doi: 10.11720/wtyht.2026.0111
金戈, 施泽明, 张亚峰, 等. 川南兴文县土壤有机质空间分布特征、肥力特征与碳储量评估[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 794-803. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0111
Jin G, Shi Z M, Zhang Y F, et al. Spatial variation in soil organic matter, fertility characteristics, and carbon stock assessment in Xingwen County, Southern Sichuan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 794-803. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0111

川南兴文县土壤有机质空间分布特征、肥力特征与碳储量评估

金戈[1], 施泽明[1], 张亚峰[1,2], 周兆雨[1], 吴小均[3], 王峻源[3], 王天钺[3], 邓欢[3], 时章亮[3], 张华[3]
(1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 2. 青海省第五地质勘查院, 青海 西宁 810099; 3. 四川省综合地质调查研究所, 四川 成都 610081)

摘 要: 为探究喀斯特过渡区县域尺度土壤有机质(SOM)的空间分异规律, 以四川省兴文县为研究区, 基于3 497 件表层土壤样品, 分析了 SOM、全氮(TN)、全磷(TP)及 pH 的特征, 揭示了不同地层单元与海拔区间的 SOM 差异, 并估算了表层土壤有机碳(SOC)的密度与储量。结果表明, 研究区表层土壤 SOM 含量均值为 22.70×10^{-3}, 空间分异显著, 土壤呈偏酸性(pH 均值 5.71), TN 较丰富而 TP 偏低; 地质背景是控制 SOM 空间分异的主导因素, 海拔为次级影响因子, 二叠系地层单元土壤 SOM 含量均值最高(29.77×10^{-3}), 其中袁家洞-兴文组含煤碎屑岩系区土壤 SOM 含量高达 36.39×10^{-3}, 侏罗系最低(16.80×10^{-3}), 且高海拔区(>1 000 m)SOM 含量较低海拔区(<400 m)提高约 35%; 土壤肥力呈现"氮足、磷缺、有机质较丰"的格局; 表层 SOC 平均密度为 3 423 t/km^2, 总储量约 3.88×10^6 t, 二叠系地层单元土壤碳密度约为侏罗系的 1.77 倍。该研究结果可为喀斯特过渡区基于地质背景的分区耕地培肥、差异化的碳汇管理(二叠系土壤高碳密度区严格保护、侏罗系土壤低碳密度区增碳培肥)以及磷素养分精准调控提供地球化学依据。

关键词: 土壤有机质; 地质背景; 喀斯特过渡区; 空间分异; 碳储量
中图分类号: P595; X142; P632; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0794-10

0 引言

土壤有机质(soil organic matter, SOM)不仅是土壤质量的核心指标, 也是陆地生态系统中规模最大的活动性碳库[1], 其表层(0~30 cm)有机碳总储量约为大气圈和生物圈碳库的 2.5 倍,微小扰动即可对全球碳循环和气候变化产生显著影响[1-3]。我国西南喀斯特及其过渡区域母岩岩性复杂、地形破碎、风化—成土作用强烈, 导致土壤有机质在小尺度上呈现较强空间变异[4-5]。这种高度异质性使得传统管理框架难以适应精细化耕地培肥与生态修复的需求。系统刻画土壤有机质的空间分布规律及其主控因素,是实施差异化耕地质量提升和"双碳"战略的基础工作[6]。

地质背景对土壤有机质积累与转化的控制作用近年来受到广泛关注。母岩岩性通过控制成土物质来源、风化产物组成、土壤酸碱度和质地, 间接调控有机质的输入、稳定与矿化过程[7-8]。在碳酸盐岩区和黑色页岩区, Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子通过形成"金属—有机质"桥键复合物可显著增强 SOM 的稳定性[9-10]; 而紫色砂泥岩、酸性硅铝质岩石区, 由于风化产物以蒙脱石、伊利石等 2∶1 型黏土矿物为主, 土壤偏酸, SOM 的物理化学保护机制相对较弱[11-13]。煤系地层及黑色岩系常因碳质沉积物的原生贡献, 使其上覆

收稿日期: 2026-05-12; **修回日期**: 2026-05-20
基金项目: 四川省自然资源厅地勘基金项目(2013895); 成都理工大学研究生拔尖创新人才培育项目"川南兴文地区典型岩层风化过程中 DOM 的演化特征及其对重金属富集的影响机制"(2025BJCX-DF002)
第一作者: 金戈(1997-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤健康和环境地球化学。Email: jinge@stu.cdut.edu.cn; 2904849017@qq.com
通讯作者: 施泽明(1968-), 男, 教授, 主要研究方向为环境地球化学。Email: shizm@cdut.edu.cn

土壤具有偏高的 SOM 背景值并伴随有害元素的扩散[14-15]。基于多目标区域地球化学调查的高精度大数据, 为研究县域尺度上 SOM、肥力指标与 SOC 储量的空间分异提供了有力工具[16]。然而, 对地质背景多元、地层岩性出露完整的县域内 SOM 空间分布格局及其与海拔梯度的耦合关系, 尚缺乏系统性的多尺度刻画。

兴文县位于四川盆地南缘向云贵高原过渡的喀斯特带, 境内出露寒武系至第四系相对完整的沉积序列, 涵盖纯灰岩、白云岩、碎屑岩、含煤系地层及第四系松散沉积物等多种岩性类型, 海拔跨度大(275~1 795 m), 为研究地层与海拔叠加下的 SOM 空间分布提供了天然实验场。课题组在该区已确认二叠系尤其是茅口组(P_1m)是研究区 Cd 等元素富集的关键层位[17]; 与兴文县相邻、地质背景类似的屏山县已有研究表明, 土壤 Se 及主量元素分布同样具有显著的地层依赖特征[18]。然而,该区 SOM 的空间分布规律、主控因素、肥力综合评价以及表层 SOC 密度与碳源汇效应, 迄今仍缺乏系统研究。

基于上述背景, 笔者以兴文县 3 497 件表层土壤样品为基础, 系统刻画兴文县表层土壤理化性质基本特征, 从地层单元和海拔区间两个维度揭示 SOM 的空间分布差异及其控制因素, 依据全国土壤普查肥力分级标准开展土壤养分肥力综合评价, 并估算表层 SOC 密度与储量, 探讨其在区域“双碳”战略中的指示意义。研究结果可为同类喀斯特过渡区耕地质量提升、生态保护以及县域碳汇管理提供地球化学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

兴文县(104°52′32″~105°20′55″E, 28°4′11″~28°27′15″N)位于四川省宜宾市南部(图 1), 总面积 1 379.89 km^2, 属亚热带湿润季风气候, 年均气温 17.7~18.2 ℃, 多年平均降水量约 1 085 mm, 土壤温度、水分条件较为有利于化学风化作用进行。区内地势总体上由西南向东北倾降,海拔 275~1 795 m, 东北部为低山丘陵, 西南部为典型岩溶峰丛山地。土地利用以耕地(31.79%)和林地(50.18%)为主[17]。当地土壤种植有粮食作物、经济作物和果树等[19]。

研究区以珙长背斜为主要构造框架, 出露地层分别有寒武系(Є)、奥陶系(O)、志留系(S)、二叠系(P)、三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系(K)及第四系(Q)沉积物[17, 19]。各地质单元主要岩性为: 寒武系以白云岩、白云质灰岩为主; 奥陶系以泥岩、灰岩、瘤状灰岩为主; 志留系以页岩、粉砂岩为主; 二叠系自下而上依次为以石英砂岩、泥岩为主的梁山组—栖霞组(P_1l+q), 以纯灰岩为主的茅口组(P_1m)和含煤碎屑岩系的袁家洞—兴文组(P_2y+x); 三叠系以飞仙关

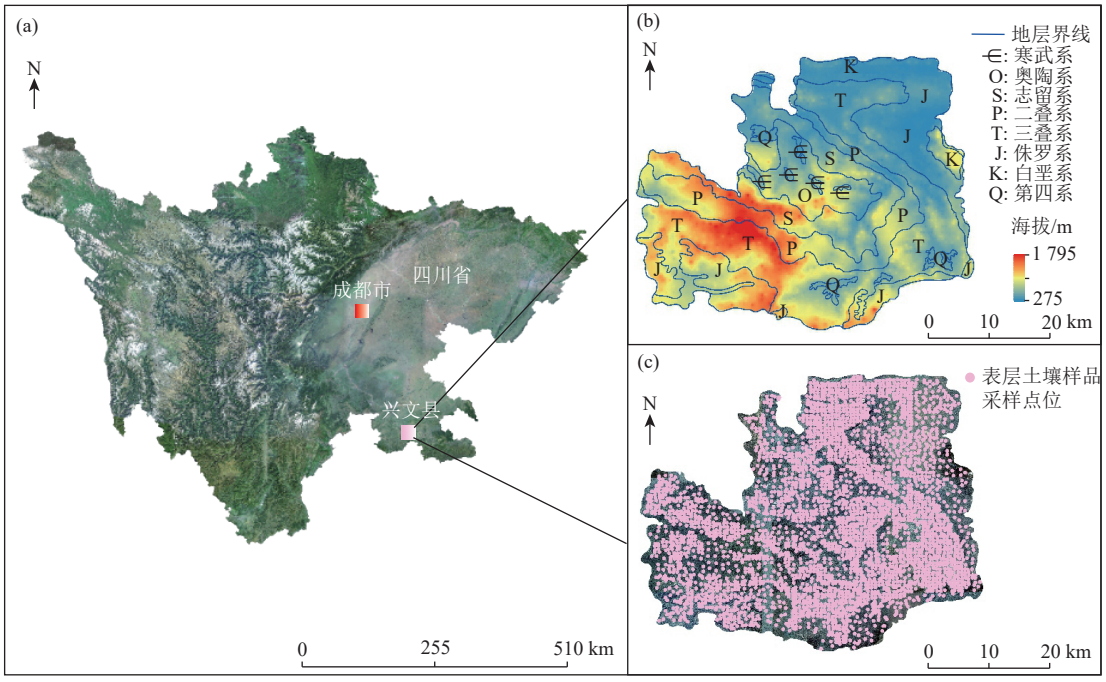


图 1　兴文县地理位置(a)、海拔—地质耦合图(b)及采样点位置分布(c)

Fig. 1　The geographical location (a), altitude-geological coupling diagram (b) and the distribution of sampling points (c) of Xingwen County

组紫红色泥岩、嘉陵江组白云质灰岩、雷口坡组白云岩、须家河组砂岩为主；侏罗系以紫红色砂—泥岩互层（自流井组、沙溪庙组、遂宁组、蓬莱镇组）为主；白垩系以紫红色砂砾岩为主；第四系为残坡积、冲洪积层。

1.2 样品采集与测试

本研究使用的 3 497 件表层土壤（0~20 cm）样品由四川省综合地质调查研究所（原四川省地质调查研究院）于 2014 年按 1 km×1 km 网格采集完成，采样点均匀覆盖全县地质单元和土地利用类型。每件样品由采样点周围 5 个子样混合而成，采样过程严格按照《土地质量地球化学评估技术要求》（DD2008-06）执行。野外同步记录采样点经纬度、海拔、地形地貌及周边土地利用等信息。样品自然风干后剔除植物根系、砾石等杂物。SOM 和 pH 测试样品过 1.7 mm 筛，全氮、全磷测试样品过 75 μm 筛。土壤有机质（SOM）采用重铬酸钾容量法测定（检出限 0.5×10^{-3}）；pH 采用离子选择电极法测定（水土比 2.5 ∶ 1）；全氮采用凯氏定氮法测定（检出限 50×10^{-6}）；全磷采用钼锑抗比色法测定（检出限 50×10^{-6}）。测试在四川省综合地质调查研究所实验室完成，测试过程同步插入国家土壤标准物质进行准确度控制，并按每批 11 件样品插入 1 件平行样进行精密度控制，合格率均大于 95%，数据质量可靠。

1.3 数据分析方法

采用克里金法在 ArcGIS 10.5 平台上插值生成指标空间分布图。数据的整理与基本统计分析在 Microsoft Excel 2019 和 Origin2025 中完成。具体方法包括：按地层单元、海拔区间分别对 SOM 含量进行分组统计（最大值、最小值、均值、标准差、中位数、变异系数等）；使用 Paired Comparision Plot 插件对分组进行显著性差异分析。

土壤碳估算的计算公式为：

$$w(\mathrm{SOC}) = w(\mathrm{SOM}) \times 0.58, \quad (1)$$

$$D_{\mathrm{SOC}} = w(\mathrm{SOC}) \times \rho \times D \times 10, \quad (2)$$

$$M_{\mathrm{SOC}} = D_{\mathrm{SOC}} \times S \times f, \quad (3)$$

式中：w(SOC) 为有机碳含量（10^{-3}）；D_{SOC} 为土壤有机碳密度（t/km^2）；ρ 为土壤容重（g/cm^3），按区域代表值取 1.3 g/cm^3[20]；D 为表层土壤厚度（20 cm）[21]；10 为单位换算系数；M_{SOC} 为有机碳储量；S 为区域面积，按照县域内耕地与林地总面积 1 131.5 km^2（占县域面积的 82%）取值[17]；f 为面积占比，本次研究为 1 km×1 km 的网格化采样，因此面积占比可近似等同于按不同地层分类情况下的样本占比。

土壤肥力等级评价依据全国土壤普查养分分级标准开展[22-23]。按含量水平，SOM 分为 6 级：一级（$>40\times10^{-3}$，很丰富）、二级（$(30\sim40)\times10^{-3}$，丰富）、三级（$(20\sim30)\times10^{-3}$，中等）、四级（$(10\sim20)\times10^{-3}$，缺乏）、五级（$(6\sim10)\times10^{-3}$，很缺乏）、六级（$<6\times10^{-3}$，极缺乏）；全氮分为 6 级：一级（$>2.0\times10^{-3}$）、二级（$(1.5\sim2.0)\times10^{-3}$）、三级（$(1.0\sim1.5)\times10^{-3}$）、四级（$(0.75\sim1.0)\times10^{-3}$）、五级（$(0.5\sim0.75)\times10^{-3}$）、六级（$<0.5\times10^{-3}$）；全磷分为 6 级：一级（$>1.0\times10^{-3}$）、二级（$(0.8\sim1.0)\times10^{-3}$）、三级（$(0.6\sim0.8)\times10^{-3}$）、四级（$(0.4\sim0.6)\times10^{-3}$）、五级（$(0.2\sim0.4)\times10^{-3}$）、六级（$<0.2\times10^{-3}$）。

2 结果与讨论

2.1 表层土壤理化指标基本特征

兴文县表层土壤主要理化指标统计值如表 1 所示。研究区表层 SOM 含量为（$2.10\sim84.60)\times10^{-3}$，均值 22.70×10^{-3}，变异系数较高（46.70%），反映区域内 SOM 空间分异显著。土壤碳氮比（C/N）范围为 1.47～40.97，变异系数较大（30.61%），表明区域内 SOM 分解和生成之间的动态过程在空间上存在差异[20,24]。全氮（TN）均值为 1.49×10^{-3}，全磷（TP）均值为 0.86×10^{-3}。全氮处于较丰富水平，全磷处于丰富水平，表明研究区土壤具备较好的氮素供给能力[22]。pH 均值为 5.71，最小值为 3.80，最大值为 8.66，偏酸性样点（pH<6.5）占总样点的 78.38%，碱性样点（pH>7.5）仅占 11.01%，反映出湿热气候下盐基离子强烈淋失、土壤普遍酸化的特征[24-26]。

表 1 兴文县表层土壤主要理化指标统计特征 (n=3 497)

Table 1 Statistical characteristics of the main physicochemical properties of topsoil in Xingwen County (n=3 497)

指标	单位	最小值	最大值	均值	中位数	标准差	C_V/%
有机质 (SOM)	10^{-3}	2.10	84.60	22.70	20.80	10.60	46.70
有机碳 (SOC)	10^{-3}	1.22	49.07	13.16	12.06	6.15	46.70
全氮 (TN)	10^{-3}	0.28	4.23	1.49	1.43	0.48	32.30
全磷 (TP)	10^{-3}	0.16	3.84	0.86	0.77	0.43	50.66
C/N		1.47	40.97	8.76	8.42	2.68	30.61
pH		3.80	8.66	5.71	5.36	1.09	19.10

2.2　不同地层单元的土壤有机质含量分布差异

如图 2a、表 2 所示, 按地层单元分组统计土壤有机质(SOM)含量。各地层单元 SOM 含量均值差异显著(p<0.05), 由高至低排序为: 二叠系(29.77×10^{-3})>第四系(25.01×10^{-3})>三叠系(24.16×10^{-3})>寒武系(24.13×10^{-3})>奥陶系(22.64×10^{-3})>志留系(21.43×10^{-3})>白垩系(20.72×10^{-3})>侏罗系(16.80×10^{-3})。其中二叠系地层单元的 SOM 含量显著高于其他地层单元, 侏罗系则显著低于其他地层单元。并且从 SOM 含量的空间分布(图 2c)来看, SOM 高值区主要分布在长珙背斜南西翼、二叠系灰岩与含煤地层出露的喀斯特中高山区, 呈条带状沿地层走向延伸; SOM 低值区集中分布在县域东北部及中部丘陵区, 与侏罗系紫红色砂泥岩出露范围高度吻合。

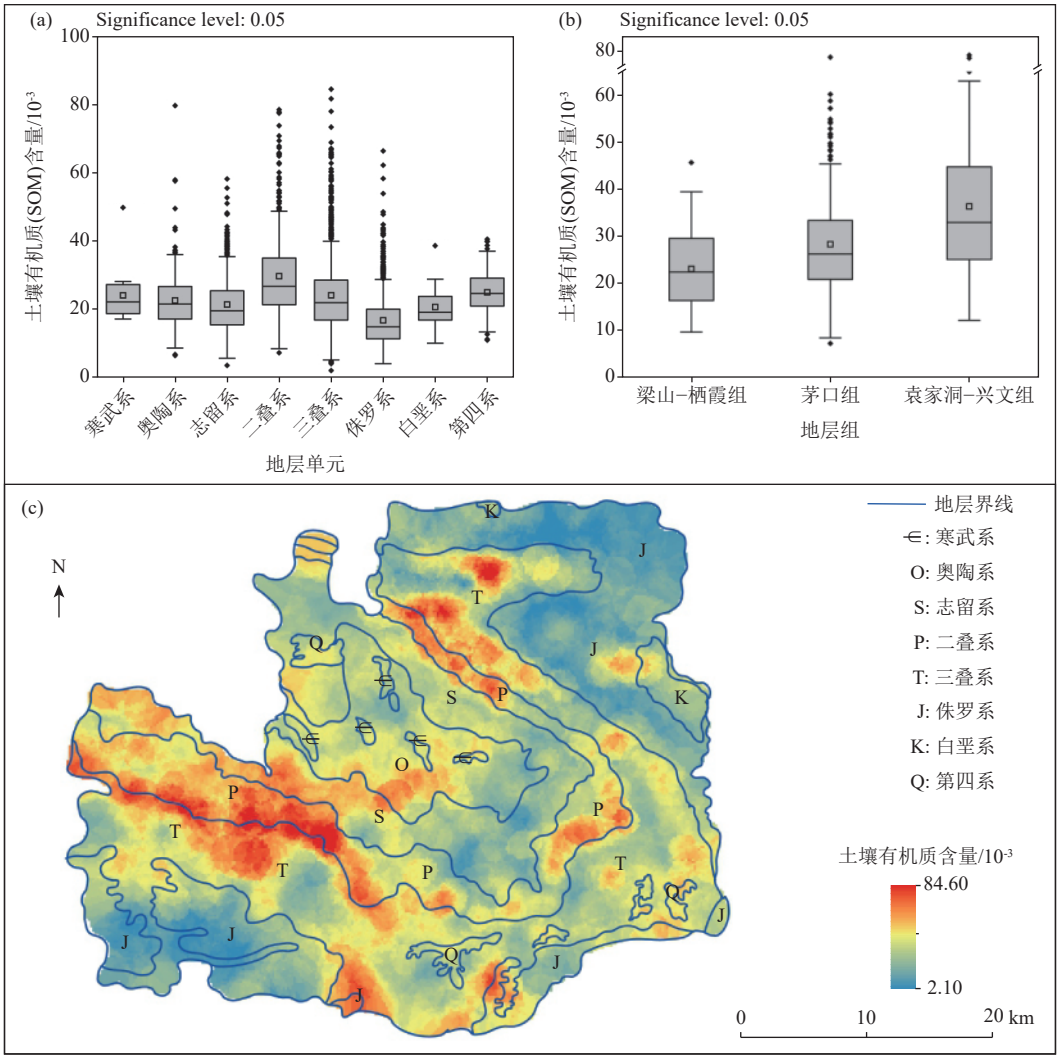


图 2　不同地层单元土壤有机质(SOM)含量箱型图(a)、二叠系地层单元不同亚组土壤有机质(SOM)含量箱型图(b)及土壤有机质(SOM)含量空间分布(c)

Fig. 2　Box plots of soil organic matter (SOM) content for different stratigraphic units(a), box plots of soil organic matter (SOM) content for different subunits of the Permian stratigraphic unit(b), and spatial distribution of soil organic matter (SOM) content(c)

进一步将二叠系细分为 3 个主要地层组(图 2b、表 2), 显示出更精细的 SOM 分异格局: 袁家洞—兴文组(平均值 36.39×10^{-3})>茅口组(平均值 28.34×10^{-3})>梁山—栖霞组(平均值 23.11 ×10^{-3})。袁家洞—兴文组含煤碎屑岩系 SOM 显著偏高可能受两方面的影响: 一方面, 含煤地层中的原生有机质(分散有机碳、煤层等)在风化成土过程中可直接向表层土壤输入含碳有机质, 使该地层形成的土壤的背景碳含量明显抬升[27-28]; 另一方面, 含煤地层常富集硫铁矿等还原性矿物, 其氧化过程不仅形成酸性环境(表 2, 袁家洞—兴文组 pH 平均值为 5.68), 更释放出大量活性铁, 由此生成的次生铁氧化物可通过吸附和络合作用显著增强 SOM 的物理化学保护[29-30]。

茅口组的纯灰岩区岩性单一且易风化, CaO、

表 2 不同地质单元表层土壤 SOM 及主要养分指标统计

Table 2 Statistics of surfacesoil SOM and key nutrient indicators in different geological units

地层单元	样本数	SOM均值/10^{-3}	TN均值/10^{-3}	TP均值/10^{-3}	pH均值
二叠系	478	29.77	1.69	1.02	5.83
第四系	85	25.01	1.65	0.82	5.95
三叠系	1247	24.16	1.49	1.01	5.83
寒武系	14	24.13	1.76	1.81	6.02
奥陶系	356	22.64	1.69	1.08	5.16
志留系	495	21.43	1.61	0.70	5.58
白垩系	20	20.72	1.25	0.54	4.91
侏罗系	802	16.80	1.19	0.52	5.78
梁山—栖霞组	22	23.11	1.48	0.83	5.53
茅口组	357	28.34	1.68	0.91	5.89
袁家洞—兴文组	99	36.39	1.81	1.46	5.68

MgO 等盐基组分淋失强烈。此过程中，比表面积大、活性高、对有机分子(尤其是多酚类、羧基类官能团)具有强吸附与稳定能力的次生矿物积累较多并容易形成有机—矿物复合体[17, 24, 31]。因此二叠系茅口组灰岩地层也存在 SOM 富集的区域。而梁山组成土母岩含石英砂岩、泥岩，其岩性组合中抗风化矿物比例较高、母质中碳贡献较低，限制了土壤中 SOM 的积累。此外，相对二叠系而言，侏罗系以红色砂泥岩为主，砂质组分含量高、抗风化强，且区内侏罗系地层多分布于地势相对平缓、易遭受农业耕作扰动的山地—丘陵地带，这两方面共同导致侏罗系地层 SOM 积累不足、分解迁移加剧，从而表现为 SOM 均值最低。上述发现和笔者之前在兴文县发现的 Cd 等重金属富集机制的认识相似，地球化学异常高背景与 SOM 富集很可能均由地质—风化—成土过程链共同驱动[17]。

2.3 不同海拔区间的土壤有机质含量分布差异

将研究区海拔以 400 m 为间距分为 5 个区间，统计结果如图 3、表 3 所示。土壤有机质含量随海拔升高呈递增趋势。小于 400 m 的低海拔区 SOM 含量均值仅为 21.33×10^{-3}；当海拔升高到>1 000 m 时，SOM 含量均值显著上升至 28.80×10^{-3}，较低海拔区提高约 35%。海拔大于 800 m 和 1 000 m 的有机碳含量、全氮含量也显著高于低海拔区间的土壤。课题组对该地区表层土壤溶解性有机质(DOM)研究发现，位于珙长背斜南西翼的高海拔土壤样品(PMX19，海拔 1 419 m)中含氮的色氨酸类 DOM 占比较高(54.81%)[17]。这一规律与已有研究结果基本一致：随海拔升高，年均气温下降，SOM 的分解强度下降，凋落物输入与 SOM 矿化输出之间的平衡向积累的一侧倾斜；同时高海拔区地形坡度大、人为耕作扰动相对较小，植被覆盖度更高，多重因素叠加促使 SOM 得以更长时间地保存[32-37]。但值得注意的是，本研究中 SOM 含量在中低海拔区间差异的显著性并不明显(图 3)，说明在中低海拔高程区间海拔仅是影响 SOM 空间分异的次级影响因子，地质背景的影响作用更为关键，这与表 2 所反映的地层差异规律相互印证。

2.4 土壤养分肥力综合评价

按全国土壤普查土壤养分分级标准对研究区 SOM、TN、TP 分别进行肥力分级，结果列于表 4。从 SOM 分级结果看，三级及以上(SOM 含量≥20×10^{-3})样点累计占 53.42%，其中一级(>40×10^{-3}，很丰富)占 5.98%，二级(($30\sim40)\times10^{-3}$，丰富)占 13.24%，三级(($20\sim30)\times10^{-3}$，中等)占 34.20%；五级和六级(<10×10^{-3}，缺乏及以下)样点合计仅占 6.03%。整体而言，研究区表层土壤有机质属于中等偏丰富水平，反映湿热气候和喀斯特碳酸盐岩成土环境对 SOM 的良好保存功能[38]。

从全氮(TN)分级结果看，三级及以上(TN 含量≥1.0×10^{-3})样点累计占 85.85%，其中一级(>2.0×10^{-3})占 14.04%，二级(($1.5\sim2.0)\times10^{-3}$)占 29.97%；五级和六级(TN 含量<0.75×10^{-3})合计仅占 2.40%；反映兴文县表层土壤氮素水平十分丰富。SOM 作为土壤全氮的最主要载体，其高含量保证了土壤的全氮供给能力[39]。但全磷(TP)的分级结果显示出截然不同的格局：三级及以上样点(TP 含量≥0.8×10^{-3})仅占 46.93%，而五级(($0.4\sim0.6)\times10^{-3}$)和六级(TP 含量<0.4×10^{-3})样点合计达 32.05%；表明研究区土壤普遍缺磷，这是制约耕地生产力的主要养分瓶颈。研究区土壤偏酸性(78.38% 样点 pH<6.5)，酸性条件下游离的 Fe、Al 离子与磷酸根形成难溶磷化合物，磷的有效性降低[38]，加之该区为典型岩溶地貌，土层薄、磷素淋溶损失明显[40-41]，这都是造成区域土壤缺磷的

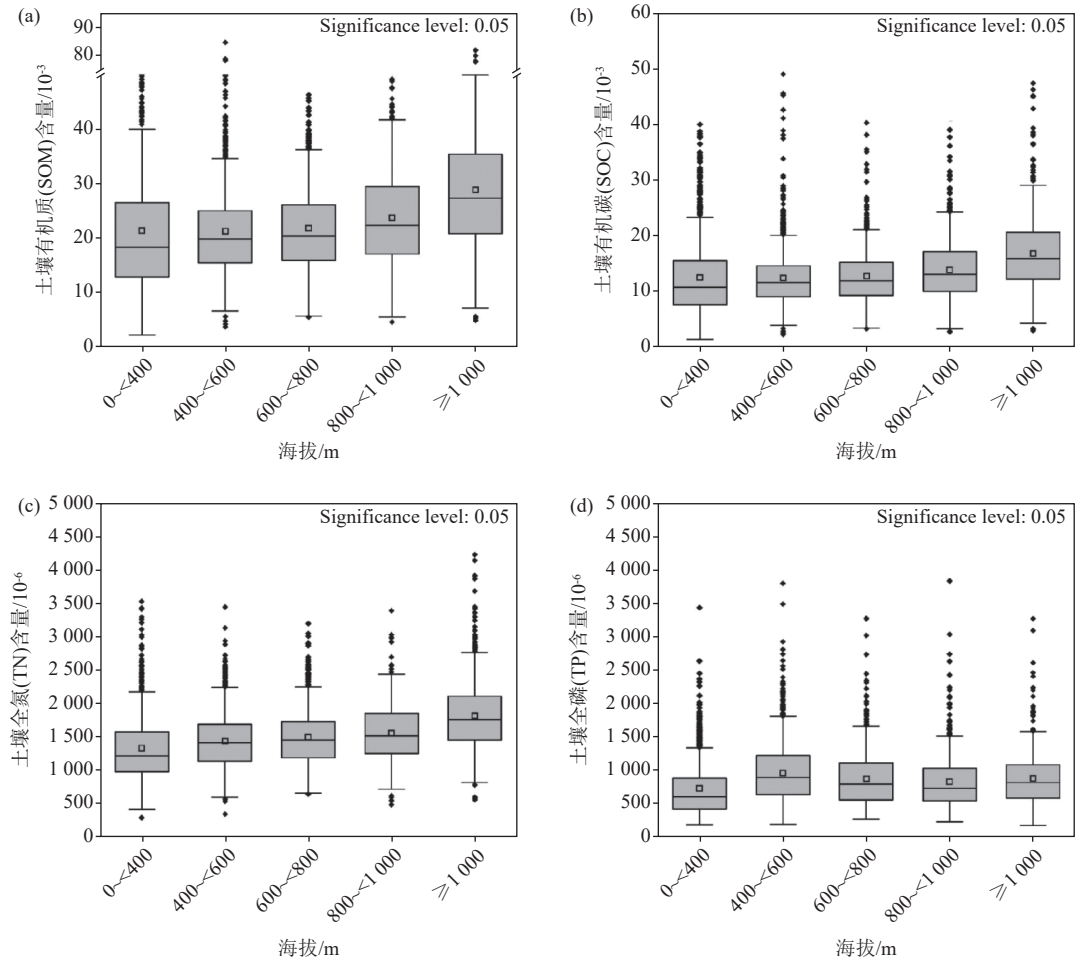


图 3　不同海拔区间土壤有机质(SOM)含量对比箱型图(a)、有机碳(SOC)含量对比箱型图(b)、全氮(TN)含量对比箱型图(c)和全磷(TP)含量对比箱型图(d)

Fig. 3　Box-and-whisker plot comparing soil organic matter (SOM) across different elevation zones(a), box-and-whisker plot comparing soil organic carbon (SOC) content(b), box-and-whisker plot comparing total nitrogen (TN) content(c), and box-and-whisker plot comparing total phosphorus (TP) content (d)

表 3　不同海拔区间表层土壤有机质统计特征

Table 3　Statistical characteristics of surface soil organic matter across different altitude zones

海拔区间	参数	TN含量/10^{-3}	pH值	SOM含量/10^{-3}	SOC含量/10^{-3}	TP含量/10^{-3}
0 ~ < 400 m	最大值	3.53	8.66	69.00	40.02	3.44
	最小值	0.28	3.80	2.10	1.22	0.18
	平均值	1.33	5.97	21.33	12.37	0.72
400 ~ < 600 m	最大值	3.45	8.50	84.60	49.07	3.80
	最小值	0.34	3.86	3.60	2.09	0.18
	平均值	1.44	5.78	21.22	12.31	0.95
600 ~ < 800 m	最大值	3.20	8.44	69.50	40.31	3.27
	最小值	0.64	3.98	5.40	3.13	0.26
	平均值	1.49	5.60	21.76	12.62	0.87
800 ~ < 1 000 m	最大值	3.39	8.31	67.40	39.09	3.84
	最小值	0.48	4.08	4.50	2.61	0.22
	平均值	1.55	5.54	23.70	13.74	0.82
≥1 000 m	最大值	4.23	8.22	81.80	47.44	3.27
	最小值	0.55	3.91	4.80	2.78	0.16
	平均值	1.81	5.55	28.80	16.71	0.87

表 4 兴文县表层土壤 SOM、全氮、全磷肥力分级统计

Table 4 Statistical classification of soil organic matter, total nitrogen, and total phosphorus in topsoil in Xingwen County

等级	评价	SOM		TN		TP	
		分级标准/10^{-3}	样点占比/%	分级标准/10^{-3}	样点占比/%	分级标准/10^{-3}	样点占比/%
一级	很丰富	>40	5.98	>2.0	14.04	>1.5	7.84
二级	丰富	30~40	13.24	1.5~2.0	29.97	1.0~1.5	23.39
三级	中等	20~30	34.20	1.0~1.5	41.84	0.8~1.0	15.70
四级	缺乏	10~20	40.55	0.75~1.0	11.75	0.6~0.8	21.02
五级	很缺乏	6~10	5.23	0.5~0.75	2.26	0.4~0.6	21.13
六级	极缺乏	<6	0.80	<0.5	0.14	<0.4	10.92

重要因素。

综合来看，兴文县表层土壤呈现“氮足、磷缺、有机质较丰”的肥力格局。在“双碳”目标和耕地质量提升要求下，应加强磷肥的科学合理施用、推广有机肥替代部分化肥的精准管理模式，在维持现有较高 SOM 水平的同时实现磷养分的有效改善[42-43]。

2.5 表层土壤有机碳储量及其碳汇/碳源效应

本研究估算了不同地层单元的 SOC 密度与储量，结果如表 5 所示。研究区表层(0~20 cm)SOC 平均密度(D_{SOC})为 3 423 t/km^2(即 3.42 kg/m^2)，与四川省土壤平均水平相当[44]。其中二叠系 D_{SOC}(4 489 t/km^2)显著高于其他地层单元(p<0.05)，约为侏罗系(2 534 t/km^2)的 1.77 倍。按县域内耕地与林地总面积约 1 131.5 km^2(占县域面积的 82%)估算，研究区表层土壤 SOC 总储量约为 3.88×10^6 t。这一数量级与其他区域开展的 SOC 储量估算结果在同一数量级[45]，表明本研究估算结果具有可比性与可靠性。二叠系土壤的高 D_{SOC} 一方面来源于湿热气候和岩溶地貌耦合下植物—微生物体系的碳输入与稳定积累；另一方面，笔者前期研究[17]发现该区茅口组土壤同时富集大量 Cd 并以 Fe-Mn 氧化物结合态稳定存在，意味着其矿物—有机质协同演化过程不仅有利于重金属的固定，也有利于有机碳通过“矿物—有机质团聚体”路径实现物理化学保护，从而表现出更高的碳积累效率[31]。此外，袁家洞—兴文组含煤地层的风化也会导致土壤有机碳密度较高[27-28]。上述地质单元尺度的有机—金属协同稳定机制是值得深入研究的方向。

表 5 不同地层单元表层 (0~20 cm) 土壤有机碳密度 (D_{SOC}) 与碳储量估算

Table 5 Estimation of SOC density and carbon stock in the surface layer (0~20 cm) of different stratigraphic units

地层单元	D_{SOC}均值/(t·km^{-2})	样点数占比/%	估算分单元SOC储量/(10^4 t)
二叠系	4 489	13.7	69.6
第四系	3 772	2.4	10.2
三叠系	3 643	35.7	147.2
寒武系	3 639	0.4	1.7
奥陶系	3 414	10.2	39.4
志留系	3 232	14.2	51.9
白垩系	3 125	0.6	2.1
侏罗系	2 534	22.9	65.7
全县平均/合计	3 423	100	388

从碳源和碳汇的视角看，研究区 SOC 储量呈现显著的空间分异格局，具有两方面的管理启示：其一，二叠系是研究区天然的高碳密度区，在土地利用规划中应重点维护其植被覆盖与表层土壤完整性，避免因毁林开荒、过度放牧等扰动造成的快速碳释放[46]；其二，侏罗系紫色砂—泥岩区 D_{SOC} 低、SOM 稳定性弱、土壤侵蚀强烈，既是当前低肥力区，也是潜在的高固碳潜力区。通过推广秸秆还田、有机肥施用、退耕还林、保护性耕作等措施，理论上可提升碳汇能力[47-48]。

值得深入探讨的是，在二叠系、三叠系等碳酸盐岩广泛分布的喀斯特区，除土壤有机碳外，岩溶作用产生的无机碳汇同样不可忽视[49]。本研究虽未直接量化无机碳通量，但 SOM、D_{SOC} 在碳酸盐岩区的空间分布异质性结合地质背景间接提示，在湿热喀斯特过渡区，有机—无机碳耦合可能是该区碳汇的关键过程，值得在后续研究中开展系统观测和模型模拟。

3 结论

1)兴文县表层土壤有机质(SOM)含量均值为 22.70×10^{-3}，空间分异显著。土壤呈偏酸性(pH 均值 5.71)，全氮(均值 1.49×10^{-3})处于较丰富水平，全磷(均值 0.86×10^{-3})相对偏低。

2)地质背景是控制 SOM 空间分异的主导因素，海拔为次级但显著的正向影响因子。随海拔升高，SOM 含量呈持续递增趋势：高海拔区(>1 000 m)SOM 含量均值(28.80×10^{-3})显著高于低海拔区

(<400 m, 约 21.33×10^{-3}), 极端样点对比提升幅度约 35%; 但中低海拔区间(<400 m、400~600 m、600~800 m)差异不显著(p>0.05), 显示海拔对 SOM 的促进效应主要在 800 m 以上才充分显现。

3)土壤肥力呈现“氮足、磷缺、有机质较丰”的格局。三级及以上(SOM 含量≥20×10^{-3})样点占 53.42%, 全氮三级及以上占 85.85%, 而全磷三级及以上仅占 46.93%, 磷缺乏是当前耕地生产力的主要养分瓶颈。

4)表层土壤(0~20 cm)有机碳平均密度为 3 423 t/km^2, 总储量约 3.88×10^6 t。二叠系土壤碳密度(4 489 t/km^2)约为侏罗系土壤(2 534 t/km^2)的 1.77 倍。建议对二叠系土壤高碳密度区实施严格保护, 对侏罗系土壤低碳密度区采取秸秆还田、有机肥施用等措施提升固碳潜力。

致谢: 感谢所有在野外样品采集和室内试验测试分析的人员。

参考文献(References):

[1] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 384−393.
Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of farmland soil carbon pool in China: Global change and national food security[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 384−393.

[2] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478(7367): 49−56.

[3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623−1627.

[4] 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6580−6593.
Wang L J, Wang P, Sheng M Y. Soil nutrient ecological stoichiometry characteristics and influencing factors in typical rocky desertification ecosystem of karst region in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6580−6593.

[5] Wang M M, Chen H S, Zhang W, et al. Variations and major driving factors for soil nutrients in a typical karst region in Southwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2026, 25(2): 424−435.

[6] 奚小环, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 基于大数据的中国土壤背景值与基准值及其变化特征研究——写在《中国土壤地球化学参数》出版之际 [J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1095−1108.
Xi X H, Hou Q Y, Yang Z F, et al. Research on soil background values, baseline values and their variation characteristics in China based on big data: Written on the occasion of publication of "China Soil Geochemical Parameters"[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1095−1108.

[7] 毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 等. 不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系 [J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2842−2851.
Mao X L, Qiu Z T, Zhang S, et al. Response of aggregate distribution in soils derived from different parent materials to exogenous straw input and its relationship with organic carbon mineralization [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2842−2851.

[8] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区城墙岩群和蓬莱镇组紫色岩上土壤性质研究 [J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1076−1080.
Hu Y F, Deng L J, Zhang S R, et al. Soil properties on purple rocks of Chengqiangyan Group and Penglaizhen Formation in hilly area of central Sichuan[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(6): 1076−1080.

[9] Rowley M C, Grand S, Verrecchia É P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon[J]. Biogeochemistry, 2018, 137(1): 27−49.

[10] Rasmussen C, Southard R J, Horwath W R. Mineral control of organic carbon mineralization in a range of temperate conifer forest soils[J]. Global Change Biology, 2006, 12(5): 834−847.

[11] 龙娟, 廖宇琴, 文首鑫, 等. 活性铁铝矿物对农田土壤有机碳固定的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 1133−1140.
Long J, Liao Y Q, Wen S X, et al. Study on fixation of soil organic carbon by active iron and aluminum minerals in farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(5): 1133−1140.

[12] 何毓容, 赵燮京, 田光龙, 等. 紫色土的矿物组成特点及对土壤肥力的影响 [J]. 土壤通报, 1987(6): 251−254.
He Y R, Zhao X J, Tian G L, et al. Mineral composition characteristics of purple soil and its influence on soil fertility[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1987(6): 251−254.

[13] Knaebel D B, Vestal J R, Federle T W, et al. Microbial mineralization of organic compounds in an acidic agricultural soil: effects of preadsorption to various soil constituents[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, 15(11): 1865−1875.

[14] Parviainen A, Loukola-Ruskeeniemi K. Environmental impact of mineralised black shales[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 192: 65−90.

[15] Wu S, Peng B, Wu N, et al. Mobility and environmental impact of cadmium (Cd) during weathering of carbonaceous black shales in western Hunan, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 470: 134267.

[16] 代杰瑞, 夏学齐, 喻超, 等. 基于地统计的土壤有机碳源汇空间探测和定量评估方法——以山东省耕地土壤为例 [J/OL]. 地质通报, 1−12[2026-05-11]. https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250424.1436.004.
Dai J R, Xia X Q, Yu C, et al. Spatial detection and quantitative assessment method of soil organic carbon source/sink based on geostatistics: A case study of cultivated soil in Shandong Province[J/OL]. Geological Bulletin of China, 1-12[2026-05-11]. https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20250424.1436.004.

[17] Jin G, Shi Z M, Deng H, et al. Influence of DOM on Cd speciation during soil weathering in Permian strata: A case study in Xingwen County, Southern Sichuan Province, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2026, 506: 141585. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2026.141585.

[18] 刘晓波, 张华, 金立新, 等. 四川省屏山县土壤硒地球化学特征及影响因素 [J]. 环境化学, 2017, 36(10): 2246−2252.
Liu X B, Zhang H, Jin L X, et al. Geochemical characteristics and

influencing factors of soil selenium in Pingshan County, Sichuan Province[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(10): 2246−2252.

[19] 张华, 郑勇军, 徐克全, 等. 四川兴文地区硒的地球化学特征及生物效应 [J]. 广东微量元素科学, 2017, 24(5): 9−14.
Zhang H, Zheng Y J, Xu K Q, et al. Geochemical characteristics and biological effects of selenium in Xingwen area, Sichuan[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2017, 24(5): 9−14.

[20] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Huang C Y, Xu J M. Soil science[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010.

[21] 刘庆宇, 马瑛, 程莉, 等. 青海东部表层土壤有机碳密度及其空间分布特征 [J]. 物探与化探, 2023, 47(4): 1098−1108.
Liu Q Y, Ma Y, Cheng L, et al. Surface soil organic carbon density and its spatial distribution characteristics in eastern Qinghai[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(4): 1098−1108.

[22] 张子琦, 焦菊英, 陈同德, 等. 拉萨河流域中下游洪积扇土壤养分评价 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 2082−2096.
Zhang Z Q, Jiao J Y, Chen T D, et al. Assessment of soil nutrients in alluvial fans in the middle and lower reaches of Lhasa River Basin[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(11): 2082−2096.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[24] Zheng X, Ren W. Nutrient dynamics and controls in alkaline and acid soils of a subtropical karst region, Southwest China[J]. CATENA, 2026, 269: 110097.

[25] Wang Y H, Zhang P, He C, et al. Molecular signatures of soil-derived dissolved organic matter constrained by mineral weathering[J]. Fundamental Research, 2023, 3(3): 377−383.

[26] 张坤, 季宏兵, 褚华硕, 等. 黔西南喀斯特地区红色风化壳的物源及元素迁移特征 [J]. 地球与环境, 2018, 46(3): 257−266.
Zhang K, Ji H B, Chu H S, et al. Provenance and element migration characteristics of red weathering crusts in karst area of southwestern Guizhou[J]. Earth and Environment, 2018, 46(3): 257−266.

[27] Williams E K, Ricker M C, Plante A F. Quantification of geogenic carbon in anthropogenic alluvial coal soils of the Susquehanna River[R]. 2022.

[28] Vindušková O, Sebag D, Cailleau G, et al. Methodological comparison for quantitative analysis of fossil and recently derived carbon in mine soils with high content of aliphatic kerogen[J]. Organic Geochemistry, 2015, 89: 14−2.

[29] Ruiz F, Rumpel C, Silva B M, et al. Soil organic matter stabilization during early stages of Technosol development from Ca, Mg and pyrite-rich parent material[J]. Catena, 2023, 232: 107435.

[30] 蒋文瑞, 涂志红, 周姝, 等. 黄铁矿表面氧化机理及动力学影响因素研究进展 [J]. 金属矿山, 2021(3): 88−102.
Jiang W R, Tu Z H, Zhou S, et al. Research progress on surface oxidation mechanism and kinetic influencing factors of pyrite[J]. Metal Mine, 2021(3): 88−102.

[31] Kaiser M , Ellerbrock R H , Wulf M ,et al.The influence of mineral characteristics on organic matter content, composition, and stability of topsoils under long-term arable and forest land use[J].Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2012, 117(G2). DOI:10.1029/2011jg001712.

[32] Fang Q, Hong H, Algeo T J, et al. Microtopography-mediated hydrologic environment controls elemental migration and mineral weathering in subalpine surface soils of subtropical monsoonal China[J]. Geoderma, 2019, 344: 82−98.

[33] Garcia-Pausas J, Casals P, Camarero L, et al. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: Effects of climate and topography[J]. Biogeochemistry, 2007, 82(3): 279−289.

[34] Feyissa A, Raza S T, Cheng X. Soil carbon stabilization and potential stabilizing mechanisms along elevational gradients in alpine forest and grassland ecosystems of Southwest China[J]. Catena, 2023, 229: 107210.

[35] 秦纪洪, 王琴, 孙辉. 川西亚高山—高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5858−5864.
Qin J H, Wang Q, Sun H. Changes of surface soil organic carbon and active components along altitude gradients in subalpine-alpine region of western Sichuan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5858−5864.

[36] 秦纪洪, 王姝, 刘琛, 等. 海拔梯度上川西高山土壤溶解性有机质(DOM)光谱特征 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4321−4328.
Qin J H, Wang S, Liu C, et al. Spectral characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) along altitude gradient in alpine region of western Sichuan[J]. China Environmental Science, 2019, 39(10): 4321−4328.

[37] 李君剑, 杜宏宇, 刘菊, 等. 关帝山不同海拔土壤碳矿化和微生物特征 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1811−1817.
Li J J, Du H Y, Liu J, et al. Soil carbon mineralization and microbial characteristics at different altitudes in Guandi Mountain[J]. China Environmental Science, 2018, 38(5): 1811−1817.

[38] Hu P, Zhang W, Wanek W, et al. Calcium-rich parent materials enhance multiple soil functions and bacterial network complexity[J]. Communications Earth & Environment, 2025, 6(1): 797.

[39] 刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 等. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素分析 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 54−57, 67.
Liu S Q, Gao L L, Pu Y L, et al. Analysis of soil organic matter and nitrogen status and their influencing factors in Tibet[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 54−57, 67.

[40] 李昌兰, 戴全厚, 彭旭东, 等. 喀斯特坡耕地浅层地下孔(裂)隙发育过程中径流产污特征 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(12): 4437−4445.
Li C L, Dai Q H, Peng X D, et al. Characteristics of runoff pollution during development of shallow underground pores (fissures) in karst slope farmland[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 36(12): 4437−4445.

[41] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制 [J]. 生态学报, 2018, 38(2): 624−634.
Peng X D, Dai Q H, Li C L. Mechanism of soil nutrient output from karst slope farmland under simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2): 624−634.

[42] 郭丽丽, 高超, 李迪, 等. 有机肥替代氮肥比例对豫北玉米—土壤−微生物系统碳氮磷的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2026, 45(3): 27−34.

Guo L L, Gao C, Li D, et al. Effect of replacement ratio of nitrogen fertilizer by organic manure on carbon, nitrogen and phosphorus in corn-soil-microorganism system in northern Henan[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2026, 45(3): 27−34.

[43] Xie H, He P, Ding W, et al. Integrating nutrient balance, environmental footprints and nutrient optimization strategies for sustainable potato production system in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 221: 108399.

[44] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析 [J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35−43.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Estimation and spatial distribution analysis of soil organic carbon density and storage in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 35−43.

[45] 张珍明, 周运超, 黄先飞, 等. 喀斯特小流域土壤有机碳密度及碳储量空间分布异质性 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 184−190, 214.
Zhang Z M, Zhou Y C, Huang X F, et al. Spatial distribution heterogeneity of soil organic carbon density and storage in small karst watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 184−190, 214.

[46] 涂纯, 覃星铭, 李发东, 等. 典型岩溶县域土壤有机碳的空间分异及主控因素 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 178−188.
Tu C, Qin X M, Li F D, et al. Spatial differentiation and main controlling factors of soil organic carbon in typical karst county[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 178−188.

[47] 刘兵, 刘煜, 郝卓, 等. 自然降雨下紫色土坡耕地碳源添加对碳迁移及固碳的影响机制 [J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 229−238.
Liu B, Liu Y, Hao Z, et al. Mechanism of effect of carbon source addition on carbon migration and sequestration in purple soil sloping farmland under natural rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 229−238.

[48] 梁海斌, 安枭旭, 王佩将, 等. 黄土高原植被恢复对土壤有机碳的影响 Meta 分析 [J]. 生态学报, 2025, 45(24): 12148−12159.
Liang H B, An X X, Wang P J, et al. Meta-analysis of effect of vegetation restoration on soil organic carbon on Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12148−12159.

[49] Zhao M, Li D, Liu Z, et al. Karst carbon sink mechanism and its contribution to carbon neutralization under land-use management[J]. Science of The Total Environment, 2024, 937: 173381.

Spatial variation in soil organic matter, fertility characteristics, and carbon stock assessment in Xingwen County, Southern Sichuan

JIN Ge[1], SHI Ze-Ming[1], ZHANG Ya-Feng[1,2], ZHOU Zhao-Yu[1], WU Xiao-Jun[3], WANG Jun-Yuan[3], WANG Tian-Cheng[3], DENG Huan[3], SHI Zhang-Liang[3], ZHANG Hua[3]

(1. *School of Earth and Planetary Sciences*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *China*; 2. *Fifth Institute of Geological and Exploration of Qinghai Province*, *Xining* 810099, *China*; 3. *Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey*, *Chengdu* 610081, *China*)

Abstract: To investigate the spatial patterns of soil organic matter (SOM) at the county scale in karst transition zones, this study focused on Xingwen County, Sichuan Province. Based on 3,497 surface soil samples, the study analyzed the characteristics of SOM, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and pH. It revealed differences in SOM across different stratigraphic units and elevation ranges and estimated the density and reserves of surface soil organic carbon (SOC). The results indicate that the mean SOM content in the study area's surface soil was 22.70×10^{-3}; spatial variation was significant; the soil was slightly acidic (mean pH 5.71); TN was relatively abundant, while TP was relatively low. Geological background was the dominant factor controlling the spatial variation of SOM, with elevation serving as a secondary influencing factor. The Permian stratigraphic unit exhibited the highest mean SOM content (29.77×10^{-3}), with the soil SOM content in the coal-bearing clastic rock area of the Yuanjiadong–Xingwen Formation reaching as high as 36.39×10^{-3}. while the Jurassic strata had the lowest (16.80×10^{-3}). Furthermore, SOM content in high-altitude areas (>1,000 m) was approximately 35% higher than in low-altitude areas (<400 m); Soil fertility exhibits a pattern characterized by "sufficient nitrogen, phosphorus deficiency, and relatively abundant organic matter"; the average surface soil carbon (SOC) density is 3,423 t/km^2, with a total stock of approximately 3.88×10^6 t, and the soil carbon density in the Permian stratigraphic unit is about 1.77 times that of the Jurassic. These findings provide geochemical evidence to support geologically based zoning for farmland fertility improvement in karst transition zones, differentiated carbon sink management (strict protection of high-carbon-density Permian soil areas and carbon enrichment and fertility improvement in low-carbon-density Jurassic soil areas), and precise regulation of phosphorus nutrients.

Key words: soil organic matter; geological context; karst transition zone; spatial variation; carbon stocks

(本文编辑: 蒋实)