

DOI: 10.5846/stxb201401290209

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, 35(18): - .

Hou J H, Zhou G M, Wang G Y, Mo L F. Spatial sampling layout strategy for regional soil carbon flux estimation based on multiple directional interpolation. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): - .

面向区域土壤碳通量估算的多向插值空间采样策略

侯建花^{1,2}, 周国模^{1,*}, 王国英^{3,4}, 莫路锋^{1,3}

1 浙江农林大学环境与资源学院 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300

2 浙江省景宁县林业局, 景宁 323500

3 浙江农林大学信息工程学院, 临安 311300

4 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049

摘要:区域土壤碳通量的准确测量对陆地生态系统碳循环过程分析具有十分重要的作用。由于土壤碳通量空间异质性强,采用随机抽样的方法无法对区域土壤碳通量进行准确估算,而大范围的多点采样则需要大量的人力及设备成本。本文基于一种自制的仪器,提出了一种递增式采样的多向插值采样策略(MDI Multiple Directional Interpolation):在设定初始采样点的基础上,通过对已有采样点的测量,通过径向插值的方法计算采样点连线交点,将不同径向计算值差异最大的点作为新增采样点,以此逐步增加。通过对 20 幅的 50 * 50 网格区域仿真,结果表明(1)MDI 布局策略能够针对土壤碳通量的变化情况而反馈采样点的疏密。(2)误差分析得出采样点数量($n=10$)较少,MDI 布局策略对碳通量的估算误差比随机布局策略低,比平均布局策略稍高;随采样点增多,三种布局策略误差均降低;采样点数量 $n=40$,MDI 布局策略对碳通量的估算误差(0.028)比平均布局策略的误差(0.32)降低了 12.5%,比随机布局策略的误差(0.04)降低了 30.0%。MDI 布局策略根据土壤碳通量的变化梯度合理分配采样点,降低区域土壤碳通量监测误差。

关键词:多向插值; MDI 采样策略; 土壤碳通量估算

Spatial sampling layout strategy for regional soil carbon flux estimation based on multiple directional interpolation

HOU Jianhua^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,*}, WANG Guoying^{3,4}, MO Lufeng^{1,3}

1 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

2 Jingning Forestry Bureau, Jingning 323500, China

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

4 School of Electronic and Information Engineering, Xi'an JiaoTong University Xi'an 710049, China

Abstract: Soil carbon flux is a vital part of the terrestrial ecosystem carbon cycle. Carbon dioxide released from soil is 10% to 20% of the total amount of that in atmosphere, equal to carbon assimilation by photosynthesis in plant canopies. Thus accurate measurement of regional soil carbon flux is significant for research on carbon cycling in terrestrial ecosystems. Remote data combined with models to analyze regional carbon balance is important but unreliable. The data from direct measurement of soil carbon flux turns to be more accurate. During the measuring process, random sampling results in inaccurate estimates of the regional soil carbon flux because of strong spatial heterogeneity. Another method, multi-point sampling in a wide area, requires much more human labor and equipment costs. However, a wireless sensor net (WSN) is

基金项目:国家自然科学基金重大项目(61190114/F0102); 国家自然科学基金(61303236); 国家林业局 948 项目(2013-4-71); 浙江省科技计划项目重大科技专项(2012C13011-1); 景宁畲族自治县科技计划项目(2014A05-5)

收稿日期:2014-01-29; **网络出版日期:**2014-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhougm@zafu.edu.cn

a new method that has been applied to the measurement of soil carbon flux. Its advantages are low expense, wide coverage, multi-point synchronization, continuous monitoring, and be applicability to a wide range of areas. By using a self-regulating instrument based on WSN, Lr100GE-6400, to measure regional soil carbon flux, this paper presents a new layout strategy, Multiple Directional Interpolation (MDI). The strategy is as follows: (a) Set up the original well-distributed sampling sites and measure the carbon flux of these sites. (b) Calculate the intersections of different connection lines between sampling points by the radial point interpolation method and regard the points with maximum radial differences as new sampling points. Consequently, points are gradually increased based on this method to achieve accurate estimates of regional soil carbon flux. MDI layout strategy considers the spatial heterogeneity of soil carbon flux. It determines the sampling points based on dispersion, so that MDI can provide more accurate and comprehensive spatial information. Based on simulations in 20 fields of the 50 * 50 mesh region, layout is set up by MDI, random layout strategy, and uniform layout strategy, respectively. Keeping the same sample points, the three strategies were compared, and results were as follows: (1) MDI layout strategy can reflect the density of sampling points in terms of the variation gradient of soil carbon flux, decreasing use of sampling points and increasing the accuracy of measurement. (2) Error analysis of the experiments verified that the MDI layout strategy is more accurate than the average and random layout strategies. If there are fewer sampling points ($n = 10$), errors in the MDI layout strategy are less than the random and more than the average strategies; if sampling points increase, the three types of layout strategies tend to be more accurate. If there are 40 sampling points, errors in MDI (0.028) are 12.5% less than that of the average (0.32), and 30.0% less than that of the random strategy. In conclusion, MDI layout strategy generally allocates the sampling points more reasonably based on the variation gradient of soil carbon flux. More sampling points are selected in the region with a large variation gradient in soil carbon flux, which matches the variation of soil carbon flux accurately, while fewer are located in the region with a small variation gradient in soil carbon flux but these do not affect the accuracy of soil carbon flux measurement. This method maximizes the effect of every sampling point and minimizes errors.

Key Words: Multiple-directional Interpolation; MDI Layout Strategy; Soil Carbon Flux Estimation

土壤碳通量是陆地生态系统碳循环中的重要组成部分^[1],它所释放的 CO₂量约占大气 CO₂总量的 10%—20%,与植被冠层光合作用固碳量相当^[2-3]。准确的测量区域土壤碳通量对研究陆地生态系统碳循环过程具有十分重要的作用^[4]。现阶段遥感和模型相结合是研究区域碳收支的重要手段,但结果不确定性较大,需要采用通量实测、模型和遥感数据融合的方法来提高模型结果的可靠性^{[5-7][8]}。直接测定土壤碳通量能够保证区域土壤碳通量的精确性。对土壤碳通量的主要测量方法为开路式的通量测定,对于单点的测量目前认为最准确的是利用 LI-8100 仪器进行测量。但是由于 LI-8100 等土壤碳通量测量仪器昂贵,在长期持续的测量过程需要耗费大量人力,同时监测点的时间同步性也很难做到一致,因此通过简单增加监测点的方法进行区域土壤碳通量的监测显得十分困难。无线传感网具有成本低、覆盖范围广、多点同步、持续监测的优点,可应用于大范围的区域监测,作为一种新兴手段已应用在土壤碳通量的直接测定中^[2],其相对误差已小于 5%。

土壤属性空间分布随地形、气候和植被等因素的变化而不同^[9],是一个复杂、变化且不均一的连续体^[10],具有明显的空间异质性^[11]。少量监测点的均值不能代表整个区域的土壤碳通量,对区域土壤通量的估算有很大的误差。但是监测点数量过多产生能源、财力消耗和数据冗余等问题。因此如何通过尽量少的采样点对土壤碳通量进行测量以得到较准确的区域土壤碳通量值,急需选择一种合理的采样策略满足传感器布置的要求。目前国内外常用的采样方法主要有主观判断采样、简单随机采样、规则网格采样、分区采样及混合采样等^[12]。测量区域碳通量普遍运用规则网格或随机的采样方式布设测量点,然后通过简单的统计方法计算区域碳通量。刘源月等人^[1,13-15]在研究森林生态系统土壤碳通量过程中,使用简单随机采样方法将测量数据的均值作为区域土壤碳通量。这种方法不能准确、全面地掌握土壤碳通量的空间分布信息^[12]。

本文基于一种自制的仪器 Lr100GE-6400,通过区域土壤碳通量空间分布仿真数据,提出了一种选择性递增的采样方法多向插值布局策略(MDI),主要研究以下两个方面:(1)MDI 采样策略的原理和采样过程;(2)MDI 采样策略相对随机采样、均匀采样的优势。通过尽量少的采样点对土壤碳通量进行测量以得到较准确的区域土壤碳通量值。

1 基于多向插值的空间采样策略

在 MDI 布局策略中,根据已测量采样点的位置及测量值形成交点,计算监测区域中各交点在多个方向上的插值预测结果,选择离散度高的交点进行逐步增设采样点。其中方向指监测点的连线。而交点的离散度是各个方向上插值的方差。它代表了该点在各个方向插值的差异,离散度越大差异越大。因此根据离散度来确定采样点的方式在一定程度上考虑了土壤碳通量空间异质性。

基于多向插值离散度的空间采样布局策略 MDI 步骤为:首先在研究区域选择若干初始采样点;然后依据空间插值离散度逐步增加采样点。具体描述如下:

(a) 确定初始采样点。在测量前,由于没有足够的先验信息,初始采样点采用近似均匀分布的方法。如图(1)先将待测量区域中心 O 确定为采样点,然后以中心 O 为原点,间隔 α ($\alpha = 360^\circ/n$) 向周边延伸 n 条线。延伸到与边缘交点 $P(P_1, P_2, \dots, P_m)$ 处,在 OP 上选点 $I(I_1, I_2, \dots, I_m)$ 为初始采样点,使点 I 到原点 O 的距离 OI 为距离 OP 的 $\sqrt{2}/2$ 。选择离中心点距离的 $\sqrt{2}/2$ 处能够使监测点处于虚线区域中近似中心的位置。由此确定 $m+1$ 个初始采样点 $O, I(I_1, I_2, \dots, I_m)$, 测量这些初始采样点的土壤碳通量数据。

(b) 产生交点。监测区域内已布设的监测点相互连接形成多条连线,连线相交形成交点。根据王丰川等(年份)^[17]研究得到土壤碳通量的最近采样距离为 20 m,在 20 m 内土壤碳通量的变化梯度很小,所以交点距离小于阈值 ε ($\varepsilon = 20$ m) 时,近似认为它们交于同一个公共交点。如图 2 所示,假设已在 5 个位置部署了采样点,已部署采样点在监测区域内形成 8 个交点。

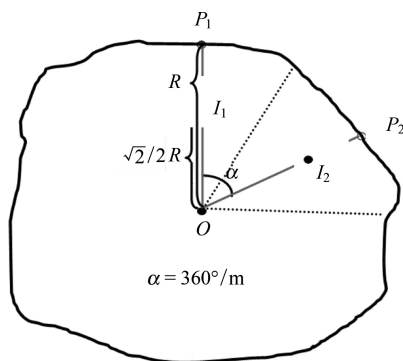


图 1 初始点的生成示意图

Fig.1 Generation of initial points

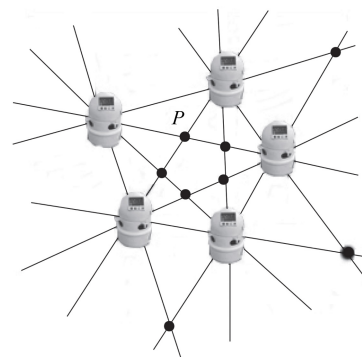


图 2 采样点的生成

Fig.2 Generation of sampling points

(c) 计算多向插值离散度。根据已测量的各采样点的土壤碳通量数据,对各个方向的交点位置进行插值估算,计算各交点的多向插值离散度。

高东等(年份)^[16]对区域土壤碳通量的研究表明,土壤碳通量在空间上是连续变化的,因此在各个方向上可以通过插值方法估算未知点的碳通量。如图 3(a) 所示, A_1, B_1 为区域中的两个采样点,已知 A_1 和 B_1 点的土壤碳通量分别为 $flux_{A_1}$ 和 $flux_{B_1}$, 可以通过 A_1 和 B_1 点运用插值方法来估算得到 C 点的土壤碳通量值 $flux_C$, 如式(1)所示,其中 X 是对应点的相对横坐标。

$$flux_C = \frac{flux_{A_1} - flux_{B_1}}{X_{A_1} - X_{B_1}} * X_C + \left(flux_{A_1} - \frac{flux_{A_1} - flux_{B_1}}{X_{A_1} - X_{B_1}} \right) \quad (1)$$

采样点在监测区域中相互交叉形成多个方向,未测量交点的土壤碳通量根据多个方向的插值可以得到多个估算结果。如图 3(b)所示, A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 、 \dots 、 A_n 、 B_n 为已进行测量的位置,这些位置分别构成 L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_n 等多个方向, C 点为多个方向的交点。则未测量交点 C 在 L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_n 各方向上分别得到不同预测值 $flux_{L_1}$ 、 $flux_{L_2}$ 、 \dots 、 $flux_{L_n}$ 。计算出交点上预测值的离散度,选择离散度高的点进行采样,通过该点的实际数据修正通量值提升各方向估值精度,使整个区域土壤碳通量的估算更准确。多向插值离散度 δ 计算方法为(式 2):

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (flux_{L_i} - \overline{flux})^2}{n} \quad (2)$$

(d) 选择新增采样点。监测区域内已布设的监测点形成多个方向,各个方向之间相交形成交点,从所有交点中选择多向插值离散度最高的点作为新增采样点。

重复步骤(b)、(c)和(d),直到各交点的多向插值离散度均低于设定阈值为止。

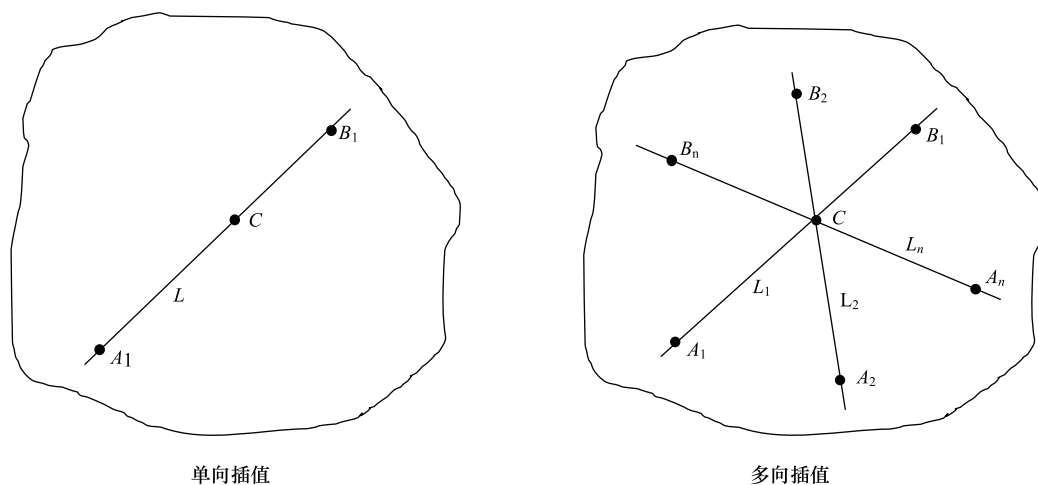


图 3 多向插值离散度

Fig.3 Dispersion of multiple directional interpolations

2 模拟实验与分析

通过模拟区域土壤碳通量数据,利用 MDI 空间采样布局策略进行 20 次仿真实验,并对实验结果进行分析。

2.1 实验数据

根据张义辉等(年份)统计出的区域土壤碳通量空间布局结果^[18],设定模拟区域土壤碳通量数据的特征(表 1)。模拟实验区域为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,分割成 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的方格矩阵,在每个方格内赋予土壤碳通量值,矩阵行列下标 (x, y) 表示对应模拟区域的位置, $1 \leq x, y \leq 50$ 。

表 1 实验数据参数

Table 1 Parameters of experiment data

平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变程 Range	块金值 Nugget	基台值 Sill	变异系数 Coefficient of variation
2.14—8.93	1.27—4.01	190—510	0.003—0.037	0.773—1.030	42—59

为了保证实验模拟数据的代表性,实验按照表 1 的规范模拟产生 20 幅不同的区域土壤碳通量分布数据,作为实验数据。图 4 为其中一幅符合空间分布特征(平均值为 3.56,标准差为 2.54,变程为 210,

块金值为 0.81,变异系数为 45)的 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 区域土壤碳通量空间分布模拟图。在圆形范围 1 附近,土

壤的碳通量值变化梯度相对较大;在圆形范围 2 附近,土壤的碳通量值变化梯度相对较小。

2.2 实验方案

在仿真试验中,采样点位置用模拟数据的坐标表示,采样点的测量值用该位置的土壤碳通量仿真值表示。使用传统和地统计学的方法对土壤碳通量的空间分布进行比较,运用地统计学 Kriging 插值方法能更准确地展现土壤碳通量的空间分布^[12]。通过将采样点的 Kriging 空间插值结果与整个区域的仿真值进行对比,评价部署策略的性能。实验对传统的主观判断采样方法、分区和混合采样和 MDI 布局策略 3 采样方法进行了比较。

基于 20 幅区域土壤碳通量分布的模拟数据,分别运用 MDI 布局、随机布局和均匀布局策略,进行布设测量点。采样点数量分别为区域土壤碳通量总数的 0.4%、0.8%、1.2%、1.6%的,即采样点数量 $n=10, 20, 30, 40$ (图 5)。在采样点数量相同的条件下,比较 MDI 布局策略与随机布局策略、均匀布局策略对区域土壤碳通量的估算效果。

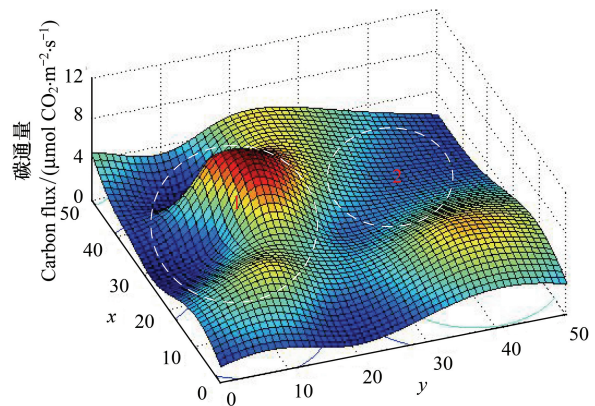


图 4 土壤碳通量模拟图

Fig.4 Simulation map of soil carbon flux

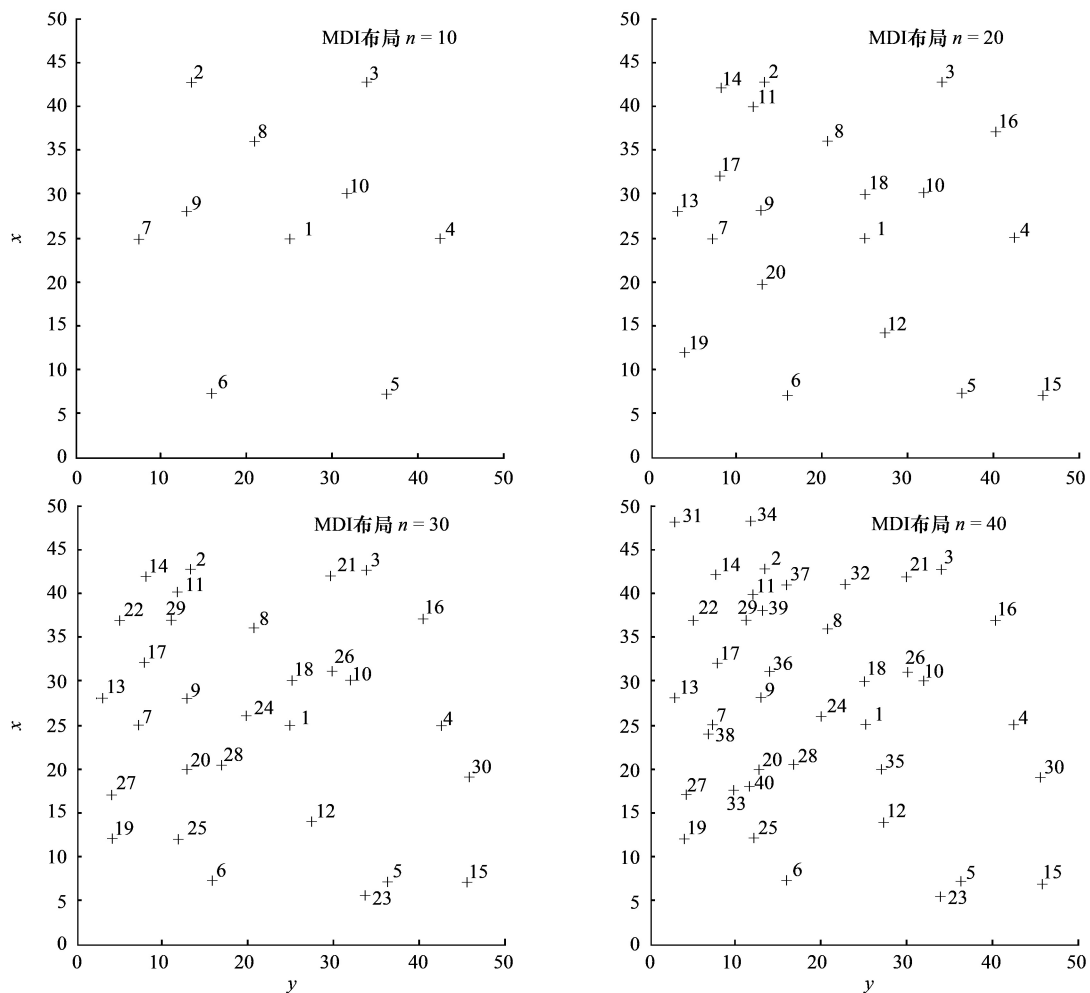


图 5 MDI (Multiple Directional Interpolation) 测量点布局

Fig.5 MDI distribution of sampling points

2.3 实验结果

通过对 20 幅土壤碳通量空间模拟数据的布点实验结果进行统计,得出 MDI 布局策略与随机布局策略、均匀布局策略的区域碳通量估算误差(图 6)以及 MDI 布局策略与随机布局策略、均匀布局策略的估算误差的标准差(图 7)。通过分析得出:

(1) 3 种布局策略的误差和误差标准差与测量点的数量的关系整体趋势是相同的:测量点数量越多,误差和误差标准差减小,趋势逐渐变缓。

(2) 在相同的测量点数量 $n(n=10, 20, 30, 40)$ 下,随机布局策略的误差和误差标准差均比 MDI 布局策略的大。采样点数量($n=40$)时,MDI 布局策略对碳通量的估算误差(0.04)比随机布局策略的估算误差(0.028)低 30.0%。MDI 布局策略和随机布局策略的误差差异极显著($P<0.01$)(图 6),MDI 布局策略明显优于随机布局策略。

(3) 在测量点数量 $n=10$ 时,均匀布局策略的误差和误差标准差比 MDI 布局策略的低;随着测量点数量 $n(n=20, 30, 40)$ 增大,均匀布局策略的误差和误差标准差比 MDI 布局策略的大。采样点数量($n=40$)时,MDI 布局策略对碳通量的估算误差(0.028)比平均布局策略的误差(0.32)低 12.5%。MDI 布局策略和均匀布局策略的误差差异极显著($P<0.01$)(图 6),增加测量点数量后,MDI 布局策略明显优于均匀布局策略。

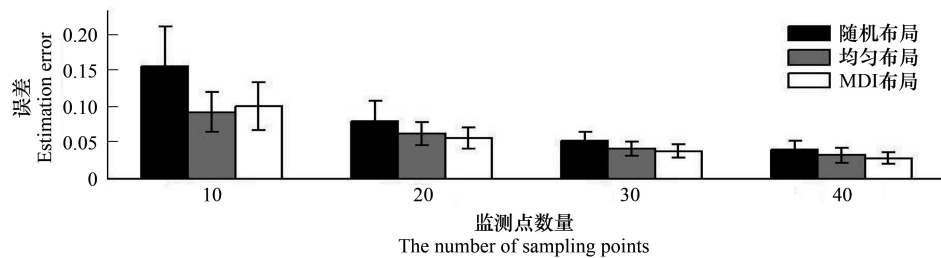


图 6 碳通量估算误差

Fig.6 Estimation error of carbon flux

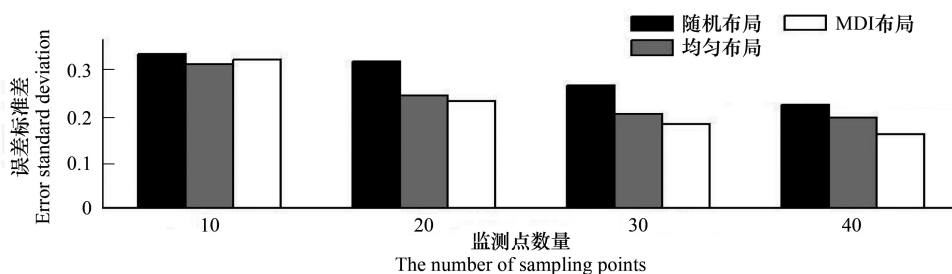


图 7 碳通量估算误差的标准差

Fig.7 Standard deviation of carbon flux estimation error

2.4 实验分析

对 MDI 布局策略的估算效果优于均匀和随机布局的原因进行分析,图 8 是对应模拟区域中土壤碳通量采样结果。测量点 $n=40$ 时,MDI 布局策略的估算误差(图 9(a))与随机布局策略(9(b))、均匀布局策略(图 9(c))的误差对比得出,对应区域土壤碳通量分布(图 4)范围 1 中,均匀布设策略和随机布设策略误差比 MDI 布设策略的估算误差高;对于范围 2,MDI 布局策略比其它两种的估算误差略高。均匀和随机两种布局策略在范围 1 中的较大的估算误差导致最终估算误差及误差标准差较大。

局部测量点密度(表 2)是导致误差分布不同的原因。在土壤碳通量变化较复杂的范围 1 处,较多测量点能够准确地得到该区域土壤碳通量的变化趋势,而测量点不足是导致该区域土壤碳通量的变化趋势不精确的原因。

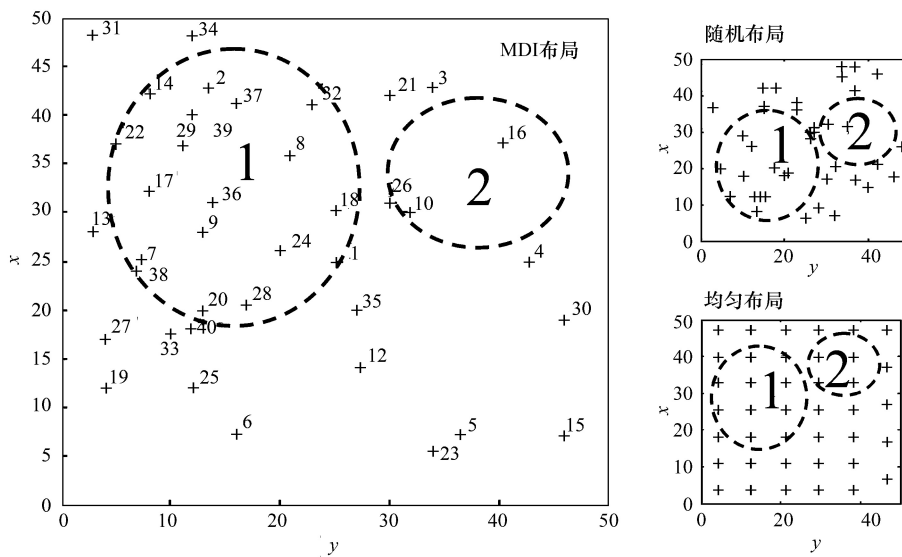


图 8 DI 与随机方法、均匀方法的采样点分布对比 (n=40)

Fig.8 ontrast between MDI and random & uniform sampling points distribution

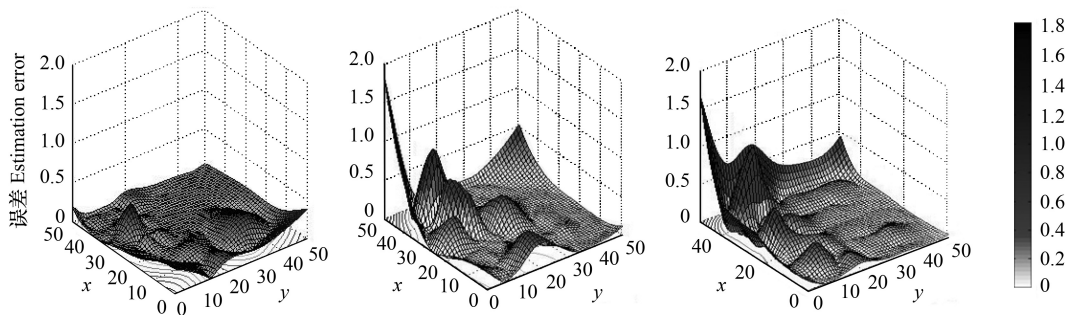


图 9 MDI 与随机方法、均匀方法的误差分布对比

Fig.9 Contrast between MDI and random & uniform distribution of error

表 2 MDI (Multiple Directional Interpolation) 与随机方法、均匀方法的采样点数量分布对比

Table 2 Contrast of MDI, random and uniform sampling point number distribution

布局策略 Layout Strategy	MDI 布局 MDI Layout Strategy	均匀布局 Uniform Layout Strategy	随机布局 Random Layout Strategy
范围 1 采样点数量/个 Sampling point number In the range 1	21	10	16
范围 2 采样点数量/个 Sampling point number In the range 2	2	5	5

对应图 4 中范围 1 的区域,将图 8 采样分布和图 9 误差分布进行对应分析,MDI(图 8(a))中测量点比较密集,高达 21 个(表 2);但是随机布局策略(图 8(b))和均匀布局策略(图 8(c))相对 MDI 的测量点布局要稀疏许多,测量点数量分别为 16 个和 10 个,尤其是随机布设的测量点随意性较大,导致此区域的测量点不足。而对应图 5 中范围 2 处,MDI 的布点比较稀疏,仅有 2 个(表 2);但是随机布局策略和均匀布局策略相对 MDI 的布设要密集,其测量点数量均为 5 个。可见,MDI 布局测量能够根据土壤碳通量的变化梯度合理分配测量点。

3 结论

本文针对区域土壤碳通量估算的采样点布局问题提出了 MDI 空间采样布局策略。使用 MDI 布局策略进

行模拟实验,验证了 MDI 布局比均匀布局和随机布局能够得到更高的估算精度。对实验结果的误差进行比较,采样点数量($n=10$)较少,MDI 布局策略对碳通量的估算误差比随机布局策略低,比平均布局策略稍高;随测量点增多,3 种布局策略误差均降低;采样点数量($n=40$)增多时,MDI 布局策略对碳通量的估算误差(0.028)比平均布局策略的误差(0.32)低 12.5%,比随机布局策略的误差(0.04)低 30.0%。综合比较 3 种布局方法,MDI 布局策略从整体上对测量点数量进行了合理的分配,使得整个区域内误差低。MDI 部署策略在土壤碳通量变化梯度大的区域设置较多采样点,能够更好的拟合出此区域土壤碳通量的变化,很大程度上降低了误差;在土壤碳通量变化梯度小的区域,MDI 布局策略设置较少的采样点,但对土壤碳通量的估算准确度影响不大。通过实验得到 MDI 的布局策略使每个采样点的作用最大化。

在真实条件下最佳(多向插值离散度最大)位置并不适合部署土壤测量设备(例如水池、石头等非土壤表面)。此时,可以考虑采用两种措施:依据土壤碳通量的局部相关性,选择理论最佳部署位置周边作为新增采样点;或者在多向插值离散度相差不大的情况下,选用离散度相对较大的其它位置作为新增采样点。但无论哪种方法都降低了 MDI 布局策略的性能,并且在理论最佳位置附近仍然不适合部署节点,最佳位置的多向插值离散度与其余交点的多向插值离散度接近时,不容易确定新增采样点位置。下一步工作要进行包含大面积非土壤表面的区域土壤碳通量空间采样策略研究。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44(2): 81-99.
- [4] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, Clark K L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 1998, 205(2): 135-146.
- [5] 米娜,于贵瑞,王盘兴,温学发,孙晓敏,张雷明,宋霞,王树森. 基于 EALCO 模型对中亚热带人工针叶林 CO₂ 通量季节变异的模拟. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1119-1131.
- [6] Zhou L, Wang S Q, Ju W M, Xiong Z, Georg K, Chen J M, Shi H. Assessment of carbon dynamics of forest ecosystems in the Poyang lake basin responding to afforestation and future climate change. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(1): 11-19.
- [7] Tate K R, Scott N A, Parshotam A, Brown L, Wilde R H, Giltrap D J, Trustrum N A, Gomez B, Ross D J. A multi-scale analysis of a terrestrial carbon budget: is New Zealand a source or sink of carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82(1/3): 229-246.
- [8] Potter C S, Klooster S A, de Carvalho C R, Genovese V B, Torregrosa A, Dungan J, Bobo M, Coughlan J. Modeling seasonal and interannual variability in ecosystem carbon cycling for the Brazilian Amazon region. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D10): 10423-10446.
- [9] 魏书精,罗碧珍,孙龙,魏书威,刘芳芳,胡海清. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(4): 689-704.
- [10] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena*, 1998, 32(3/4): 155-172.
- [11] 周涛,史培军,惠大丰,骆亦其. 中国土壤呼吸温度敏感性空间格局的反演. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2009, 39(3): 315-322.
- [12] 陈天恩,陈立平,王彦集,郜允兵,任仲山. 基于地统计的土壤养分采样布局优化. 农业工程学报, 2009, 25(增 2): 49-55.
- [13] 王超,黄蓉,杨智杰,刘强,陈光水,万晓华. 万木林保护区柑橘和锥栗园土壤呼吸的比较. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1469-1475.
- [14] 常宗强,冯起,司建华,李建林,苏永红. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量. 生态学杂志, 2008, 27(5): 681-688.
- [15] 周文嘉,石兆勇,王妮. 中国东部亚热带森林土壤呼吸的时空格局. 植物生态学报, 2011, 35(7): 731-740.
- [16] 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.
- [17] 王丰川,刘加珍,陈永金. 黄河三角洲湿地土壤呼吸及其环境因子分析. 人民黄河, 2013, 35(1): 81-84.
- [18] 张义辉,李洪建,荣燕美,严俊霞,李君剑. 太原盆地土壤呼吸的空间异质性. 生态学报, 2010, 30(23): 6606-6612.