上, 形成密闭气室。每个 PVC 环测定 3 个循环, 取平均值作为该测量点的土壤呼吸值。土壤呼吸的测定方法和有关仪器校正等见文献[3]。

1.2.3 环境因子测定

用 LI-6400 自带的土壤温度探针测定 10 cm 深度的土壤温度 (T_{10} , $^{\circ}\text{C}$), 与土壤呼吸同时测定。土壤呼吸测定结束后, 首先测定每个 PVC 环内凋落物厚度 (cm), 然后取出环内表层凋落物, 装入塑料封口袋; 再用土钻取出环内 0 ~ 10 cm 深度的全部土壤装入塑料封口袋。将所取样本全部带回实验室。土壤样本部分用于土壤水分测定, 剩余部分用于其他测定。土壤含水量 (W_s , %) 用烘干法测定, 3 个重复。凋落物样本称湿重, 65 $^{\circ}\text{C}$ 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 , $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。测定土壤水分的剩余样本自然风干后, 过 2 mm 土壤筛, 用 vario MACRO cube 元素分析仪

(德国) 分析土壤全氮 (N, %) 和全碳 (C, %)。碳氮比 ($\text{C/N} = \text{全碳}/\text{全氮}$)。

1.3 数据统计分析

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 $\alpha = 0.05$, 若 $P_{K-S} > 0.05$, 则认为数据服从正态分布; 如果 $P_{K-S} < 0.05$ 则需要将数据经过对数转换后进一步进行地统计学分析。采用相关分析方法分析土壤呼吸速率与环境因子、土壤特性和生物因子的相关关系; 采用逐步回归进行 R_s 与 L_w 、 L_m 、C、N 和 C/N 等因子的多元回归模拟; 采用主成分分析提取影响土壤呼吸的主成分。以上分析均利用 SPSS 17.0 软件完成。

用 GS + 7.0 (Gamma Design Software, Inc.) 地统计学软件进行半方差函数模型拟合和参数计算。一定概率下样本的试验误差 (D , %) 与取样数量 (N) 的关系用以下公式分析^[19, 22]:

$$D = \sqrt{N} \times CV \times T$$

式中, T 为不同取样数量在相应概率水平和自由度下 t 检验的临界值, CV 为变异系数 (%), N 为实际取样数量。

2 结果与分析

2.1 传统统计分析结果

3 种取样尺度下土壤呼吸和各种影响因子的统计分析结果见图 2, 其中 R_s 、 T_{10} 、 W_s 、 L_w 、 L_m 、C、N 和 C/N 分别代表土壤呼吸 [$(\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1})$, 以 CO_2 计]、10 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。可以看出, C/N、C、N、 L_m 、 L_w 、 W_s 的平均值随着取样间隔的减小而减小, 其减小幅度分别为 7.4%、18.6%、20.0%、39.3%、14.9% 和 13.6%; T_{10} 随着取样间隔的减小而增大, 增加了 4.1%; R_s 的平均值从 4 ~ 1 m 取样间隔, 呈现出了先增加后略微减低的趋势。方差分析表明, 3 个取样间隔下的 R_s 、 W_s 和 L_w

无显著差异, 1 m 尺度下的 C/N 、 C 、 N 、 L_m 显著低于 4 m 尺度的、而 T_{10} 则高于 4 m 尺度的(图 2). R_s 、 W_s 、 L_w 、 C 、 N 的变异系数均是随着取样间隔的减小而减小, 而 L_m 的变异系数则随着取样间隔的增大而减小. 以上分析表明, 在较大的间隔下 R_s 、 W_s 、 L_w 、 C 和 N 的空间异质性较大, 而 L_m 则是在较小的间隔下空间异质性较大.

不同取样尺度下土壤呼吸与环境因子的简单相关分析表明(表 1), 4 m 取样间隔下 R_s 与 W_s 、 L_w 、 C 、 C/N 呈极显著正相关, 与 N 呈显著性正相关, 而与其他因子的相关性都不显著($P > 0.05$); 2 m 取样间隔下, R_s 仅与 T_{10} 呈显著性负相关, 相关系数为 -0.58 ; 1 m 取样间隔下, R_s 与各影响因子的相关系数都不显著. 以上结果表明在不同取样间隔下, 影响 R_s 空间变异的关键因子不同, 针阔混交林在较大间隔上受到 W_s 、 L_w 、 C 和 C/N 影响, 在中等间隔上受 T_{10} 影响最明显, 而在较小间隔下各因子对 R_s 的影响都不明显. 逐步回归分析表明, 4 m 和 2 m 取样间隔下的关系模型分别为 $R_s = -0.077 +$

$0.057L_w + 0.457T_{10}$ 和 $R_s = 11.356 - 0.446T_{10}$; 复相关系数分别为 0.379 ($P = 0.002$) 和 0.109 ($P = 0.049$); 1 m 尺度上 R_s 与环境因子关系不显著. 主成分分析表明(表 2), 4 m 间隔下代表土壤底物供应的主成分 1(C 、 N 和 C/N)能解释 R_s 空间变异的 51.73%, 由 T_{10} 组成的主成分 2 能解释 R_s 空间变异的 15.11%, 主成分 3(L_m)能解释 R_s 空间变异的 11.63%, 3 个主成分累计能解释 R_s 空间变异的 78.47%; 2 m 间隔下, 代表土壤底物供应的主成分 1(C 、 N)能解释 R_s 空间变异的 32.03%, 由 T_{10} 和 C/N 组成的主成分 2 能解释 R_s 空间变异的 28.54%, 由 W_s 组成的主成分 3 能解释 R_s 空间变异的 12.43%, 3 个主成分累计能解释 R_s 空间变异的 73.00%. 1 m 间隔下主成分分析表明, 代表土壤底物供应的主成分 1(C 、 N)能解释 R_s 空间变异的 34.83%, 代表环境因子的主成分 2(T_{10})能解释 R_s 空间变异的 21.98%, 由 W_s 代表的主成分 3 能解释 R_s 空间变异的 16.47%, 3 个主成分累计能解释 R_s 空间变异的 73.28%.

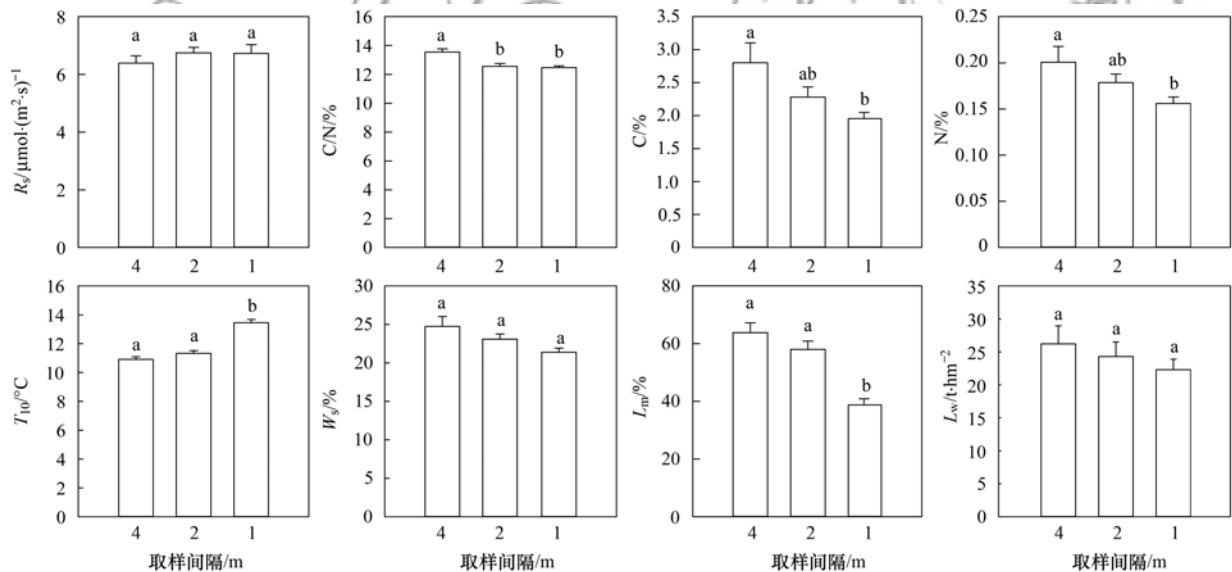


图 2 不同取样尺度的土壤呼吸及其影响因子值(平均值 $\pm$ 标准差)

Fig. 2 Mean of the soil respiration and controlling factors at the different sampling scales

表 1 不同取样间隔下土壤呼吸与影响因子的相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficient of the soil respiration with influencing factors at the different sampling scales

取样间隔/m	W_s /%	$T_{10}/^{\circ}\text{C}$	$L_w/t\cdot\text{hm}^{-2}$	L_m /%	C /%	N /%	C/N
4	0.47 **	0.19	0.52 **	-0.03	0.45 **	0.42 *	0.56 **
2	-0.07	-0.58 **	0.06	0.25	-0.20	-0.20	-0.39
1	-0.13	-0.19	0.37	0.37	0.22	0.26	0.14

1) * 表示显著性水平 0.05; ** 表示显著性水平 0.01

2.2 地统计分析

偏基台值和基台值的比值 [$C/(C_0 + C)$] 能反映系统变量的空间自相关程度. 4 m 取样间隔下, R_s 、 W_s 、 T_{10} 、 L_w 、 C/N 的 [$C/(C_0 + C)$] 值都大于

75%, 表明这些因子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是由气候、地形和土壤母质等结构因素引起; L_m 、 C 、 N 的 [$C/(C_0 + C)$] 值在 25% ~ 75% 之间, 表明

表 2 不同取样间隔下主成分分析结果

Table 2 Results of the principal component analysis at the four sampling scales

主成分	4 m			2 m			1 m			
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
特征值	4. 656	1. 36	1. 047	2. 882	2. 569	1. 119	3. 134	1. 978	1. 482	
贡献率/%	51. 733	15. 106	11. 631	32. 027	28. 544	12. 435	34. 825	21. 981	16. 469	
累计贡献率/%	51. 733	66. 839	78. 47	32. 027	60. 571	73. 006	21. 981	56. 806	73. 275	
特征向量	W_s	0. 606	0. 156	-0. 335	-0. 265	0. 128	0. 763	0. 513	0. 232	-0. 605
	T_{10}	-0. 361	0. 800	0. 168	-0. 322	0. 795	0. 346	0. 077	0. 743	0. 499
	L_w	0. 784	0. 064	-0. 025	-0. 342	-0. 424	0. 092	0. 321	-0. 573	0. 391
	L_m	0. 043	-0. 193	0. 926	0. 377	-0. 619	0. 487	0. 697	-0. 224	0. 366
	C	0. 932	-0. 071	0. 119	0. 906	0. 152	-0. 088	0. 854	0. 262	-0. 282
	N	0. 953	-0. 134	0. 058	0. 958	0. 165	-0. 016	0. 908	0. 155	-0. 269
	C/N	0. 852	0. 292	0. 133	-0. 172	0. 878	-0. 247	0. 433	0. 67	0. 511
	R_s	0. 561	0. 664	0. 07	-0. 211	-0. 727	-0. 247	0. 443	-0. 429	0. 407

这些因子具有中等程度的空间自相关性，随机部分引起的 L_m 、C 和 N 的空间异质性分别占 29%、67%、25%，结构因素占 71%、33%、75%。2 m 取样间隔下， W_s 、 T_{10} 、C、N、C/N 的 $[C/(C_0 + C)]$ 值都大于 75%，表明这些因子具有较强的空间自相关性，几乎不受随机因素的影响； L_m 具有中等程度的空间变异， R_s 和 L_w 的 $[C/(C_0 + C)]$ 值均小于 25%，表明它们的自相关性程度弱，受到随机因子的影响大。1 m 取样间隔下，只有 L_m 和 C/N 具有强的自相关性， T_{10} 、C、N 具有中等程度的自相关性，而 R_s 、 T_{10} 、 L_w 的自相关性都比较弱，说明在较小的取样间隔下 R_s 、 T_{10} 、 L_w 受随机因素引起的空

间变异较大(表 3)。

变程作为空间异质性研究的有效参数^[27]，是描述变量属性相似范围的一种指标，其值大小对 R_s 测定点的有效设计具有重要的指导意义^[28]。在变程范围内，变量具有空间自相关性，而超出变程则不具有空间自相关性。在 4 m 取样间隔下， R_s 变程为 16.84 m，其余因子的变程都在 6~23 m，其中大部分变程集中在 14~17 m 之间；在 2 m 取样间隔下，所有因素都在 2~11 m 范围内；在 1 m 取样间隔下，只有 C/N 的变程为 8.94 m，其余均为 4.23 m。综合来看，大部分土壤指标随着取样间隔的减小，变程也在减小。但 W_s 、C 和 C/N 的规律不同，

表 3 土壤呼吸及其影响因子的变异函数模型及其参数

Table 3 Parameters of the theoretical models for soil respiration and its influencing factors

取样间隔/m	土壤指标	模型	块金值	基台值	偏基台值/基台值	变程	决定系数	离差平方和
4	R_s	线	0. 767	2. 45	0. 886	16. 84	0. 99	$2. 84 \times 10^{-4}$
	W_s	球	7. 7	46. 75	0. 835	6. 53	0. 217	43
	T_{10}	线	0. 001	1. 63	0. 999	16. 4	0. 995	0. 036 3
	L_w	线	0. 1	324. 87	1	16. 84	0. 984	640. 1
	L_m	球	112. 4	382. 3	0. 706	13. 85	0. 726	4 254
	N	线	0. 006	0. 01	0. 333	16. 84	0. 774	$7. 91 \times 10^{-7}$
	C	指数	0. 702	2. 75	0. 745	14. 4	0. 74	0. 099 2
	C/N	球	0. 035	1. 85	0. 981	15. 91	0. 968	0. 021 8
2	R_s	线	1. 122	1. 43	0. 214	8. 45	0. 151	0. 029 8
	W_s	球	3. 47	14. 65	0. 763	2. 37	0	0. 911
	T_{10}	球	0. 106	1. 66	0. 936	10. 43	0. 989	$5. 59 \times 10^{-3}$
	L_w	线	149. 1	189. 78	0. 021 4	8. 45	0. 000 1	800. 9
	L_m	线	195. 1	342. 64	0. 431	8. 45	0. 467	6 422
	N	球	0. 000 1	0. 003	1	4. 46	0. 388	$7. 65 \times 10^{-7}$
	C	球	0. 079	0. 90	0. 912	3. 9	0. 16	0. 115
	C/N	球	0. 256	1. 475	0. 826	3. 93	0. 317	0. 098 2
1	R_s	线	1. 79	2. 151	0. 168	4. 23	0. 346	0. 797
	W_s	线	9. 89	11. 88	0. 168	4. 23	0. 426	20. 27
	T_{10}	线	0. 758	2. 15	0. 648	4. 23	0. 889	0. 067 6
	L_w	线	84. 8	101. 89	0. 168	4. 23	0. 348	3 919
	L_m	线	29. 2	219. 85	0. 867	4. 23	0. 996	36. 94
	N	线	0. 001	0. 002	0. 5	4. 23	0. 662	$3. 02 \times 10^{-7}$
	C	线	0. 115	0. 42	0. 726	4. 23	0. 689	0. 011
	C/N	指数	0. 104	0. 64	0. 837	8. 94	0. 92	$2. 83 \times 10^{-3}$

1 m 取样间隔的变程大于 2 m 取样间隔,说明在该地区 W_s 和 C 的分布不规律,受到地形与植被的影响。

2.3 不同尺度下的取样数量与测定准确性

土壤呼吸的空间变异给确定具有代表性的平均土壤呼吸值带来不确定性。因此准确确定一个区域或样地的土壤呼吸的代表值成为土壤呼吸研究的主要内容之一^[19, 22, 24]。不同取样尺度下,随机取样数量分别为 3、6、9、12、15、18、21、24、27、30、33 和 36 (4 m 尺度为 30) 计算的估计误差见图 3。可以看出,同一置信水平下相同取样数量随着取样尺度

的减小,估计误差降低。同一取样尺度下,每增加 1 个样点土壤呼吸的估计误差降低的速率从 3 个增加到 6 个时下降的速度最快,9 个以上时每增加 1 个采样点估计误差减低的速率都低于 1%。95% 置信水平下,2 m 和 1 m 取样尺度时 9 个样本产生的土壤呼吸误差在 $\pm 12\%$ 左右,而 4 m 尺度的误差为 $\pm 16\%$; 90% 置信水平下,2 m 和 1 m 取样尺度时 9 个样本产生的误差在 $\pm 10\%$ 以内,4 m 尺度则为 $\pm 13\%$ 。因此本研究认为在本样地,用 Li cor-6400 进行土壤呼吸测定时应该至少设置 9 个测定重复,即 9 个 PVC 环。

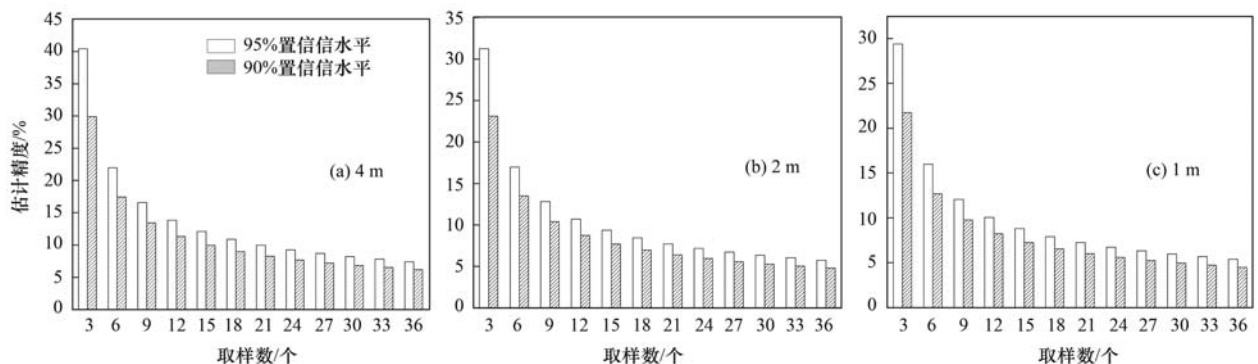


图 3 不同取样尺度取样数量下的土壤呼吸估计误差

Fig. 3 Estimated error of R_s at different sampling intervals and sampling numbers

3 讨论

3.1 土壤呼吸空间变异的影响因子

变异系数是数据系列变异程度的表征。本研究中土壤呼吸以及环境因子的空间变异程度的平均值大小排列顺序为: L_w 、 C 、 N 、 L_m 、 W_s 、 R_s 和 T_{10} 。取样期间 T_{10} 的变异程度最小, 3 种取样尺度均为 10%, 说明在郁闭度高的森林 T_{10} 的空间变化较小, 不是影响土壤呼吸空间变化的主要因素^[29]。 R_s 的变异程度主要取决于底物的空间分布情况, 而受土壤水分和温度的影响较小^[30]。随取样尺度的减小, 底物的影响减弱(表 1), 可能与小尺度条件下底物因子的均一性较好、变异程度减低有关^[31]。本研究 R_s 的变异系数位于已有报道值的较低值区域。样地尺度上 R_s 的变异程度与植被类型有关, 因为不同类型的植被具有不同的生物结构, 导致不同底物供应质量和不同非生物因素如土壤温度和水分的差异。寒温带针叶林的变异系数从 23% ~ 36%^[32]、杨树人工林从 5.7% ~ 42.6%^[33]、热带雨林从 2% ~ 62%^[7, 20]。在同一地区, 相同取样尺度下亚高山草甸的土壤呼吸空间变异在 21% ~ 24% 之间, 而落叶松人工林地土壤呼吸的空间变异达 35%, 但其土壤温度和水分的空间变异性均低于 13%^[27, 34]。这

些结果不仅表明土壤呼吸空间变异性与环境因子的复杂性, 更说明要准确估算区域土壤碳通量值对不同类型植被进行空间异质性研究的必要性。

森林生态系统土壤呼吸的空间变化受许多因素的影响。植被类型、土壤性质、气候变化和微生物群落结构等因素都与土壤呼吸的空间变化有关^[32], 而且在不同时间、不同气候条件下、不同取样距离下的空间变异性不同, 在不同的空间取样间隔下影响土壤呼吸变异的主要因子也不同。Martin 等^[4]在 0.1、1 ~ 10 和 100 ~ 1 000 m 这 3 种尺度对影响土壤呼吸的潜在源进行分析表明, 小尺度上的土壤呼吸主要受土壤容重、细根和凋落物量影响, 中尺度上与地上生物量、根生物量和碳氮库呈显著正相关, 大尺度上的土壤呼吸主要受土壤水分和土壤特征影响。Stoyan 等^[35]在一个杨树林的研究表明, 在 2 m × 2 m 范围内影响土壤呼吸的主要因素是植被根系与凋落物。本研究中, 4 m 取样间隔下, 土壤呼吸与凋落物量呈极显著正相关; 但在 2 m 和 1 m 取样间隔下, 与植被根系和凋落物的相关性并不显著, 可能是由于在较小的取样间隔下, 底物供应, 如凋落物、C、N 的空间异质性并不明显造成的。在中国西双版纳对热带雨林研究表明, 20 m 取样间隔下土壤呼吸在干季与土壤温度极显著正相关, 在

湿季与土壤湿度极显著负相关^[7], 而与凋落物、根生物量和胸径的关系不显著. 本研究中, 4 m 取样间隔下土壤呼吸与土壤水分呈极显著正相关, 2 m 取样间隔下土壤呼吸与土壤温度呈极显著负相关, 1 m 取样间隔下土壤呼吸与其他影响因子的相关性都不显著, 与 Song 等^[7]的研究结果相一致. 2 m 尺度的土壤温度与土壤呼吸呈显著负相关, 与其他因素的关系均不显著(表 1), 可能由于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^[24]. 其他学者的研究同样表明, 不同区域环境因子的差异导致土壤呼吸变异的影响因子也不同^[23]. 综上所述, 该样地的土壤呼吸在不同取样间隔下分别受到不同因素的影响, 在较大取样间隔下受到土壤水分、土壤全碳、土壤全氮、碳氮比和凋落物量的影响; 在中等取样间隔下, 受到土壤温度的影响; 在较小取样间隔下, 与所有影响因子的相关性均不显著. 同时说明这些影响因子可能是通过交互作用影响土壤呼吸, 需要进一步研究.

3.2 不同尺度下取样数量的土壤呼吸准确性

受样地底物供应以及植被特性的空间异质性影响, 样地尺度上不同植被类型的土壤呼吸都表现出明显的空间差异性. 样地尺度的土壤呼吸的“真值”是区域土壤呼吸计算的前提条件, 包括在不同时间和空间尺度^[21, 35]. 气室法仍然是目前应用最广泛的土壤呼吸测定方法, 样地中气室的重复数量决定了测定结果的可靠程度. 受人力资源的限制, 多数研究用 10 个或少于 10 个取样点的样本均值来代表土壤呼吸的平均值(4~5 个^[3, 36, 37], 18 个^[38]). 在植被类型、土地利用和地形变化较大区域, 利用分层取样代替随机取样可以降低土壤呼吸的测定误差, 但分层变量的因子取决于影响土壤呼吸空间变化的主导梯度因子(如地形^[37]、海拔^[39]和植被^[40]等). Davidson 等^[41]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, 他们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. Fóti 等^[24]在匈牙利布高茨地区的研究表明, 在 95% 置信区间、±10% 误差内的样品的最佳取样数量在 7~36 个之间变化, 取样数目取决于土壤含水量, 干旱的条件下需要更多的样本数量. 许多研究也表明, 由 CV 确定的取样数量更加可信, 当 CV < 10%、CV 为 10%~20%、CV 为 20%~30% 和 CV > 30% 时, 计算取样数量的公式中 k 值分别取 5%、10%、15% 和 20%^[42, 43]. 本研究中, 要保证土壤呼吸在 90% 置信区间的试验误差小于 10% 的要求, 应该放置 9 个以上土壤呼吸测定环.

4 结论

(1) 3 个取样间隔下研究区针阔混交林 R_s 的均值没有显著差异, 其变异程度随着取样尺度的增大而增大, 变异系数在 16%~22% 之间.

(2) 不同取样间隔下, 影响 R_s 的主要因子不同. 在 4 m 取样间隔下, R_s 的空间变异主要受 W_s 、 L_w 、C、N 和 C/N 的影响; 在 2 m 取样间隔下, R_s 与 T_{10} 呈极显著负相关($P < 0.01$); 在 1 m 取样间隔下, R_s 与其他影响因子的相关性都不显著.

(3) 随着取样尺度的减小, R_s 的空间自相关性逐渐减弱, 由高度自相关变为弱相关, 表明随着采样距离的减小, 结构因素所起的作用减弱, 随机因素所起的作用逐渐增大.

(4) 95% 置信水平下, 2 m 和 1 m 取样尺度时 9 个样本产生的土壤呼吸误差在 ±12% 左右, 而 4 m 尺度的误差 ±16%; 90% 置信水平下, 2 m 和 1 m 取样尺度时 9 个样本产生的误差在 ±10% 以内, 4 m 尺度则为 ±13%. 同一置信水平下相同取样数量随着取样尺度的减小, 估计误差降低.

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] Liang N S, Nakadai T, Hirano T, *et al.* In situ comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **123**(1-2): 97-117.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [6] Chen S T, Zou J W, Hu Z H, *et al.* Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: summary of available data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **198-199**: 335-346.
- [7] 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**(1): 65-72.
- [8] Riveros-Iregui D A, McGlynn B L. Landscape structure control on soil CO₂ efflux variability in complex terrain: scaling from point observations to watershed scale fluxes[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, **114**(G2): G02010.
- [9] Sheng H, Yang Y S, Yang Z J, *et al.* The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China[J].

- Global Change Biology, 2010, **16**(3): 1107-1121.
- [10] Fu X L, Shao M G, Wei X R, *et al.* Soil respiration as affected by vegetation types in a semiarid region of China [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2013, **59**(5): 715-726.
- [11] Br  chet L, Ponton S, Alm  ras T, *et al.* Does spatial distribution of tree size account for spatial variation in soil respiration in a tropical forest? [J]. Plant and Soil, 2011, **347**(1-2): 293-303.
- [12] 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.
- [13] Shi B K, Gao W F, Cai H Y, *et al.* Spatial variation of soil respiration is linked to the forest structure and soil parameters in an old-growth mixed broadleaved-Korean pine forest in northeastern China [J]. Plant and Soil, 2016, **400**(1-2): 263-274.
- [14] Suchewaboripont V, Ando M, Yoshitake S, *et al.* Spatial upscaling of soil respiration under a complex canopy structure in an old-growth deciduous forest, central Japan [J]. Forests, 2017, **8**(2): 36.
- [15] Li Y Q, Xu M, Zou X M. Heterotrophic soil respiration in relation to environmental factors and microbial biomass in two wet tropical forests [J]. Plant and Soil, 2006, **281**(1-2): 193-201.
- [16] 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.
- [17] 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.
- Chen S T, Hu Z H, Zhang Y, *et al.* Review of the factors influencing the temporal and spatial variability of soil respiration in terrestrial ecosystem [J]. Environmental Science, 2011, **32**(8): 2184-2192.
- [18] 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.
- Chen S T, Liu Q H, Hu Z H, *et al.* Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes [J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 1017-1025.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Perez-quezada J F, Brito C E, Cabezas J, *et al.* How many measurements are needed to estimate accurate daily and annual soil respiration fluxes? Analysis using data from a temperate rainforest [J]. Biogeosciences, 2016, **13**(24): 6599-6609.
- [22] Rodeghiero M, Cescatti A. Spatial variability and optimal sampling strategy of soil respiration [J]. Forest Ecology and Management, 2008, **255**(1): 106-112.
- [23] Oishi A C, Palmroth S, Butnor J R, *et al.* Spatial and temporal variability of soil CO₂ efflux in three proximate temperate forest ecosystems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, **171-172**: 256-269.
- [24] F  ti 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 严俊霞, 李洪建, 李君剑, 等. 山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 [J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1793-1801.
- Yan J X, Li H J, Li J J, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a planted larch forest in Shanxi Plateau [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1793-1801.
- [28] 秦璐, 吕光辉, 张雪妮, 等. 干旱区艾比湖湿地土壤呼吸的空间异质性 [J]. 干旱区地理, 2014, **37**(4): 704-712.
- Qin L, Lv G H, Zhang X N, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration at Ebinur Lake wetland nature reserve in arid area [J]. Arid Land Geography, 2014, **37**(4): 704-712.
- [29] 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.
- [30] Metcalfe D, Meir P, Arag  o L E O C, *et al.* Sample sizes for estimating key ecosystem characteristics in a tropical *terra firme* rainforest [J]. Forest Ecology and Management, 2008, **255**(3-4): 558-566.
- [31] 严俊霞, 李洪建, 李君剑. 庞泉沟自然保护区针阔混交林土壤呼吸的空间异质性 [J]. 生态学报, 2015, **35**(24): 8184-8193.
- Yan J X, Li H J, Li J J. Spatial heterogeneity of soil respiration in a conifer-broadleaf mixed forest in the Pangquangou Nature Reserve Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(24): 8184-8193.
- [32] 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等. 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征 [J]. 生态学报, 2013, **33**(23): 7516-7524.
- Jia B R, Zhou G S, Jiang Y L, *et al.* Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(23): 7516-7524.
- [33] 闫美芳, 张新时, 周广胜. 不同树龄杨树 (*Populus balsamifera*) 人工林的土壤呼吸空间异质性 [J]. 生态学杂志, 2013, **32**(6): 1378-1384.
- Yan M F, Zhang X S, Zhou G S. Spatial heterogeneity of soil respiration in *Populus balsamifera* plantation at different developmental stages [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(6): 1378-1384.
- [34] 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 等. 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 [J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4313-4320.
- Li H J, Gao Y F, Yan J X, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a subalpine meadow at different sampling scales [J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4313-4320.
- [35] Stoyan H, De-Polli H, B  hm S, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale [J]. Plant and Soil, 2000, **222**(1-2): 203-214.
- [36] 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.
- [37] Shi W Y, Du S, Morina J C, *et al.* Physical and biogeochemical controls on soil respiration along a topographical gradient in a

- semiarid forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **247**: 1-11.
- [38] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ 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.
- [39] Yan J X, Hao Z, Li J J, *et al.* Soil respiration characteristics in three Shrublands along an elevation gradient in a semiarid Loess Plateau mountain Area[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, **48**(9): 977-988.
- [40] Euskirchen E S, Chen J Q, Gustafson E J, *et al.* Soil respiration at dominant patch types within a managed Northern Wisconsin landscape[J]. *Ecosystems*, 2003, **6**(6): 595-607.
- [41] 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.
- [42] 姚淑霞, 张铜会. 随机抽样必要样本容量的确定方法及其应用[J]. *干旱区研究*, 2012, **29**(3): 547-552.
- Yao S X, Zhang T H. A method for determining necessary sample size in random sampling and its application [J]. *Arid Zone Research*, 2012, **29**(3): 547-552.
- [43] 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.
- Yang Q Y, Zeng F. A research on spatial variability of forest soil and determining number of sample [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, **11**(3): 54-56.

环境科学

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i>	(1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i>	(11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i>	(24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i>	(33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i>	(55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i>	(76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i>	(86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i>	(104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i>	(114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i>	(121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i>	(126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i>	(149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i>	(157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i>	(164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue	(192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i>	(200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i>	(211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i>	(219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i>	(228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan	(239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i>	(256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i>	(263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i>	(273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i>	(281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i>	(293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i>	(300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i>	(310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i>	(318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i>	(336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i>	(360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i>	(369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i>	(376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i>	(383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i>	(392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i>	(412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i>	(421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i>	(437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping	(445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong	(461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i>	(480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i>	(488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i>	(496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i>	(504)