

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.001

## 若尔盖高寒泥炭地土壤有机碳储量估算的误差分析

白冰<sup>1</sup>, 刘长峰<sup>2</sup>, 赵婧文<sup>2</sup>, 胡理乐<sup>3</sup>, 张鹏骞<sup>4,5</sup>

- (1. 北京市科学技术研究院资源环境研究所, 北京 100089; 2. 北京青远生态环境有限公司, 北京 102200;  
3. 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714; 4. 北京生物多样性保护研究中心, 北京 100076;  
5. 北京市园林绿化局, 北京 100013)

**摘要:**以样品采集和质量控制模式(SAX)为指导,通过合理的采样设计和数据分析方法,估算若尔盖泥炭地土壤表层有机碳储量的估计值及其置信区间,并使用 Robust 方差分析进行定量化的误差分析,计算 4 类误差来源(样地间差异、采样深度、样地内差异和样品测定)的误差贡献率。结果表明,若尔盖泥炭地表层土壤有机碳储量估计值为 43.21 kt/km<sup>2</sup>,其 99% 置信区间为 40.08~46.33 kt/km<sup>2</sup>;误差分析结果表明,误差大部分来自样地间差异(贡献率为 61.63%),远大于其他 3 类来源(采样深度:24.82%;样地内:10.85%;测定误差:2.70%);温度是最主要的样地间误差来源(贡献率为 24.13%),降水和人为干扰也是重要的样地间误差来源(贡献率分别为 21.02%和 17.08%)。

**关键词:**土壤有机碳;碳储量;碳密度;误差分析;若尔盖高寒泥炭地

中图分类号:S718.5;O241.1;S714.5;S141.6 文献标识码:A 文章编号:1671-3168(2023)02-0001-08

引文格式:白冰,刘长峰,赵婧文,等.若尔盖高寒泥炭地土壤有机碳储量估算的误差分析[J].林业调查规划,2023,48(2):1-9. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.001

BAI Bing, LIU Changfeng, ZHAO Jingwen, et al. Error Analysis of Soil Organic Carbon Stock in Zoige Peatland[J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(2): 1-9. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.001

## Error Analysis of Soil Organic Carbon Stock in Zoige Peatland

BAI Bing<sup>1</sup>, LIU Changfeng<sup>2</sup>, ZHAO Jingwen<sup>2</sup>, HU Lile<sup>3</sup>, ZHANG Pengqian<sup>4,5</sup>

- (1. Institute of Resources and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100089, China;  
2. Beijing Qingyuan Eco-environmental Co., LTD., Beijing 102200, China; 3. Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China; 4. Beijing Biodiversity Conservation Research Center, Beijing 100076, China; 5. Beijing Gardening and Greening Bureau, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Guided by the Sampling and Analytical Quality Control Scheme (SAX), through reasonable sampling design and data analysis methods, the estimated value and confidence interval of organic carbon storage in in Zoige peatland were estimated, and the quantitative error analysis was carried out by the Robust variance analysis to calculate the error contribution rate of four types of error sources (inter sample difference, sampling depth, intra sample difference and sample measuring). The results showed that the estimated surface soil organic carbon storage of Zoige peatland was 43.21 kt/km<sup>2</sup>, and the 99% confidence interval was 40.08~46.33 kt/km<sup>2</sup>. The error analysis results showed that most of the errors came from the

收稿日期:2021-12-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(41103041).

第一作者:白冰(1992-),男,山西应县人,硕士研究生.研究方向为污染场地修复与调查研究. Email:893408412@qq.com

责任作者:张鹏骞(1984-),男,山西太原人,副研究员,硕士.研究方向为生态学与自然保护地管理. Email:zhangpengqian2007@126.com

inter sample difference (the contribution rate was 61.63%), which was larger than the other three sources (sampling depth: 24.82%, intra sample: 10.85%, measuring error: 2.70%). Temperature was the main source of inter sample error (contribution rate was 24.13%), precipitation and human disturbance were also important sources of inter sample error (contribution rate was 21.02% and 17.08%, respectively).

**Key words:** soil organic carbon; carbon storage; carbon density; error analysis; Zoige Peatland

土壤是地球上碳储量最为丰富的碳库之一,其碳储量的 90%以土壤有机碳的形式储存,土壤有机碳库在维持全球碳平衡中发挥着至关重要的作用<sup>[1-5]</sup>。而在众多类型的土壤有机碳库中,泥炭地的土壤有机碳储量显著高于其他类型的土壤,其同化吸收的碳远远超过其分解过程中释放的碳,从而形成大量的有机碳积累,引起学者们的广泛关注<sup>[4,6-8]</sup>。位于我国青藏高原东北部的若尔盖高寒湿地拥有世界上面积最大、最原始、人类活动影响较小的高原泥炭地<sup>[7,9]</sup>。若尔盖泥炭地的典型特征是泥炭层相当深厚,最厚可达 12 m。高原上冰川地貌发育,丰沛的冰雪融水、高寒的冷湿气候以及深厚的冻土层使得高寒泥炭地土壤有机碳分解非常缓慢,这种特定的高寒环境条件使高寒泥炭地比其他地区泥炭地具更强的固碳能力<sup>[8,10]</sup>。因此,若尔盖地区的泥炭地作为我国重要的碳汇,估算其土壤有机碳储量状况,对维持或增加我国土壤有机碳库的碳储量值,防止有机碳大量分解,以早日实现碳达峰和碳中和具有重要意义<sup>[11-13]</sup>。

单位面积土壤有机碳储量(ASOCS)是衡量一个区域土壤有机碳总储量的重要参数指标<sup>[14]</sup>。大量的研究对若尔盖泥炭地的 ASOCS 进行了估算,估算方法为不同样点土壤有机碳密度平均值乘以土层深度<sup>[1,7]</sup>。过去对若尔盖泥炭地碳储量估算重点关注土壤表层 1 m 的 ASOCS,研究结果差异较大:夏敏等<sup>[14]</sup>对若尔盖高原 3 种湿地生态系统的碳储量进行比较,结果发现,沼泽湿地土壤的 ASOCS 为 73.36 kt/km<sup>2</sup>,显著高于河流湿地土壤(20.55 kt/km<sup>2</sup>)和湖泊湿地土壤(20.14 kt/km<sup>2</sup>);高俊琴等<sup>[15]</sup>、Ma 等<sup>[16]</sup>和周文昌等<sup>[17]</sup>采集若尔盖泥炭地不同区域的土壤样品,估算出若尔盖泥炭地土壤表层 1 m 的 ASOCS 分别为 35.6 kt/km<sup>2</sup>、69.5 kt/km<sup>2</sup> 和 38.473 kt/km<sup>2</sup>;蔡倩倩等<sup>[18]</sup>采集若尔盖地区含水量不同的土壤样品进行分析,结果发现,若尔盖泥炭地常年积水区、季节性积水区和无积水区的 ASOCS 分别为 64.87 kt/km<sup>2</sup>、71.21 kt/km<sup>2</sup> 和 76.45 kt/km<sup>2</sup>。上述研究结果表明,对若尔盖高寒湿地土壤有机碳储量

的估算目前存在较大差异,其差异已接近 4 倍。尽管现有文献通过在不同生境采样和分层采样发现了差异,但是少有深入探讨这些差异究竟由哪种因素所引发,其影响程度也有待得到量化评估。

本研究根据已发表文献<sup>[12-21]</sup>推测若尔盖高寒湿地土壤有机碳含量的差异主要受到成土过程的影响,其影响因素包括气候和植被,此外,人为活动(如放牧、开垦和排水等措施)也会对这一过程产生举足轻重的影响,此外,采样过程和样品分析过程也会产生对土壤有机碳含量的估算误差<sup>[22-24]</sup>。基于合理的采样设计,结合样品采集和质量控制模式(Sampling and Analytical Quality Control Scheme, SAX)的方法,本研究对若尔盖高寒湿地土壤有机碳估算结果误差的来源做出定量评价,即通过计算误差贡献率,以反映环境、采样等因素对估算土壤有机碳储量差异的影响水平。本研究对提高若尔盖高寒湿地有机碳储量估算结果的准确性和合理性具有重要意义,为我国泥炭地碳中和估测研究提供参考。

## 1 研究区概况

若尔盖高寒湿地处于青藏高原东北侧(33°42'~34°30'N,102°31'~103°30'E),黄河上游,位于我国四川省、甘肃省和青海省交界处,总面积约 271 414.48 hm<sup>2</sup>,横跨 5 个行政县(若尔盖县、红原县、阿坝县、碌曲县和玛曲县),绝大部分隶属四川省若尔盖县。该区域海拔较高,海拔范围为 3 400~3 900 m,地形复杂,周围高山林立,如昆仑山脉、巴颜喀拉山脉、秦岭山脉以及岷山山脉等。该区属高原寒温带半湿润大陆季风气候,年均温 0.7~2.5℃,年降水量 518~800 mm,湿度较大,霜冻期长。若尔盖高寒泥炭地是我国典型的高原泥炭地,泥炭储量丰富,是我国乃至世界上面积最大的高原沼泽集中分布区<sup>[26]</sup>。若尔盖湿地区域生态系统结构完整,植被生长发育良好,泥炭地植被主要以沼泽植被和高山草甸为主,典型的植物种类有四川嵩草(*Kobresia setchwanensis*)、乌拉苔草(*Carex meyerina*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)和木里苔草(*C. muliensis*)等<sup>[13]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 采样点设置及样品采集与测定

若尔盖高寒湿地横跨 5 个行政县,其中泥炭地

主要分布于若尔盖县和红原县,为此,在若尔盖县和红原县各设定 6 个样地,其他 3 个县泥炭地分布较少,故各设置 2 个样地,共计 18 个样地(图 1),样地具体信息见表 1。

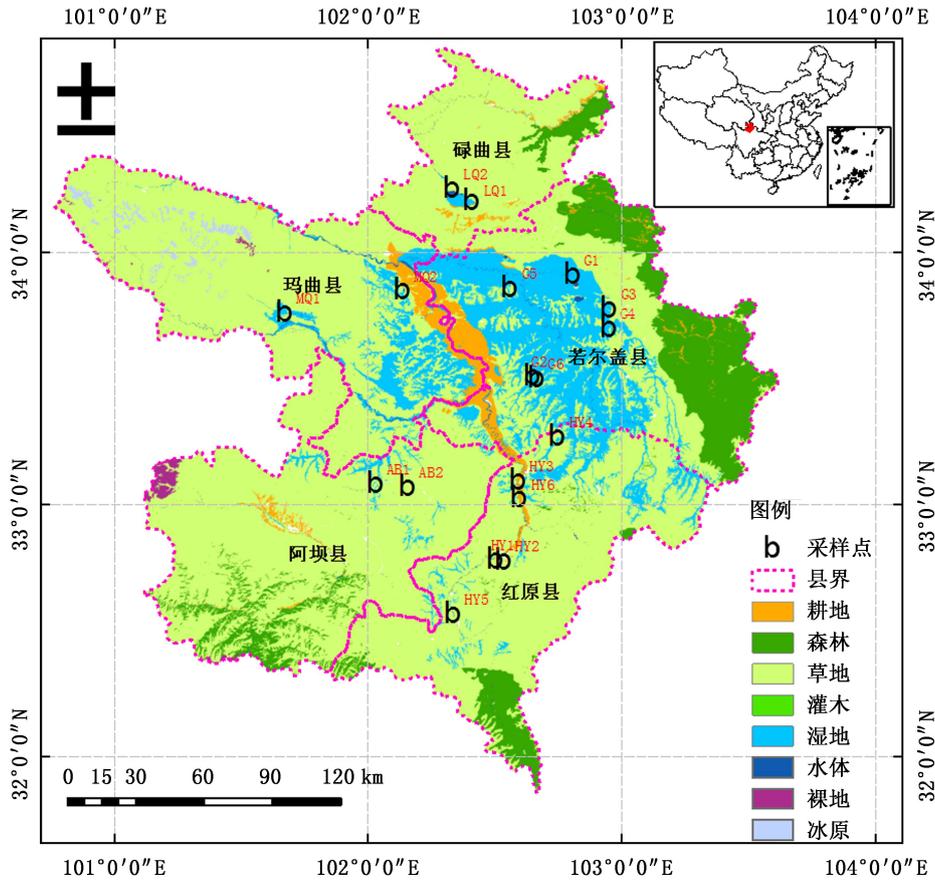


图 1 若尔盖高寒泥炭地采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in Zoige Peatland

依据样品采集和质量控制模式的数据要求,每个样地至少设定 2 个样点为重复样,用以分析采样误差<sup>[28]</sup>,2013 年完成所有土壤样品的采集工作。采样过程使用直径为 10 cm 的人工土钻进行土壤采样,采样深度为 1 m。将采集到的土柱每 10 cm 划分为一组土层,将每个样点中同一土层的样品混合成一个分析样品(即多点混合取样法),放入自封袋中密封保存。于实验室中将样品自然风干并研磨,后过直径 0.25 mm 筛,装袋备用。土壤容重( $P$ )采用环刀法截取各层次新鲜土壤样品测定;土壤有机碳含量(SOC)采用浓硫酸-重铬酸钾氧化水合热法测定,土壤有机碳密度(SCOD)通过土壤有机碳含量乘以土壤容重计算获取<sup>[29]</sup>。

### 2.2 数据分析

#### 2.2.1 土壤有机碳储量的估算

1) 单位面积土壤有机碳储量估计值计算

单位面积土壤有机碳储量估计值为土壤有机碳平均密度乘以土壤深度<sup>[14,30]</sup>,公式为:

$$ASOCS = SOCD_m \times H \times 10^{-2}$$

式中:ASOCS 为若尔盖泥炭地表层土壤有机碳储量估计值,单位为  $kt/km^2$ ;  $H$  为土壤深度,单位为  $cm$ ,本研究取值 100;  $SOCD_m$  为土壤有机碳平均密度,通过计算所有样本的土壤有机碳密度的平均值获取,单位为  $kg/m^3$ 。

2) 土壤有机碳储量估计区间计算

本研究有机碳储量值是基于所有样点的有机碳密度平均值计算而得,其数值的准确性和精确性

表 1 若尔盖高寒泥炭地采样点设置

Tab. 1 Sampling points setting in Zoige Peatland

样地编号	采样位置	重复样数量/个
G1	若尔盖县花湖北边	3
G2	若尔盖县纳勒桥西边	3
G3	若尔盖县花湖东边	3
G4	若尔盖县阿西牧场	3
G5	若尔盖县黑河牧场	3
G6	若尔盖县纳勒桥东边	3
HY1	红原县月亮湾	3
HY2	红原县二农场	3
HY3	红原县瓦切牧场	3
HY4	红原县日干乔	3
HY5	红原县龙日坝	3
HY6	红原县阿桑牧场	3
AB1	阿坝县 1	2
AB2	阿坝县 2	2
MQ1	玛曲县阿万仓	2
MQ2	玛曲县河曲马场	2
LQ1	碌曲县尕海加仓	2
LQ2	碌曲县尕海保护站	2

与所有样点的统计学性质有关,置信区间常用于评估估计参数的准确性和精确性,数值范围越小且覆盖的概率范围越大的置信区间既能保证精确性又能保证准确性<sup>[31]</sup>。

根据经典统计学理论,在有机碳密度数据样本服从正态分布的前提下,有机碳密度平均值概率为  $1-\alpha$  的置信区间为:

$$SOCD_m \pm t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1) \times \frac{SOCD_{std}}{\sqrt{n}}$$

若有机碳密度数据样本不服从正态分布,但样本量足够大时(至少超过 30 个),样本平均值具有渐进正态性<sup>[32]</sup>,因此,有机碳密度平均值的概率为  $1-\alpha$  的置信区间近似为:

$$SOCD_m \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \times \frac{SOCD_{std}}{\sqrt{n}}$$

式中: $t$  为学生氏分布( $t$  分布); $z$  为标准正态分布; $SOCD_{std}$  为有机碳密度数据样本标准差; $n$  为样本总量。

故若尔盖区域泥炭地土壤有机碳储量的置信区间为有机碳密度平均值的置信区间乘以土层深度和泥炭地总面积。为了获得较高准确度的结果,本研

究  $\alpha$  取 0.01 以获取置信概率为 99% 的结果。

### 2.2.2 误差分析

土壤有机碳密度是计算土壤有机碳储量的核心参数,由于其他参数是确定值,故土壤有机碳密度数值的误差能直接反映土壤有机碳储量的误差。样品采集和质量控制模式(SAX)是 Ramsey 等<sup>[33-34]</sup>提出的一种土壤环境全程质量控制方法,该方法已广泛应用于地球化学研究中的分析数据质量控制和误差分析,其最大优势是将各种自然因素和人为因素的误差分离并定量地表示出来,从而为不同误差来源的贡献做出定量评估<sup>[35]</sup>。对于具体的某一份样品进行测定分析所得到的结果表示为:

$$\text{测量值} = \text{真实值} + \text{采样误差} + \text{分析误差}$$

采样误差与采样设计的各种因素的梯度类型直接相关,包括大尺度空间差异产生的误差(样地间误差)、不同土层深度的误差和具体样地中样点布设导致的误差(样地内误差)。分析误差是进行样品测定分析时产生的系统的或随机的误差。

样地间误差是各种环境因素和人为活动因素影响作用的集中体现,结合过去的研究结果<sup>[5,7,11-13,30]</sup>和若尔盖地区的状况,本研究关注的样地间误差来源包括:温度、降水、植被类型、人为干扰和其他环境因素。

样本方差是描述数据误差的重要统计变量,假设上述误差来源彼此独立,那么总体样本的总方差可表示为:

$$s_t^2 = s_{\text{样地间}}^2 + s_{\text{样地内}}^2 + s_{\text{土层深度}}^2 + s_{\text{分析测试}}^2$$

$$s_{\text{样地间}}^2 = s_{\text{温度}}^2 + s_{\text{降水}}^2 + s_{\text{植被类型}}^2 + s_{\text{人为干扰}}^2 + s_{\text{其他}}^2$$

对于上述各类方差的计算,考虑到土壤样品分析数据经常出现离群值而导致无法满足经典统计分析的假设前提,故 SAX 强调使用英国皇家化学协会推荐的 Robust 方差分析<sup>[32]</sup>。Robust 方差分析的数据计算使用了稳健性的统计量,对样本的中心位置和离散度进行估计,保留了离群值,并采取合适的办法去处理<sup>[36]</sup>。

本研究共设置 18 个样地作为样地设置的空间梯度用以计算样地间方差,其中温度设置 3 个梯度,分别是低于  $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-10 \sim 0^{\circ}\text{C}$  和大于  $0^{\circ}\text{C}$ ;降水设置了 3 个梯度,分别是低于 500 mm、500~800 mm 和大于 800 mm;植被类型根据实际调查情况设置了 3 个类型:挺水植物、沉水植物和陆生草本;人为干扰根据实际调查状况设置了 4 个梯度:强、中、弱和无;分析 10 个土壤深度梯度并计算采样深度导致的方差;每个样地中至少使用 2 个重复样用于计算样地内方

差;样品测定误差使用总方差减去以上 3 个方差得到。所有的误差来源因素的每种梯度都确保至少有 2 个重复样本。

### 2.2.3 数据来源与处理

土壤碳含量经过样品测定获取,采样过程中记录了每一个样地的主要植被类型和人为干扰强度;温度和降水数据从中国科学院资源环境与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 获取。

研究数据在 Excel 2016 中进行汇总整理和预处理;相关统计分析和检验在 IBM SPSS 22.0 中执行;Robust 方差分析通过 R 3.6.3 编程执行;每个样地的温度和降水通过 ArcMap 10.5 的“Extract Values to Points”工具提取;采样图绘制通过 ArcMap 10.5 实现;其他图片基于 R 3.6.3 的 ggplot 2 包绘制。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤有机碳密度样本统计学特征

土壤有机碳密度样本数据的统计特征直接影响土壤有机碳储量估算结果的准确性和精确性。对所有土壤有机碳密度样本数据进行基本的统计指标计算(表 2),结果得到样本平均值为 43.21,标准差为 20.37;所有样本的变异系数为 0.471 2,接近 0.5,属中等程度变异,说明所有的土壤有机碳密度样本具有一定程度的离散性;从样本的总体分布上看,数据的偏度和峰度接近 0,柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验(Kolmogorov-Smirnov test, K-S test)计算出的  $p$  值为 0.527 1,大于 0.05。上述结果证明数据服从正态分布,故采用样本平均值估算土壤碳储量以及使用  $t$  分布计算置信区间是合理的。

表 2 土壤有机碳密度样本统计信息

Tab. 2 Samples statistics of soil organic carbon density

平均值 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	标准 差	方差	变异 系数 /%	偏度	峰度	正态检验
43.21	20.37	414.82	47.12	0.03644	0.6523	$p=0.5271$

### 3.2 土壤有机碳储量估算及误差分析

本研究的土壤有机碳密度样本总体满足正态分布的前提假设,在此基础上估算若尔盖泥炭地表层(0~100 cm)土壤有机碳储量。结果表明,土壤表层有机碳储量估计值为  $43.21 \text{ kt}/\text{km}^2$ ,该估计值是基于所有土壤有机碳密度样本的无偏估计值;基于  $t$

分布计算的 99% 置信区间为  $40.08 \sim 46.33 \text{ kt}/\text{km}^2$ ,置信上下界值较平均值波动率为 14.48%,波动量处于可接受范围,说明本研究的估算值比较合理,但也需要辅以进一步的误差分析。此外,通过对比过去若尔盖泥炭地土壤有机碳储量的估算结果发现,本研究的估算值比较接近于这些研究的估算结果平均值(表 3)。

表 3 不同研究的若尔盖泥炭地土壤有机碳储量估算结果比较

Tab. 3 Comparison of soil organic carbon storage estimation results of different studies in Zoige Peatland

编号	有机碳储量 ( $\text{kt} \cdot \text{km}^{-2}$ )	采样数量 /个	采样 时间	参考文献
1	38.02	48	2018	[14]
2	35.60	27	2010	[15]
3	64.87	27	2011	[18]
4	69.50	36	2010	[16]
5	38.47	27	2014	[17]
6	43.21	48	2013	本研究
平均值	48.27	-	-	-

本研究土壤有机碳密度样本总方差较大,为 414.82,数据变异程度处于中等水平,需要进行误差分析对土壤碳储量估算结果进行辅助说明。通过 Robust 方差分析定量计算出不同误差来源对总方差的贡献量,其中样地间方差为 285.66,采样深度方差为 72.94,样地内方差为 45.01,样品测定和随机误差为 11.20。故样地间、采样深度、样地内和样品测定对总误差的贡献率分别为 68.86%、17.58%、10.85%和 2.70%。因此,本研究中各类误差来源影响程度排序为:样地间>采样深度>样地内>测定误差,其中样地间与采样深度影响水平最高,二者误差贡献率之和超过 85%(表 4)。

表 4 主要误差来源的贡献率

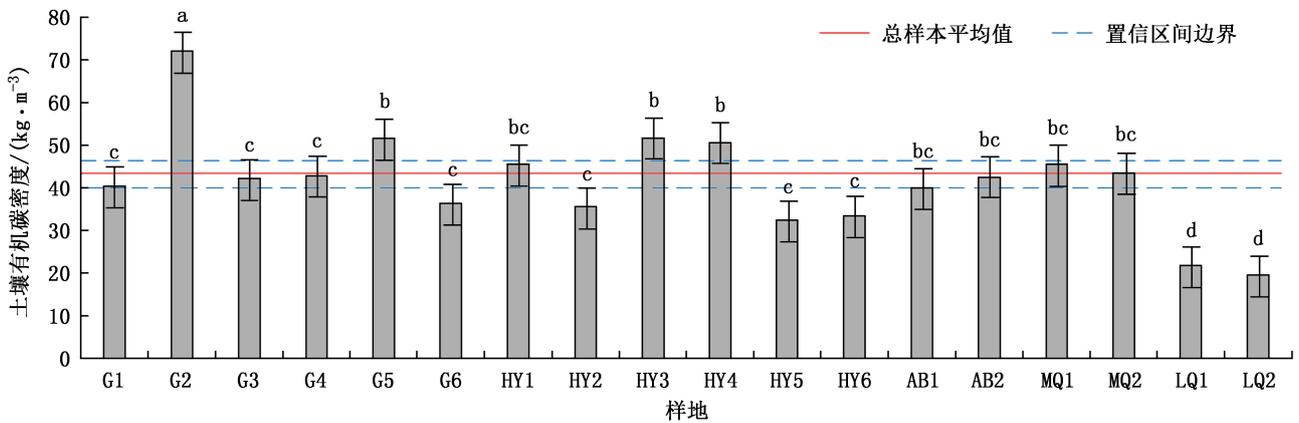
Tab. 4 Contribution rate of major error sources

误差来源	方差	贡献率/%	累积贡献率/%
样地间	285.66	68.86	68.86
土层深度	72.94	17.58	86.45
样地内	45.01	10.85	97.30
样品测定	11.20	2.70	100.00
总和	414.82	100.00	-

### 3.3 空间异质性对误差的影响

样地间方差占比最大,为 68.86%,相较于其他因素,样地间差异所反映的空间异质性是影响碳储量核算的最主要因素。统计不同样地的样本发现,不同样地的土壤有机碳密度的组间差异十分显著,并且组内误差线较短,组内误差较小(图 2);同时比较总样本平均值与样地平均值发现,大部分样地平均值显著地偏离总体样本平均值及其置信区间;具体的样地间误差来源因素中,温度因素的方差为

100.13,占样地间总方差的 35.05%,总误差贡献率为 24.13%;降水因素的方差为 87.62,占样地间总方差的 30.37%,总误差贡献率为 21.12%;植被类型因素的方差为 22.94,占样地间总方差的 8.03%,总误差贡献率为 5.53%;人为干扰因素方差为 70.86,占样地间总方差的 24.81%,总误差贡献率为 17.08%(表 5)。因此,不同样地温度差异是最主要的样地间误差来源,降水和人为干扰也是重要的误差来源。



注:误差线上方不同的字母表示差异显著( $P < 0.05$ )(下同)。

图 2 不同样地间土壤有机碳密度比较

Fig. 2 Comparison of soil organic carbon density between different sample plots

表 5 样地间误差来源的贡献率

Tab. 5 Contribution rate of error sources in sample plots

样地间 误差来源	方差	贡献率 /%	总误差贡献率 /%
温度	100.13	35.05	24.13
降水	87.62	30.67	21.12
植被类型	22.94	8.03	5.53
人为干扰	70.86	24.81	17.08
其他	4.11	1.44	0.99
总和	285.66	100.00	68.86

### 3.4 采样深度对误差的影响

采样深度对总误差的贡献率仅次于样地设置,但其对误差的影响程度远低于样地设置。通过比较土壤表层 1 m 以内不同土层有机碳密度的平均值发现,组间差异不显著,但组内误差线很长,组内误差很大,并且所有土层的土壤有机碳密度平均值均接近于总体样本的平均值,且均在总体样本平均值置信区间范围内,其中 0~10 cm 和 30~40 cm 土层的土壤有机碳密度最接近于总体样本平均值(图 3)。

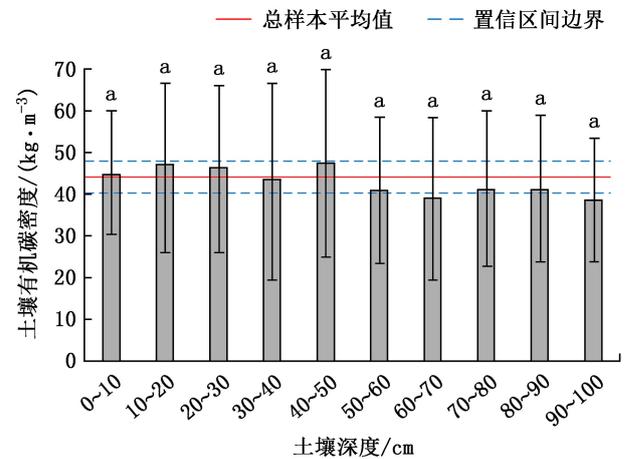


图 3 不同土层深度土壤有机碳密度比较

Fig. 3 Comparison of soil organic carbon density in different soil depths

说明若尔盖泥炭地的碳储量比较丰富,表层 1 m 以内的土壤有机碳密度差异不显著且保持在较高水平,若尔盖泥炭地表层 1 m 土壤有机碳密度无显著的垂直梯度特征。

## 4 结论与讨论

对若尔盖泥炭地土壤表层 1 m 的单位面积有机碳储量进行估算,首先对土壤有机碳密度数据进行统计分析检验,数据满足正态分布的前提条件,代入公式计算出土壤有机碳储量结果为 43.21 kt/km<sup>2</sup>,此外,计算出土壤有机碳储量 99% 置信区间为 40.08~46.33 kt/km<sup>2</sup>。这些结果是建立在严谨的数理统计理论推导和数据检验前提下获得的无偏估计,且与过去已发表的论文中的结果相比,本研究的估算值比较接近于这些研究估算结果的平均值。

本研究基于样品采集和质量控制模式(SAX)对若尔盖泥炭地土壤有机碳储量进行了误差分析,并使用 Robust 方差分析计算 4 类误差来源对总误差的贡献率:样地间(68.86%)>采样深度(17.58%)>样地内(10.85%)>测定误差(2.70%)。温度、降水、植被类型和人为活动是最主要的样地间误差来源,通过影响土壤有机碳积累和分解而影响到土壤有机碳储量<sup>[5,7,11-13]</sup>,其中温度对总误差的贡献率达 24.13%,是最主要的环境影响因素,这是由于温度是影响土壤动物和微生物代谢的最主要因素,温度越高,生物的呼吸作用越强,土壤有机碳分解越快,净累积量越低,土壤碳总储量下降<sup>[39]</sup>;降水的作用也非常重要,其对总误差的贡献率达 21.12%,降水量直接影响到土壤含水率,土壤含水量过高,土壤生物的呼吸作用会受到抑制,有利于土壤有机碳的积累,增加土壤碳储量<sup>[39]</sup>。值得注意的是,人类干扰也贡献了 17.08% 的方差,占据了较大比重,若尔盖地区的主要人为干扰活动为排水以促进农业生产和泥炭的开采,其次是放牧,这些活动直接加快了泥炭地的碳分解速率并减少了植被对土壤的碳输入,最终降低了土壤有机碳储量<sup>[40]</sup>。此外,本研究对土层深度贡献的误差进行测度后发现,其误差贡献率远低于样地间差异。通过对比表层 1 m 中各土层土壤碳密度发现,不同土层的土壤碳密度值差异不显著,均接近整体平均值,因此,在未来的研究中,针对若尔盖泥炭地表层土壤有机碳的估算,可适当减少土层深度采样梯度,这样可以提高研究效率,节省出的采样成本可用于更多样地设置,进一步提升研究结果的准确性。

若尔盖泥炭地是我国重要的碳汇,储存着大量的土壤有机碳,诸如温度和降水等自然因素是影响若尔盖泥炭地碳储量的主要环境因素,在全球气候变化的大背景下,当地管理者需加强对环境变化监

测力度,实时掌握若尔盖湿地状况;人为因素的管控也是重要的管理措施,对于碳储量较高区域,如纳勒桥、黑河和月亮湾等,设立禁入区,其他重要区域实施退牧还草、退耕还草,逐步恢复生态系统,提高碳储量。

## 参考文献:

- [1] 秋新选,邓喜庆. 云南省主要森林土壤有机碳密度估测的初步研究[J]. 林业调查规划,2018,43(4):7-9,15.
- [2] WALI M K, EVRENDILEK F, WEST T O, et al. Assessing terrestrial ecosystem sustainability: Usefulness of regional carbon and nitrogen models[J]. Nature & Resources, 1999, 35(4):21-33.
- [3] AMUNDSON R. The carbon budget in soils[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 2001, 29(1):535-562.
- [4] ISE T, DUNN A L, WOFSY S C, et al. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(11):763-766.
- [5] 刘骞,汤洁. 盐碱芦苇湿地土壤活性有机碳组分垂直分布及相关性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(5):1760-1766.
- [6] ERIC A, DAVIDSON, IVAN A, et al. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(7081):165-173.
- [7] 高俊琴,欧阳华,张锋,等. 若尔盖高寒湿地表层土壤有机碳空间分布特征[J]. 生态环境, 2007, 16(6):1723-1727.
- [8] 张骁栋,王金枝,颜亮,等. 水位和施氮对若尔盖高寒湿地土壤非共生固氮的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(21):7630-7637.
- [9] 田应兵,熊明彪,熊晓山,等. 若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4):490-495.
- [10] 孙飞达,李飞,陈文业,等. 若尔盖退化高寒湿地土壤理化性质、酶活性及微生物群落的季节动态[J]. 生态学报, 2020, 40(7):2396-2406.
- [11] 曹丽斌,李明煜,张立,等. 长三角城市群 CO<sub>2</sub> 排放达峰影响研究[J]. 环境工程, 2020, 38(11):33-38, 59.
- [12] 葛乐明,李通,袁欣,等. 短期排水下泥炭酶活性和碳循环过程的模拟实验研究[J]. 湿地科学, 2020, 18(6):730-739.
- [13] 臧宏宽,杨威杉,张静,等. 京津冀城市群二氧化碳排放达峰研究[J]. 环境工程, 2020, 38(11):19-24, 77.
- [14] 夏敏,王行,刘振亚,等. 四川若尔盖高原 3 种湿地生态系统的碳储量及碳汇价值[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2020, 49(3):392-398.
- [15] 高俊琴,雷光春,李丽,等. 若尔盖高原三种湿地土壤有机碳分布特征[J]. 湿地科学, 2010, 8(4):327-330.

- [16] MA K, LIU J G, BALKOVIC J, et al. Changes in soil organic carbon stocks of wetlands on China's Zoige plateau from 1980 to 2010[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 327: 18-28.
- [17] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 等. 若尔盖高原退化湿地土壤有机碳储量[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 27-32.
- [18] 蔡倩倩, 郭志华, 胡启鹏, 等. 若尔盖高寒嵩草草甸湿地不同水分条件下土壤有机碳的垂直分布[J]. *林业科学*, 2013, 49(3): 9-16.
- [19] WU H B, GUO Z T, GAO Q, et al. Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 413-421.
- [20] 娄雪冬, 翟生强, 康冰, 等. 若尔盖泥炭地溶解有机碳季节变化特征及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(2): 157-163.
- [21] 李敏. 森林土壤碳储量研究综述[J]. *林业调查规划*, 2018, 43(4): 21-24, 50.
- [22] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [23] 展争艳, 李小刚, 张德罡, 等. 利用方式对高寒牧区土壤有机碳含量及土壤结构性质的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5): 777-782.
- [24] 张剑, 王利平, 谢建平, 等. 敦煌阳关湿地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2455-2464.
- [25] 申格, 徐斌, 金云翔, 等. 若尔盖高原湿地研究进展[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(4): 76-82, 89.
- [26] 陈心桐, 徐天乐, 李雪静, 等. 中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1133-1140.
- [27] 董德明, 刘森, 朱先磊. 环境分析质量现状与进展[C]//吉林省环境科学学会(长春). 1997年年会论文集, 1997.
- [28] 沈松平, 王军, 杨铭军. 若尔盖高原沼泽湿地萎缩退化要因初探[J]. *四川地质学报*, 2003, 23(2): 123-125.
- [29] 董德明, 朱先磊, 房春生, 等. 土壤样品分析全程质量控制方法及应用计算程序[J]. *吉林大学自然科学学报*, 2000(1): 83-86.
- [30] 程鹏飞, 王金亮, 王雪梅, 等. 森林生态系统碳储量估算方法研究进展[J]. *林业调查规划*, 2009, 34(6): 39-45.
- [31] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [32] 张大林, 刘福波. 区间估计原理探讨及实例应用[J]. *科技视界*, 2019(10): 12-15.
- [33] 马一江, 韩利娜. 基于大样本的总体比例区间估计问题浅析[J]. *科技与创新*, 2020(19): 24-25.
- [34] RAMSEY M H, THOMPSON M, HALE M. Objective evaluation of precision requirements for geochemical analysis using robust analysis of variance[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1992, 44: 23-36.
- [35] RAMSEY M H. Sampling and analytical quality control (SAX) for improved error estimation in the measurement of Pb in the environment using robust analysis of variance[J]. *Applied Geochemistry*, 1993(2): 149-153.
- [36] 何锡文, 郭薇. 化学计量——取样学最近的进展[J]. *分析化学*, 1995, 23(12): 1455-1461.
- [37] 闫东锋, 贺文, 杨喜田. 栓皮栎人工林灌木层植物多样性的空间分布及其与光环境的关系[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3605-3613.
- [38] 王效科, 苏跃波, 任玉芬, 等. 城市生态系统: 高度空间异质性[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5103-5112.
- [39] 宁文晓, 刘旭阳, 王振亭. 巴丹吉林沙漠气温和降水特征及空间分层异质性[J]. *中国科学院大学学报*, 2021, 38(1): 103-113.
- [40] 叶超, 张昀, 燕香梅, 等. 秸秆还田方式和数量对棕壤有机碳活性的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2019, 37(3): 343-351.

责任编辑: 许易琦