#### DOI: 10.5846/stxb201501060044

江雨佳,王国英,莫路锋.基于湿度分布特征的小尺度土壤碳通量空间采样策略.生态学报,2016,36(19):6246-6255. Jiang Y J, Wang G Y, Mo L F.A sampling strategy for fine-scale regional soil carbon flux estimation based on spatial distribution of soil moisture. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19):6246-6255.

# 基于湿度分布特征的小尺度土壤碳通量空间采样策略

江雨佳<sup>1,2</sup>, 王国英<sup>1,3</sup>, 莫路锋<sup>1,3,\*</sup>

1 浙江农林大学信息工程学院,临安 311300

2 绍兴市市政工程管理处, 绍兴 312000

3 西安交通大学电子与信息工程学院,西安 710049

**摘要:**由于土壤碳通量的空间异质性很强,传统的随机抽样方法无法对区域土壤碳通量进行准确估算,而多点采样需耗费大量的人力及设备成本,因此确定适当的采样点数量及分布策略对于区域土壤碳通量的测算非常重要。提出一种基于湿度空间分布特征的小尺度土壤碳通量空间采样策略:首先利用无线传感网密集测量区域的土壤湿度,根据湿度数据的空间分布特征划分监测区域,通过 Hammond McCullagh 方程计算各子区域内的最优采样点数量,最终确定整个监测区域的空间采样点部署策略。 提出的方法考虑了各子区域间土壤碳通量空间分布的差异,使得采样点的部署位置与土壤碳通量的分布具有较好的相关性。 研究结果证明:土壤碳通量部署策略能够获得比均匀部署策略、随机部署策略更高的区域土壤碳通量估算准确度。 关键词:土壤呼吸;采样策略;碳通量;土壤湿度

# A sampling strategy for fine-scale regional soil carbon flux estimation based on spatial distribution of soil moisture

JIANG Yujia<sup>1,2</sup>, WANG Guoying<sup>1,3</sup>, MO Lufeng<sup>1,3,\*</sup>

1 School of Information Engineering, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

2 Shaoxing Municipal Engineering Administration Department, Shaoxing 312000, China

3 School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: Soil respiration is a key ecological process during which  $CO_2$  is emitted from the soil and released into the atmosphere. It includes processes such as soil microbial respiration, root respiration, and respiration of heterotrophic animals. The regional soil carbon flux cannot be accurately estimated using traditional random sampling methods, because of its strong spatial heterogeneity. Because multi-point sampling involves massive manpower and equipment costs, it is crucial to determine the appropriate number and the distribution of sampling positions to include in studies estimating regional soil carbon flux. As a complex ecological process, soil respiration is not only affected by environmental factors such as soil temperature and humidity but also by biological factors such as vegetation, microorganisms, and land usage. Because of the correlation between soil respiration and soil moisture, we propose a spatial sampling strategy based on soil moisture data are collected using densely deployed sensors nodes, and the monitored area is divided into several sub-regions according to the spatial distribution of the soil moisture data. Then, the optimal number of sampling positions in each sub-region is calculated using the Hammond McCullagh method. As a result, the optimal sampling strategy of the whole

**基金项目:**国家林业局 948 项目(2013-4-71);国家自然科学基金项目(61303236);浙江省科技计划项目重大科技专项(2012C13011-1);浙江省 新苗人才计划项目(2013R412052)

收稿日期:2015-01-06; 网络出版日期:2016-01-15

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: molufeng@ gmail.com

http://www.ecologica.cn

monitoring area is determined. We simultaneously applied the SMTC method, random sampling strategy, and uniform sampling strategy to estimate the regional soil carbon flux. In the experiment, we determined that 23 sampling points would be required to measure soil carbon flux in the monitored area, according to the SMTC method. In the same experimental environment, 23 sampling points were selected using a random sampling strategy, and 25 sampling points arranged in a 5 m × 5 m grid pattern were selected using a uniform sampling strategy. Regional soil carbon flux is determined via interpolation using the Kriging method based on the measurements taken at all sampling points by using each strategy described above. The experimental results show that SMTC performs better than the other two sampling strategies. The mean squared errors of SMTC, random sampling strategy, and uniform sampling strategy were 8.78%, 13.32%, and 11.56%, respectively. Furthermore, the SMTC method also produced the smallest mean squared error among these three strategies. The SMTC strategy takes the variation of the soil carbon flux among various sub-regions into account, which leads to a better correlation between sampling positions and the distribution of soil carbon flux. Using the SMTC strategy, more sampling points are selected in regions where the soil carbon flux is strongly heterogeneous, allowing the heterogeneity to be captured more fully, and allowing the estimation error to be reduced. In addition, it allows for the use of fewer sampling points in regions of weak heterogeneity. Thus, the SMTC sampling strategy can be used for fine-scale regional soil carbon flux estimation, needing comparatively fewer sampling points because of its strategy of setting each sampling point in a more optimal position than traditional methods.

Key Words: soil respiration; sampling strategy; carbon flux; soil moisture

随着传感器技术与气体动力学的发展,单点的土壤呼吸测量水平已经达到令人基本满意的程度,但到目前为止,区域土壤呼吸的准确估算仍是难题。区域测量通常采用实测和遥感两类方法,现阶段遥感和模型相结合是研究区域碳收支的重要手段<sup>[1-3]</sup>。遥感模型的推算结果与模型算法的精确性、卫星观测成像频率等有关,估算碳通量的不确定性大<sup>[4]</sup>。通过直接测定土壤碳通量的方法能够保证区域土壤碳通量估算的精确性,但植被、土壤基质等影响土壤碳通量的因素存在空间异质性<sup>[5]</sup>,同时在具有空间异质性的土壤温度、湿度的共同作用下,因此土壤碳通量表现出极其强烈的空间异质性<sup>[6-8]</sup>。这种空间异质性导致距离相近的采样点的呼吸速率可能相差很大。为了准确估算区域的土壤碳通量,采样点的部署策略至关重要。

目前国内外估算区域碳通量的采样策略存在精确度较低的缺点,主要是运用规则网格或随机采样等方法 布设采样点,通过简单的统计方法,直接计算出区域碳通量<sup>[9]</sup>。刘源月等<sup>[10]</sup>在研究亚热带典型森林生态系统 的土壤碳通量中,使用简单随机采样方法,将测量数据的均值作为区域的土壤碳通量。该方法忽略了土壤碳 通量的空间异质性,少量采样点的碳通量均值不能代表整个区域的土壤碳通量。通过这类方法获得的区域土 壤通量的估算结果误差较大<sup>[11-13]</sup>。

土壤湿度作为土壤呼吸的关键影响因子,其空间异质性与土壤碳通量的空间异质性密切相关。Forti 等<sup>[14]</sup>在黄土草原生态系统的研究中发现水分含量较低时,土壤呼吸的空间模型主要依赖于土壤湿度。 Balogh 等<sup>[15]</sup>发现在干旱草地环境中,土壤呼吸的非生物影响因子,如土壤湿度,对其变化起到了近 80%的作 用。Chen 等<sup>[16]</sup>在中国北部温带草原生态系统的研究中发现土壤湿度等非生物因子比植物生长等生物因子 对土壤呼吸空间异质性的作用更突出。Maestre 等<sup>[17]</sup>研究发现,土壤湿度可以说明西班牙半干旱草原土壤 CO<sub>2</sub>释放小尺度上的空间变异情况。Conant 等<sup>[18]</sup>发现影响亚利桑那州 3 种半干旱生态系统土壤碳通量最重 要的因素是土壤湿度。土壤湿度一方面通过影响微生物和植物根系的生理学过程对土壤呼吸直接产生作用, 另一方面通过影响底物和氧气扩散间接产生作用<sup>[19]</sup>。土壤湿度对土壤呼吸的影响非常重要,在干旱或半干 旱地区,土壤湿度作为胁迫因子转变为土壤呼吸的主控变量<sup>[20]</sup>。土壤湿度参数过高时,土壤间隙缩小,氧气 和 CO<sub>2</sub>的流通受阻,异养呼吸的吸收与排放受限<sup>[21]</sup>,导致土壤碳通量骤减。土壤湿度参数过低时,根系呼吸 与微生物呼吸受到抑制,排放的 CO<sub>2</sub>减少,引起土壤碳通量锐减。在小尺度范围内,土壤湿度相对其他土壤呼

36 卷

吸的影响因素,对土壤碳通量的作用尤为显著。因此可考虑采用土壤湿度的空间异质性来表征碳通量的空间 异质性,作为土壤碳通量空间采样策略的依据。

本文提出一种基于湿度空间分布特征的小尺度土壤碳通量空间采样策略(Spatial sampling strategy for fine-scale regional soil carbon flux estimation based on the moisture distribution characteristic, SMTC)。首先利用传感网密集测量区域的土壤湿度,根据湿度数据的空间异质性划分子区域。计算各子区域土壤湿度的变异系数,用变异系数表示土壤湿度的空间异质性。利用土壤碳通量与土壤湿度之间的相关性,将土壤湿度的变异系数作为设置采样点数量的依据,通过 Hammond McCullagh 方程计算各子区域内的最优采样点数量,确定整个研究区域的空间采样策略。

本文的其余部分组织如下:第一节具体描述了土壤碳通量空间采样策略的实现方法;第二节设计了实验 方案;第三节对实验结果进行了分析;第四节从多个方面讨论并评估了该方法的性能。

## 1 基于湿度分布特征的土壤碳通量空间采样策略(SMTC)

SMTC 根据土壤湿度的空间分布特征,将研究区域划分为若干个子区域,计算各子区域内土壤湿度的变异系数。利用土壤湿度的变异系数表征土壤碳通量的空间异质性,应用 Hammond McCullagh 方程计算各子区域的最优采样点数量,确定研究区域的采样策略。

土壤碳通量是一种典型的土壤性质,它是一个复杂、变化不均一的连续体<sup>[22]</sup>,其空间分布一般呈现出区 域分布的特征,表现为整体区域的空间异质性较大,而其中的局部区域的异质性却大大降低。该局部区域土 壤碳通量的异质性较小时,说明该区域的土壤碳通量具有高度一致性,因此局部区域只需要少量的采样点;异 质性较大时,该区域需要大量的采样点。

本研究将空间异质性纳入采样的考虑范围,提出基于湿度分布特征的土壤碳通量采样策略,将整个区域 划分为若干个异质性小的子区域,大幅减少冗余采样,降低采样的成本。首先获取研究区域的土壤湿度分布 数据,绘制土壤湿度空间分布图,利用土壤湿度的变异系数表征碳通量的空间异质性。将研究空间划分为若 干子区域,计算子区域所需的最优采样点数量,确定研究区域的土壤碳通量空间采样部署策略。该方法的工 作流程如图1所示,下文依次介绍图中的几个重要环节:(1)土壤湿度变异性分布;(2)划分子区域;(3)确定 土壤碳通量采样部署策略。



图1 土壤碳通量空间采样策略的流程示意图



# 1.1 土壤湿度的空间分布

目前土壤湿度数据可通过快速反应的传感器获取。本文将土壤湿度数据进行处理,发现土壤湿度在空间 分布上具有连续性和异质性特征,并且具有较大的斑块,格局明显。 1.2 子区域的划分

整体区域的划分采用结合空间位置的 K 均值聚类算法(K-means 算法)。该算法的核心思想是找出 k 个 聚类中心 c<sub>1</sub>,c<sub>2</sub>,...,c<sub>k</sub>,使每一个数据点 x<sub>i</sub>与其最近的聚类中心 c<sub>v</sub>的平方距离和最小化(该平方距离和称为偏 差 D)。具体步骤如下:

(1) 初始化:随机指定 k 个聚类中心;

(2) 分配 x<sub>i</sub>:找到距离每一个样本最近的聚类中心 c<sub>i</sub>,并将其分配到 c<sub>i</sub> 所标明的类;

(3) 修正 cw:将每一个 cw 移动到相对应的类的中心;

(4) 计算偏差:当前聚类状态的偏差按公式(1)进行计算,

$$D = \sum_{i=1}^{n} \left[ \min_{r=1,\dots,k} d(x_i, c_r)^2 \right]$$
(1)

式中,  $x_i$  为土壤湿度采样点;  $c_r$  为第 r 个聚类中心; min: 取最小值函数; d 为采样点到聚类中心的距离。

(5) 检验收敛性:如果 D 值收敛,则返回  $(c_1, c_2, ..., c_k)$ ,终止算法,完成划分。否则返回第(2)步。

1.3 土壤碳通量空间采样策略

完成分区后,设置每一个子区域的采样点数量和采样部署策略。引用 Hammond 等<sup>[23]</sup>的方法计算子区域 内土壤碳通量的采样点数量,即 Hammond McCullagh 方程(公式(2))。假设整个区域为 $\Delta$ ,子区域为 $\Delta_i$ (*i* = 1,2,3,…,*n*),计算各子区域土壤湿度的变异系数 *CV<sub>i</sub>*,优化的采样点数量 *N<sub>i</sub>*的计算公式如下:

$$N_i = \left[\frac{t_{\alpha}CV_i}{D}\right]^2 \tag{2}$$

式中, $t_{\alpha}$ 为 t 检验对应置信水平的值;D 为置信区间;  $CV_i$  为第 i 个子区域的变异系数。

置信区间取 0.9 时,将 N<sub>i</sub> 作为采样点数量,真值落在该区间的可能性为 90%,也可根据所需的精确度计算相应的 N<sub>i</sub>。整个研究区域所需的采样点数量等于子区域优化采样点数量之和。

完成各子区域采样点数量的优化工作后,根据侯建花等<sup>[24]</sup>的方法确定各子区域的采样点部署策略。假 设某个子区域的采样点数量为 n。在子区域的中心位置 O 放置一个采样点,以中心 O 为原点,间隔 α(α= 360°/(n-1))向周边辐射 n-1条线,取射线与边缘的交点与 O 点形成 n-1条线段,在这些线段的 √2/2 长度 处放置其余的 n-1个采样点。采样点数量少于 4 个时,不宜按照上述方法放置采样点。因此本文遵循区域 最大覆盖的原则:样点数量为 3 个时,除中心不设置采样点外,其余采样点按上述方法放置;采样点数量为 2 个时,采样点放置于子区域最长线段的两端,分别位于距离中心 O 点 √2/2 长度处;采样点数量为 1 个时,采 样点放置于中心 O 点处。根据优化的子区域采样点数量以及各子区域对应的空间位置,确定整个研究区域 土壤碳通量的采样部署策略。

## 2 材料与方法

2.1 研究区概况

选取浙江省临安市浙江农林大学的森林生态监测智能空间实验基地(119°43′15″—119°43′21″E,30°15′ 24″—30°15′33″N)作为研究区域。该区域气候特征为中亚热带季风气候,年平均降水量达1613.9 mm,平均气 温为16.4℃,年日照达1847.3 h,森林覆盖率达76.5%,其中分布最广的为红壤土。

# 2.2 实验设计

通常土壤碳通量的自相关距离为3m左右,以此为依据确定研究区域的分辨率为5m×5m。采用网格法 在研究区域中以5m×5m的间隔确定64(8×8)个采样点。利用8台设备同时测量,单个样点测量时间为 5min(预热与准备2min,实测3min),整个测量耗时约1h,基本满足同时测量的要求。连续测量样地3d,测 量时间为中午12:00,土壤呼吸的峰值一般出现在10:00到14:00之间<sup>[25]</sup>,选择12:00作为测量时间相对具 有代表性,取3次测量数据的平均值。

本文获取的是 0—5 cm 表层土壤的土壤湿度,通过数字温湿度传感器 SLHT5-1 采集土壤湿度数据,传感

土壤碳通量的测量方法为开路式的通量测定。本研 究采用徐林等<sup>[26]</sup>研制的土壤碳通量监测仪 Lr100GE-6400,相对误差小于5%。在相同位置同时采集土壤碳通 量数据和土壤湿度数据。测量时调整草地表面、落叶层等 防止气室泄漏,每次采样前1.5h剪掉表面的绿色植物,以 排除植物呼吸对土壤呼吸产生的影响[14,27-28]。

# 3 结果与分析

#### 3.1 实测数据

本文以 matlab 2010 为平台,分析土壤湿度的原始数 据。利用 Excel 建立采样点基本属性数据库,导入数据后 衔接各采样点的空间数据与属性数据,得到土壤湿度的空 间分布图。图2为实测的土壤湿度的空间分布图,表1为 土壤湿度与碳通量的统计特征表。



#### 图 2 土壤湿度的空间分布图



Table 1   Statistical characteristics of soil moisture and carbon flux									
土壤湿度 Soil moisture									
采样点数量 Sample number	极小值 Min value/ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	极大值 Max value/ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	均值 Average value (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Coefficient of variation		
64	23.30 43.79		34.73	4.27	-0.23	-0.28	12.31		
土壤碳通量 Soil carbon flux									
采样点数量 Sample number	极小值   极大值   均值     Min value/   Max value/   Average v.     (µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )   (µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )   (µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		均值 Average value/ (µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosisi	变异系数 Coefficient of variation		
64	64 6.28 13.80 10.2		10.27	1.48	-0.27	0.53	14.41		

表1 土壤湿度与碳通量的统计特征

#### **3.2** SMTC 采样实验结果

根据本文的 SMTC 方法,将研究区域分成 5 个子区域,计算各子区域的采样点数量,设置采样点的位置。 采样部署的划分区域和样点部署位置如图 3 所示。对各子区域进行统计分析,各子区域内的统计信息见 表2。

	Table 2   Distribution characteristics of soil moisture in sub-regions						
子区域 Sub-area	实际的采样数量 Actual sample number	面积比/% Area ratio	平均值/ (m³/m³) Average value	极值/(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) Extremum	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	优化的采样数量 Optimized sample number
1	16	25.00	33.56	26.69	4.88	14.55	7
2	17	26.56	37.44	38.14	4.18	11.17	4
3	8	12.50	31.79	23.30	4.70	14.80	8
4	12	18.75	33.66	33.36	1.84	5.47	1
5	11	17.19	35.57	35.94	2.94	8.26	3

表 2 各子区域土壤湿度的分布特征





由表1可以看出,研究区域的平均土壤湿度为34.73 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,整体区域内部湿度变化较大,变异系数高达 12.31%,具有较强的空间异质性。根据异质性划分各子区域,利用基于空间分布的聚类方法,展现子区域的 变化特征,将内部差异性小的子区域与差异性大的子区域划分开来。如表2所示5个子区域的变异系数分别 为14.55%,11.17%,14.80%,5.47%,8.26%,分别计算得到优化的采样点数量为7,4,8,1,3。由实验结果可 知,变异系数越小,优化的采样点数量越少。

利用克里格插值方法,分别将仪器测量的实测土壤碳通量、SMTC 部署采样模拟实验获得的土壤碳通量, 拟合得到研究区域的土壤碳通量,比较两种方法的土壤碳通量结果。对比结果如图 4 所示,大幅减少采样点 数量的情况下,SMTC 部署采样模拟实验获得的土壤碳通量与实测土壤碳通量的趋势一致。





# 3.3 同其他方法对比

本实验分别运用 SMTC 方法、随机采样策略和均匀采样策略设置测量点,插值拟合监测区域的碳通量。 根据 SMTC 方法的部署方案,各子区域合计需要 23 个采样点。在相同的实验条件下,随机采样取 23 个采样 点,均匀采样取 25(5×5)个采样点,通过分析采样点的碳通量数据,拟合研究区域的土壤碳通量(图 5),比较 3 种方法的实验结果。与实测土壤碳通量(图 4)相比,SMTC 部署采样模拟实验获得的土壤碳通量与实测土 壤碳通量的趋势一致性最好。

本文将实测土壤碳通量数据的拟合结果(图4)作为基准值,得到 SMTC 布局与随机布局、均匀布局这三

6251





图 5 3 种采样方法的土壤碳通量估算结果 Fig.5 Carbon flux estimate results of three sampling methods

种布局策略的估算误差分布图,比较 3 种采样方法的估算准确度。从图 6 可以看出,在研究区域中,与另外两种部署方法的估算误差相比,SMTC 方法的误差最小。同时计算实验数据得出 SMTC、随机采样策略和均匀采样策略的误差均方差分别为 8.78%,13.32%,11.56%,SMTC 方法的误差均方差最小。因此,SMTC 布局与随机布局、均匀布局这 3 种布局策略中,SMTC 布局的估算准确度最高。

通过分析以上实验结果,可以得到以下结论:

(1)采样点数量相同时,随机布局策略、均匀布局策略的误差和误差均方差均比 SMTC 布局策略的大。 SMTC 布局策略明显优于随机布局策略和均匀布局策略。

(2)区域内部差异性较大时,尤其是存在多个极值点的情况下,随机布局策略和均匀布局策略估算的区域土壤碳通量的精确度较低。SMTC 布局策略考虑子区域的异质性,提高了估算土壤碳通量的精确度。

# 4 讨论

# 4.1 不同 k 值对结果的影响

*k*值决定了整个区域的子区域数量,通过实验探讨*k*值对 SMTC 布局策略的影响。分别设置*k*值为 2,3, 4,5,6,7,计算子区域的变异系数,优化采样点数量,实验结果如表 3 所示。子区域数量小于 6 个时,随着子区域数量的增大,整个区域的采样点数量呈现增大的趋势;子区域数量大于 6 个时,整个区域的采样点数量无增大趋势。

子区域数量增加时,子区域内部的变异系数减小,空间异质性降低,因此采样点数量总和不会大幅增加。 在实际测量过程中,子区域数量增大会增加工作量,采样点数量总和受设备成本的限制;子区域数量过少,计



图 6 3 种采样方法的估算误差分布

Fig.6 Estimation error distribution of three sampling methods

算得到的土壤碳通量异质性较大,不能代表整个区域的土壤碳通量。综合以上因素,本文设置子区域数量为 5个是合理的。

Table 3 Effect on the experimental results of the value k									
k 值 k value	1区 Area 1	2区 Area 2	3区 Area 3	4区 Area 4	5区 Area 5	6区 Area 6	7 🗵 Area 7	8区 Area 8	采样点数量总和 Sum of sample number
2	4	4	_	_	_	_	_	_	8
3	7	4	4	—	—	—	—	—	15
4	6	5	2	6	—	—	—	—	19
5	7	4	3	8	1	_	_	—	23
6	6	5	4	7	2	1	_	—	25
7	2	6	3	8	2	1	2	_	24
8	3	1	4	7	2	1	2	4	24

表 3 k 值对实验结果的影响

# 4.2 小尺度土壤碳通量的影响因子

土壤呼吸包括3个生物学过程<sup>[29]</sup>(植物根系呼吸,微生物呼吸和异养土壤动物呼吸)和1个非生物学过程(土壤有机物氧化生成CO<sub>2</sub>)。土壤碳通量除受到土壤湿度的影响外,也受到其他多种因素的交互影响。 自然和人为的干扰经常造成多个影响因素同时改变,对土壤呼吸产生复杂的作用<sup>[19]</sup>。土壤温度、近地面大气 压、群落生物量、土壤有机碳含量和CO<sub>2</sub>浓度等环境因子对土壤呼吸速率产生明显的影响<sup>[30-32]</sup>。研究这些因 素对土壤呼吸的影响时,一般通过不同区域的样地间的差异来实现。但是在小尺度范围内,在影响土壤呼吸 的各因素中,与土壤湿度相比,温度、近地面大气压等其他因素的作用不显著。因此,小尺度范围内土壤湿度 4.3 结论

在小尺度范围内,针对区域土壤碳通量估算的采样点布局问题,本文提出了一种基于土壤湿度空间布局 的采样策略(SMTC)。按照 SMTC 策略布局采样点,验证了 SMTC 布局策略比均匀布局策略和随机布局策略 的估算精确度高。测量区域土壤碳通量时,由于空间异质性的存在,随机采样与均匀采样方法显得十分粗糙。 SMTC 方法更准确的拟合了区域碳通量的分布。综合比较 3 种布局方法,SMTC 对整个区域中子区域的采样 点数量进行了合理的分配,减小了整个研究区域的误差。根据 SMTC 策略,在土壤碳通量异质性较大的区域 中布置较多数量的采样点,能够合理地拟合出该区域的土壤碳通量,较大程度的降低误差;在土壤碳通量异质 性较小的区域中布置较少数量的采样点,对土壤碳通量的估算精确度几乎无影响。由实验结果可知,设置较 少数量的采样点,SMTC 策略可以保证土壤碳通量的估算精确度,降低区域土壤碳通量测算的设备及人力 成本。

#### 参考文献(References):

- [1] 张娜,于贵瑞,赵士洞,于振良.基于遥感和地面数据的景观尺度生态系统生产力的模拟.应用生态学报,2003,14(5):643-652.
- [2] 林文鹏,王臣立,赵敏,黄敬峰,施润和,柳云龙,高峻.基于森林清查和遥感的城市森林净初级生产力估算.生态环境,2008,17(2): 766-770.
- [3] 王臣立,牛铮,郭治兴,丛丕福.基于植被指数和神经网络的热带人工林地上蓄积量遥感估测.生态环境学报,2009,18(5):1830-1834.
- [4] 鲍芳,周广胜.中国草原土壤呼吸作用研究进展.植物生态学报,2010,34(6):713-726.
- [5] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [6] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11-12): 1625-1635.
- [7] Tan W, Sun L, Hu H, Chen X. Effect of fire disturbances on soil respiration of *Larix gmelinii* Rupr. forest in the Da Xing'an Mountain during growing season. African Journal of Biotechnology, 2014, 11(21): 4833-4840.
- [8] 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. Biogeochemistry, 2005, 73(1): 183-207.
- [9] Loescher H, Ayres E, Duffy P, Luo H Y, Brunke M. Spatial variation in soil properties among North American ecosystems and guidelines for sampling designs. PLoS One, 2014, 9(1): e83216.
- [10] 刘源月, 江洪, 邱忠平, 原焕英, 李雅红. 亚热带典型森林生态系统土壤呼吸. 西南交通大学学报, 2009, 44(4): 590-594.
- [11] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, Clark K L. Soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. Plant and Soil, 1998, 205 (2): 135-146.
- [12] Johnson D W, Edwards N T. The effects of stem girdling on biogeochemical cycles within a mixed deciduous forest in eastern Tennessee. Oecologia, 1979, 40(3): 259-271.
- [13] Wiseman P E, Seiler J R. Soil CO<sub>2</sub> efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. Forest Ecology and Management, 2004, 192(2/3): 297-311.
- [14] Fóti S, Balogh J, Nagy Z, Herbst M, Pintér K, Péli E, Koncz P, Bartha S. Soil moisture induced changes on fine-scale spatial pattern of soil respiration in a semi-arid sandy grassland. Geoderma, 2014, 213: 245-254.
- [15] Balogh J, Pintér K, Fóti S, Cserhalmi D, Papp M, Nagy Z. Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO<sub>2</sub> uptake in dry grasslands. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(5): 1006-1013.
- [16] Chen Q S, Wang Q B, Han X G, Wan S Q, Li L H. Temporal and spatial variability and controls of soil respiration in a temperate steppe in northern China. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(2), doi: 10.1029/2009GB003538.
- [17] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a Mediterranean semiarid steppe. Applied Soil Ecology, 2003, 23(3): 199-209.
- [18] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 383-390.
- [19] 张滕, 饶良懿, 吕坤珑, 李会杰. 土壤呼吸影响因素研究进展. 广东农业科学, 2012, 39(8): 64-67.
- [20] Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, Liu G R, Xue M. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and

6255

environmental factors in semiarid grassland. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(1): 119-127.

- [21] 张东秋,石培礼,张宪洲.土壤呼吸主要影响因素的研究进展.地球科学进展,2005,20(7):778-785.
- [22] 高东,鲁绍伟,饶良懿,李佳,张滕,靳阿亮.淮北平原四种土地利用类型非生长季土壤呼吸速率.农业工程学报,2011,27(4):94-99.
- [23] Hammond R, McCullagh P S. Quantitative Techniques in Geography: An Introduction. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1978.
- [24] 侯建花,周国模,王国英,莫路锋.面向区域土壤碳通量估算的多向插值空间采样策略. 生态学报, 2015, (18). http://dx.doi.org/10. 5846/stxb201401290209.
- [25] 龚斌,王风玉,张继平,沃笑,刘伟玲,齐月.中亚热带森林土壤呼吸日变化及其与土壤温湿度的关系.生态环境学报,2013,22(8): 1275-1281.
- [26] 徐林,莫路锋, 宣子蔚, 徐小军, 王圣辉, 周国模. 基于 WSN 的土壤碳通量测量系统. 林业科学, 2013, 49(2): 122-126.
- [27] Fóti S, Balogh J, Nagy Z, Ürmös Z, Bartha S, Tuba Z. Temporal and spatial variability and pattern of soil respiration in loess grassland. Community Ecology, 2008, 9(Supplement 1): 57-64.
- [28] Fóti S, Nagy Z, Balogh J, Bartha S, Acosta M, Czóbel S, Péli E R, Marek M, Tuba Z. Small scale spatial variability and pattern of soil respiration and water content in wet and a dry temperate grasslands and bare soil. Ekologia, 2009, 28(4): 389-398.
- [29] 王兵,姜艳,郭浩,赵广东,白秀兰.土壤呼吸及其三个生物学过程研究.土壤通报,2011,42(2):483-490.
- [30] 冯朝阳,吕世海,高吉喜,刘尚华,林栋.华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究.北京林业大学学报,2008,30(2):20-26.
- [31] 冯文婷, 邹晓明, 沙丽清, 陈建会, 冯志立, 李检舟. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸季节和昼夜变化特征及影响因子比较. 植物生态学报, 2008, 32(1): 31-39.
- [32] Kowalenko C G, Ivarson K C, Cameron D R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils. Soil Biology and Biochemistry, 1978, 10(5): 417-423.