

降水与母质共同调控中国北方土壤碳酸钙空间分异*

苗子怡^{1,2}, 杨飞¹, 文慧颖¹, 胡瑾³, 宋效东¹, 张甘霖^{1,3†}

(1. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135; 3. 湖泊与流域水安全全国重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 211135)

摘要: 土壤无机碳是干旱与半干旱区陆地碳库的重要组成部分, 其积累与分异机制深刻影响区域碳循环过程。气候是控制土壤碳酸盐积累的主导因素, 但土壤碳酸盐的分布通常还受成土母质等非气候因素的影响。为阐明降水与母质在区域尺度上如何协同调控土壤碳酸钙的空间分异, 沿中国东北平原至内蒙古高原的降水梯度带, 系统分析了 13 个典型土壤剖面的碳酸钙含量、富集层深度及其主控因子。结果表明, 降水主导了碳酸钙垂直分异的宏观格局, 富集层深度与年均降水量呈显著正相关($R^2=0.43, P<0.05$); 而碳酸钙积累总量则由成土母质的钙源丰度控制, 与降水量的关联性不显著。粒度特征分析进一步揭示, 在母质均一剖面中, 碳酸钙淀积深度对降水的响应极灵敏($R^2=0.97, P<0.05$); 但在母质不连续或质地突变的剖面中, 水分运移受物理界面阻隔产生“悬停”或“滞留”效应, 导致淀积层位显著偏离降水预测值。研究提出了土壤钙积过程受“降水调控淀积深度, 母质决定钙源供给, 质地调节溶质运移”的协同调控机制, 揭示了干旱半干旱区土壤碳酸盐多因子互作过程。

关键词: 土壤碳酸钙; 降水梯度; 钙积过程; 成土母质; 土壤质地

中图分类号: S151.1

文献标志码: A

Precipitation and Parent Material Co-regulate the Spatial Differentiation of Soil Calcium Carbonate in Northern China

MIAO Ziyi^{1,2}, YANG Fei¹, WEN Huiying¹, HU Jin³, SONG Xiaodong¹, ZHANG Ganlin^{1,3†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China; 3. State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China)

Abstract: 【Objective】 Soil inorganic carbon is a vital component of the terrestrial carbon pool in arid and semi-arid regions, and its accumulation and differentiation mechanisms profoundly influence regional carbon cycling processes. Climate is the dominant

*国家自然科学基金项目(42130715)、国家重点研发计划项目(2023YFD1500101)和中国科学院南京土壤研究所“十四五”自主部署项目(ISSAS2404)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42130715), the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFD1500101), and the Independent Deployment Project of the 14th Five-Year Plan, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences (No. ISSAS2404)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: glzhang@issas.ac.cn

作者简介: 苗子怡(1999—), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤无机碳发生过程。E-mail: miaoziyi@issas.ac.cn

收稿日期: 2026-02-02; 收到修改稿日期: 2026-06-26; 网络首发日期(www.cnki.net):

factor controlling soil carbonate accumulation, but the distribution of soil carbonates is also often affected by non-climatic factors such as parent material. **【Method】** To elucidate how precipitation and parent material synergistically regulate the spatial variation of soil calcium carbonate (CaCO_3) at a regional scale, this study systematically analyzed the CaCO_3 content, depth of the enriched layer, and their main controlling factors in 13 typical soil profiles along the precipitation gradient from the Northeast China Plain to the Inner Mongolia Plateau. **【Result】** The results showed that precipitation governed the macro-scale vertical differentiation of CaCO_3 , with the depth of the enriched layer exhibiting a significant positive correlation with mean annual precipitation ($R^2 = 0.43$, $P < 0.05$). The total accumulation of CaCO_3 was controlled by the calcium source abundance of the parent material and showed no significant correlation with precipitation. Particle size analysis further revealed that, in profiles with homogeneous parent material, the deposition depth of CaCO_3 responded very sensitively to precipitation ($R^2 = 0.97$, $P < 0.05$). However, in profiles with discontinuous parent material or abrupt textural changes, water movement was obstructed by physical interfaces, creating a “perching” or “retention” effect, which caused the depositional layer to deviate significantly from the value predicted by precipitation alone. **【Conclusion】** This study proposes a synergistic regulatory mechanism for the soil calcification process: precipitation regulates the deposition depth, parent material determines the calcium source supply, and soil texture modulates solute transport. This mechanism reveals the multi-factor interaction processes controlling soil carbonates in arid and semi-arid regions. **Key words:** Soil calcium carbonate; Precipitation gradient; Calcification; Parent material; Soil texture

土壤碳库作为全球陆地碳库的核心组成部分,其动态变化深刻影响全球碳收支与气候变化^[1-2]。土壤碳库由有机碳与无机碳共同构成^[3]。但传统研究多聚焦于有机碳,对无机碳的研究相对较少^[4]。据最近研究,全球尺度上,0~2 m 深度土体中土壤无机碳(Soil inorganic carbon, SIC)储量约为 $2\,305 \pm 636 \text{ Pg C}$,约占全球陆地碳库的三分之一^[2]。在干旱与半干旱区,无机碳所占比例甚至可高达土壤总碳的 90%,成为主导的碳库形式^[3,5]。中国干旱与半干旱区地域广阔,土壤无机碳储量巨大,其动态变化对区域碳平衡乃至全球陆地碳循环具有关键调控作用^[6-7]。因此,深入探究该区域土壤无机碳的空间分异格局及其主控机制,对完善全球碳循环模型、准确评估和挖掘土壤碳汇潜力均具有重要意义。

土壤中的无机碳主要以碳酸盐(尤其是碳酸钙)的形式在土体中赋存。在干旱区与半干旱区,降水通常被视为驱动土壤碳酸钙分布格局的主导因子^[8]。早在 20 世纪 30 年代, Jenny 和 Leonard^[9]便揭示了年均降水量(MAP)与碳酸钙富集层顶部深度之间的函数关系。1994 年, Retallack^[10]通过整合全球 300 多个干旱区土壤剖面数据,进一步确立了两者的定量关联:随着降水量的增加,碳酸钙受淋溶作用驱动向剖面深层迁移,而降水较少时则趋于在浅层富集。该“降水控制”模型在区域尺度上成功解释了碳酸钙分布的宏观格局^[11]。

然而,这一宏观模型应用于具体点位预测时,常出现较大偏差,这表明在区域气候背景下,局地非气候因子对剖面尺度的碳酸钙分布具有至关重要的调节作用。其中,母质作为五大自然成土因素之一,对土壤的形成、发育具有深刻影响。而土壤粒径分布作为母质来源、气候等多因素长期综合作用的产物,是揭示环境演化与土壤发生历史的重要诊断指标^[12-15]。因此,基于粒度分析,可有效揭示母质在区域降水格局下对碳酸钙剖面分布的具体调节机制。

已有研究表明,土壤碳酸钙的形成依赖于充足的钙源供给,而钙源主要来自母质风化(如碳酸盐岩、硅酸盐岩)或外源钙质粉尘的输入^[16]。母质不仅是钙源的直接供给者,更从根本上决定了土壤碳酸钙的积累潜力。例如,在非碳酸盐母质区,尽管 Ca^{2+} 浓度较低,但长期风化仍可提供足够的离子供碳酸钙沉淀^[17],而在风生活跃区,钙质粉尘携带的碳酸钙可直接沉积于土壤中^[18]。与此同时,由母质风化或沉积过程所决定的土壤质地(粒度组成),作为控制水分和溶质运移的关键物理属性,进一步

调节着碳酸钙在剖面中的迁移路径与淀积深度^[19]。土壤颗粒组成直接决定孔隙结构、导水能力和持水特性,进而控制水分入渗速率、淋溶强度和蒸发再浓缩过程^[20]。例如,砂质土壤渗透性强,有利于碳酸盐向下迁移,但在干旱条件下也易因蒸发强烈而在浅层富集。黏质土层则因渗透性低,通常延缓水分下移,促使碳酸盐在更深层淀积^[21]。此外,质地突变还会改变水文状态,导致碳酸钙在界面附近聚集^[22]。

尽管上述机制在土壤发生学理论及局部案例中已有所探讨,但现有研究多集中于大尺度格局分析或关注单一因子。在完整的自然降水梯度带上,如何从土壤发生过程视角系统识别显著偏离气候预测的“异常”剖面,并结合土壤粒度指标,探究母质与质地属性如何协同作用于碳酸钙的迁移与淀积过程,尚缺乏系统性实证支撑。

基于此,本研究选取中国东北平原至内蒙古高原的典型降水梯度带,沿降水梯度系统布设 13 个土壤剖面,通过分析土壤碳酸钙含量、富集层深度及粒度组成,全面解析气候与母质因素对土壤碳酸钙分布格局的驱动机制。研究结果将为中国干旱与半干旱区碳汇过程研究及全球碳循环模型优化提供科学依据。

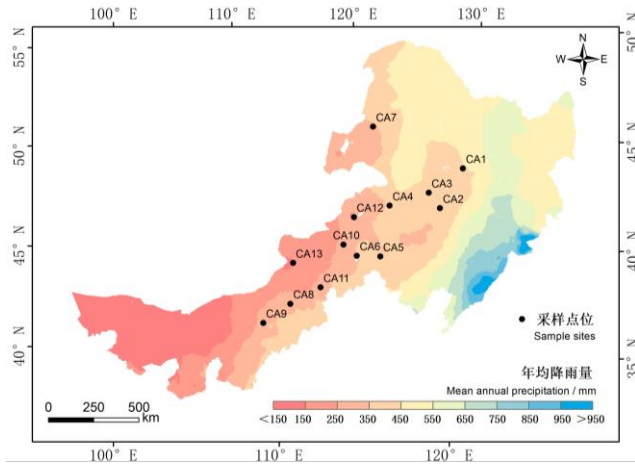
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区横跨东北平原和内蒙古高原,东西绵延近 1 400 km。从东到西,地形由平原逐渐过渡到高原,样点 CA1 至 CA13 的海拔介于 146~1 520 m。气候由温带半湿润季风气候过渡为半干旱干旱的大陆性气候,降水量范围为 140~560 mm,年均气温-2.4~10.9 °C。本研究 13 个剖面的土壤 pH 范围为 6.9~9.5。成土母质包括黄土状沉积物、风成砂、冲洪积物及碳酸盐岩风化物等。土壤类型由东北半湿润区的黑钙土,逐渐过渡为内蒙古半干旱区至干旱区的栗钙土、棕钙土、灰漠土和风沙土,同时随降水量减少,呈现由森林到典型草原、荒漠草原再到荒漠的地带性更替^[23]。该区域环境梯度明显,是探究土壤碳酸钙分布格局及主控因子的理想区域。本研究参照郑景云等^[24]的中国气候区划标准,以年干燥度和年降水量将全国划分为湿润、半湿润、半干旱和干旱区(400 mm 为半湿润/半干旱分界线,200 mm 为半干旱/干旱分界线)。结合研究区实际样本分布(仅 1 个剖面降水量低于 200 mm),为避免低降水量区间样本量过小,将降水梯度划分界线调整为 270 mm,最终将研究区划分为 3 个降水梯度区间: >400 mm、270~400 mm、<270 mm。

1.2 样品采集与测试

野外调查采样前,综合多年平均降水量、主要土壤类型、地形特征及遥感影像等信息,沿经向降水梯度布设采样点位。经实地踏勘与调整,最终采集 13 个土壤剖面(图 1)。剖面深度范围为 120~200 cm,各剖面按 10 cm 或 20 cm 间隔连续取样,共采集 146 个样品。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。CA1~CA13 代表研究区内 13 个典型土壤剖面编号。Note: This figure is produced based on the standard map with the map examination approval number GS(2024)0650 downloaded from the Standard Map Service website of the Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, the base map has not been modified. CA1-CA13 represent the serial numbers of 13 typical soil profiles in the study area.

图 1 土壤调查采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of soil survey sampling points

样品前处理以及土壤理化属性的测定参照《土壤调查实验室分析方法》^[25]。具体流程如下：将采集的土壤样品自然风干，剔除植物根系和砾石，过 10 目筛后，取其中部分样品进一步研磨，过 100 目筛，分别用于粒度分布和碳酸钙含量分析。土壤粒度分布使用激光衍射粒度仪（LS230, Beckman Coulter, 美国）测定。上机前对样品进行预处理：依次使用过氧化氢和稀盐酸去除有机质与碳酸盐，随后反复洗涤至无离子残留，加入蒸馏水浸泡过夜，加入六偏磷酸钠作为分散剂，并经超声处理制成均匀悬液，用于粒度测定；碳酸钙含量采用气量法测定，以碳酸钙相当物含量表示。年平均降水量数据来源于国家青藏高原科学数据中心发布的《中国分省 1 km 分辨率逐年平均降水量数据集（1901–2024）》^[26]。

1.3 数据处理

采用 R 4.4.1 进行数据整理、统计分析和图表绘制，使用相关分析和方差分析检验指标间关系。土壤调查采样点分布图在 ArcGIS10.8 中制作。

2 结果

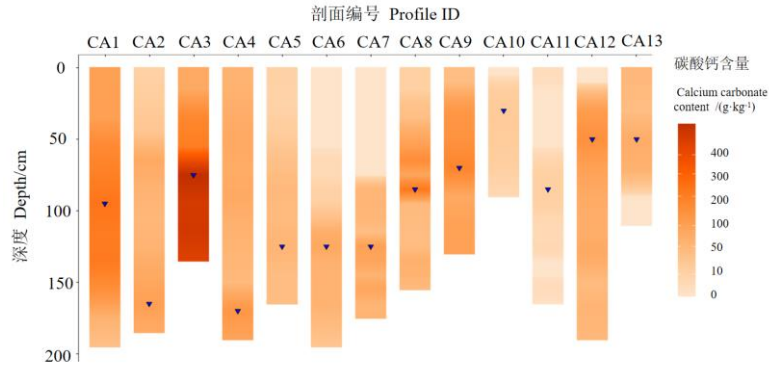
2.1 降水与土壤碳酸钙含量及富集层深度的定量关系

本研究所有剖面在 2 m 土体范围内均存在明显的碳酸钙富集层，其含量介于 13.1~593 g·kg⁻¹，空间差异显著（图 2）。根据不同的降水量范围，富集层的分布特征呈现明显分异（图 2）。在年均降水量大于 400 mm 的区域（CA1~CA3），碳酸钙富集层均位于 70 cm 以下，碳酸钙含量波动较大，CA3 最高（593 g·kg⁻¹），CA1 次之（234 g·kg⁻¹）。在年均降水量介于 270~400 mm 的区域（CA4~CA9），碳酸钙富集层分布深度与降水量呈正相关，碳酸钙含量为 53.6~214 g·kg⁻¹。年均降水量小于 270 mm 的干旱区（CA10~CA13），富集层主要分布在 20~70 cm 的浅层，同时碳酸钙含量整体较低（图 2）。

为进一步明确降水对富集层分布的控制作用，对年均降水量与富集层深度进行回归分析。结果显示，二者呈显著正相关关系（ $R^2 = 0.43$, $P < 0.05$ ），随年均降水量增加，碳酸钙富集层表现出向土壤深层迁移的趋势（图 3）。然而，部分剖面碳酸钙富集层分布深度明显偏离回归预测值，如 CA1、CA3 和 CA10 的碳酸钙富集层深度较预测值更浅，而 CA2 和 CA4 的碳酸钙富集层分布深度则偏深，这些

偏离可能受到局地非降水因素的影响。

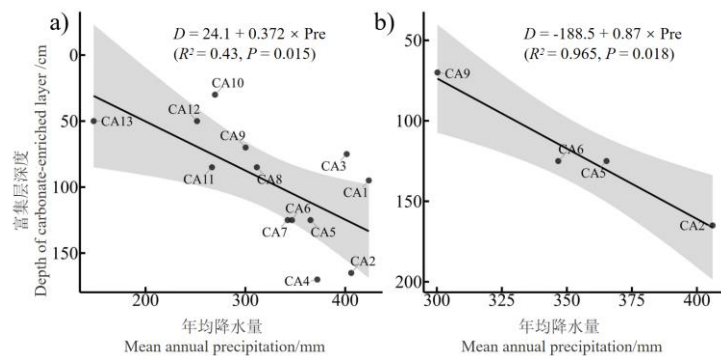
与此同时，各剖面富集层的碳酸钙含量并未随降水梯度呈现系统性变化规律（图 2），二者相关关系不显著（ $P > 0.05$ ）。该结果表明，在研究区范围内，降水主要调控碳酸钙在剖面中的垂直迁移与淀积位置，而非碳酸钙含量积累与保存的主导因素。



注：图中蓝色三角形标记碳酸钙富集层中部深度，剖面（CA1~CA13）按年均降水量由高到低排列。Note: Blue triangles indicate the mid-depth of the calcic horizon; profiles (CA1-CA13) are ordered from highest to lowest mean annual precipitation.

图 2 土壤剖面碳酸钙含量的垂直分布及碳酸钙富集层位置

Fig. 2 Vertical distribution of calcium carbonate content in soil profiles and the position of the calcium carbonate enrichment layer



注：图中灰色阴影为 95%置信区间， D 代表碳酸盐富集层深度中值，cm；Pre 代表年均降水量，mm； R^2 为决定系数， P 为显著性检验值。Note: The gray shaded area denotes the 95% confidence interval. D denotes the midpoint depth of the carbonate-enriched layer, cm; and Pre denotes mean annual precipitation, mm; R^2 is the coefficient of determination, and P represents the significance level.

图 3 所有剖面（a）与黄土母质剖面（b）降水量与碳酸钙富集层深度的回归关系

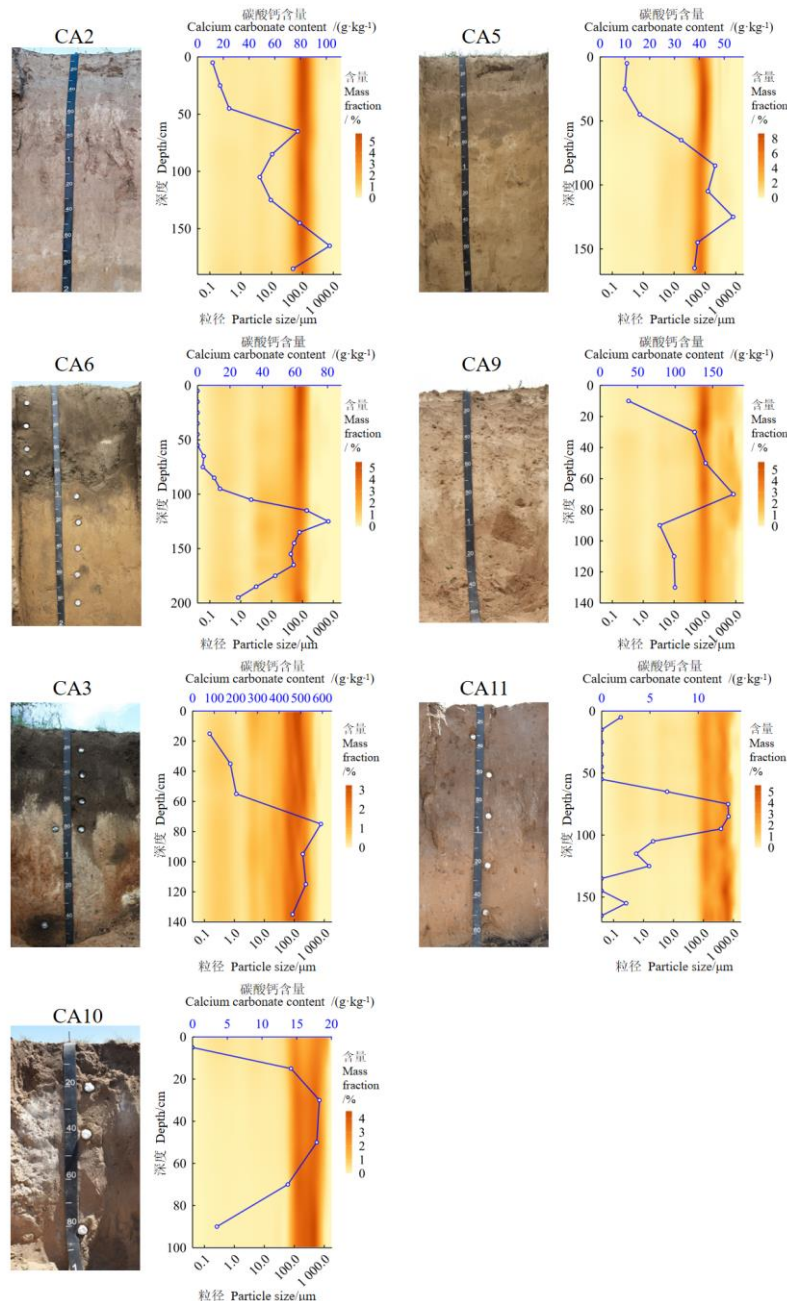
Fig. 3 The regression relationship between precipitation and the enrichment layer depth of calcium carbonate in all profiles (a) and loess parent material profiles (b)

2.2 土壤粒度分布特征指示母质均一性及来源

本研究以土壤粒度分布特征作为判别土壤母质来源及其垂向连续性的核心依据。根据 13 个剖面粒度分布的垂向变异性，将其划分为均一型母质和非均一型母质两大类。

母质均一型剖面包括 CA2、CA3、CA5、CA6、CA9、CA10 及 CA11。此类剖面不同土层间的粒度组成高度相似，表明其母质来源一致，同时剖面内未观察到明显的黏粒移动特征。根据粒度分布的具体特征，可进一步区分不同的母质来源：（1）砂质黄土母质。CA2、CA5、CA6 与 CA9 四个剖面的粒度分布呈明显的单峰模式，粒径峰值集中在 100~200 μm 范围内，各层粒度分布曲线高度重合，垂向分异极弱，表现出典型砂质黄土发育的土壤特征（图 4）；（2）风成砂母质。CA10 和 CA11 剖

面的粒径分布在 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 与 $300\sim 500\ \mu\text{m}$ 区间呈现双峰结构。整体反映了分选良好、连续堆积的风成砂母质特征（图 4）；（3）原位风化物母质。CA3 剖面的粒度分布虽较为均一（粒径众数介于 $90\sim 300\ \mu\text{m}$ ），但其分选性较差，综合剖面形态与粒度分布特征判断，该剖面母质具有典型的碳酸盐岩原位风化物特征（图 4）。

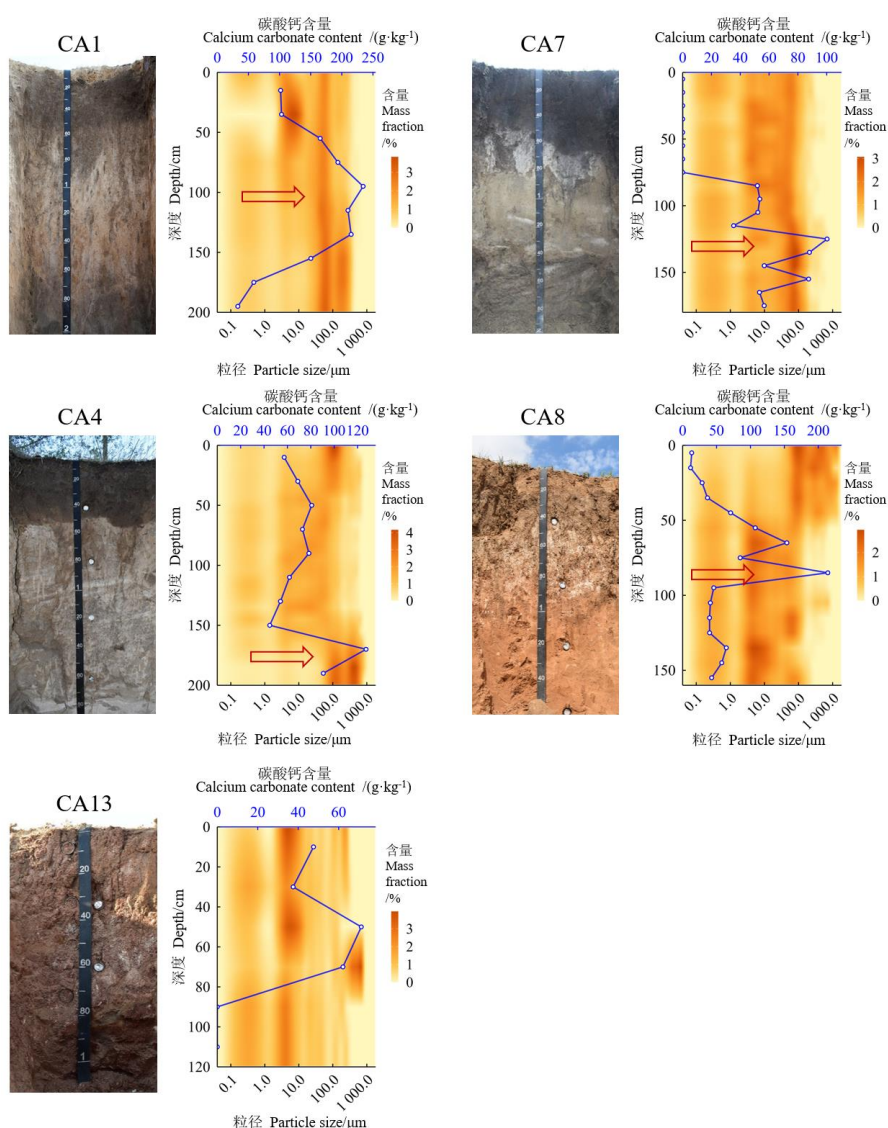


注：每个子图左图为剖面实景照片，右图为碳酸钙含量—深度变化曲线与粒度分布热图的叠加结果。其中蓝色折线表示碳酸钙含量随深度的变化趋势；热图背景反映不同粒径颗粒的质量百分比分布，颜色越深表示该粒径占比越高。下同。Note: For each subplot, the left panel shows a field photograph of the profile, while the right panel presents a composite graph of the calcium carbonate content—depth curve overlaid on a grain-size distribution heat map. The blue line indicates the variation of calcium carbonate content with depth, and the heat map in the background reflects the mass percentage distribution of particles across different grain sizes—darker colors represent a higher proportion of the corresponding grain size. The same below.

图 4 母质均一型剖面野外形态、粒度组成与碳酸钙垂直分布特征

Fig. 4 Vertical distribution characteristics of field morphology, particle size composition and calcium carbonate in parent material-homogeneous profiles

母质不均一的剖面包括 CA1、CA4、CA7、CA8、CA12 及 CA13。此类剖面在不同发生层间普遍存在粒度分布的突变现象。其中，CA1、CA4 和 CA7 剖面表现为下部土层粒度显著变粗，CA8 剖面则呈现出下部土层突然变细的特征（图 5）。CA12 与 CA13 剖面也显示出明显的垂向不连续性。这些粒度突变现象直接反映了研究区成土过程中存在多元母质的叠置或沉积动力环境的转变，具有重要的土壤发生学指示意义。



注：红色箭头指向剖面粒度突变界面，该界面与碳酸钙富集层发育深度基本重合。Note: Red arrows point to the abrupt particle size transition boundaries of soil profiles, which nearly coincide with the depths of carbonate-enriched layers.

图 5 母质不均一型剖面野外形态、粒度组成与碳酸钙垂直分布特征

Fig 5 Vertical distribution characteristics of field morphology, particle size composition and calcium carbonate in parent material-heterogeneous profiles

2.3 不同母质来源土壤的碳酸钙剖面分异特征

综合土壤粒度特征、碳酸钙含量与富集层的分布特征, 13 个采样剖面可划分为以下五种具有显著分异特征的“母质—碳酸钙”组合模式: (1) 富碳酸盐岩母质风化型(以 CA3 为代表)。该剖面表现出极高的钙源丰度, 富集层碳酸钙含量高达 $593 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。剖面形态特征显示, 碳酸钙呈连续分布并伴生明显的浅色沉积斑块, 反映出强烈的母岩风化继承性(图 4)。(2) 均一砂质黄土母质型(以 CA2、CA5、CA6、CA9 为代表)。此类剖面母质来源一致, 粒度分布在垂向上高度连续且无质地突变现象。在此条件下, 碳酸钙含量处于 $50 \sim 200 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的中等水平, 且富集层深度随降水量的增加表现出规律性的下移趋势(图 4)。(3) 复合沉积或质地突变型(以 CA1、CA4、CA7、CA8 为代表)。此类剖面呈现明显的物理结构非均一性, 存在沉积间断或粒度垂向突变。观测结果表明, 其碳酸钙富集层位与剖面中的质地突变界面(如“细变粗”或“粗变细”的物理界面)高度吻合(图 5)。(4) 贫钙风成砂母质型(以 CA10、CA11 为代表)。此类剖面母质以石英矿物为主, 粒度分布指示其为连续堆积的风成砂。尽管剖面可见清晰的白色碳酸钙粉末特征, 但实测碳酸钙含量极低, 富集层碳酸钙含量均小于 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4)。(5) 基岩无钙型(以 CA13 为代表)。该剖面底部基岩不含碳酸盐, 外源粉尘输入提供了一定的钙源补充, 全剖面碳酸钙含量处于较低水平(图 5)。

3 讨论

3.1 降水对碳酸钙分布格局的影响

本研究通过沿降水梯度的 13 个土壤剖面分析发现, 碳酸钙富集层深度随降水量增加显著下移(图 3), 验证了经典土壤发生学理论中水分对钙积过程的驱动作用^[27]。就空间格局而言, 研究区东部年均降水量相对较高($>400 \text{ mm}$), 充沛的降水促使 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 向下迁移, 导致碳酸钙多在 70 cm 以下的深层沉淀; 而在年均降水量较少($<270 \text{ mm}$)、蒸发强烈的西部, 碳酸钙更易在土体浅部饱和并富集。这一沿降水梯度呈现的分布格局与前人研究结果^[9-10]一致。Zhu 等^[11]近年在阿拉善高原的实地研究也证实, 降水量多的站点碳酸钙下移深度显著增加。

同时, 本研究也揭示了降水因子在解释碳酸钙分布时的局限性。尽管富集层深度与年均降水量呈显著正相关(图 3), 但较低的决定系数($R^2 = 0.43$)指示降水并非唯一的主控因子, 仍有超过一半的变异受其他潜在因素驱动。此外, 各剖面的碳酸钙含量与降水量之间并未建立系统性关联, 这表明降水主要调控碳酸钙的垂向迁移, 而非其绝对积累量。值得注意的是, 本研究区碳酸钙含量的空间分布(图 1, 图 2)并未遵循以往大尺度研究中“西高东低, 北多南少”的普遍规律^[28], 显示出明显的局域因素影响。

综上, 降水是塑造土壤碳酸钙大尺度分布格局的基础性气候要素, 但在解释剖面尺度的具体特征时存在明显不足。该结果呼应了多项全球性评估的结论, 即土壤碳酸钙的形成受多因子综合调控^[2, 19, 21, 29-32]。因此, 为深入理解上述“偏离趋势”剖面的内在成因, 需从土壤自身属性(如颗粒组成、质地结构等)入手, 开展进一步探究。

3.2 母质对土壤碳酸钙含量的影响

就成土过程而言, 土壤碳酸钙的形成与积累需要充足的钙源(Ca^{2+})供给, 这主要来源于成土母质的风化释放或外源粉尘输入, 而 CO_3^{2-} 则由大气 CO_2 溶解及土壤呼吸产生的碳酸解离而来^[16, 27]。因此, 富钙母质是碳酸钙富集的物质基础, 即使在较湿润的条件下, 富钙母质仍能在剖面中维持较高的碳酸钙含量^[33]。

对研究区多个典型剖面的对比分析(CA2、CA3、CA10、CA11)有力证实了母质对土壤碳酸钙含量的控制作用。这些剖面的上下土层表现出高度一致的粒度分布特征(图 4), 指示成土母质的均一性。其中, CA3 剖面富集层碳酸钙含量高达约 $600 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且可见明显的浅色碳酸钙淀积(图 4), 这

种超常积累主要继承自富含碳酸盐的母岩风化产物。相比之下, CA2 剖面虽与 CA3 降水量相近, 但其母质为砂质黄土, 富集层碳酸钙含量为 $103 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远低于 CA3 剖面。类似地, 位于西部较干旱区的 CA10 与 CA11 剖面, 尽管可见白色碳酸钙粉末, 但富集层碳酸钙含量仅分别为 $18.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $13.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这主要是由于其砂质母质以石英矿物(二氧化硅)为主, 原始钙源匮乏, 限制了碳酸钙的绝对积累量。

综上, 在本研究区, 土壤碳酸钙含量主要取决于成土母质中钙源的初始丰度, 降水量等现代气候因素的作用相对有限, 该发现合理解释了研究区碳酸盐含量偏离传统“西高东低”的分布预期。

3.3 母质对土壤碳酸钙分布的影响

土壤质地与结构通过调控水分运移, 决定了碳酸钙在剖面中的分布与淀积深度。在较湿润的地区, 黏粒含量较高的土壤渗透性较差, 水分在浅层滞留时间较长且离子交换缓慢, 难以快速达到碳酸钙沉淀所需的过饱和状态, 促使溶解的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 随水分淋滤至更深土层淀积^[19, 21]。相反, 在干旱地区, 砂质土壤的高渗透性虽有利于水分下渗, 但强烈的蒸发作用通常也有利于水分向上运移, 使碳酸钙易于在浅层饱和并富集。以 CA10 剖面为例(图 4), 尽管其位于干旱区, 但其碳酸钙富集层深度较预测值偏浅, 这正是由于砂质母质的高透水性与强蒸发作用协同, 抑制了碳酸钙向下迁移。

母质的均一与稳定性是气候信号在土壤剖面中有效传递的关键前提。在母质组成均一的条件下, 降水量与碳酸钙淀积深度之间通常表现出良好的线性相关关系。研究区沿降水梯度分布的 CA2、CA5、CA6 及 CA9 剖面, 其母质均为砂质黄土, 粒度分布在垂向上高度连续(图 4), 这种均一的物理结构使水分下渗路径保持稳定。因此, 这些剖面的碳酸钙淋溶-淀积过程主要受区域降水控制, 其实际淀积深度与降水预测模型高度吻合($R^2 = 0.97$)(图 3b, 图 4), 有力验证了经典的土壤发生学理论^[9], 并进一步说明了母质同源性是准确建立气候指标与碳酸钙发育定量关系的核心约束条件。

然而, 当剖面存在沉积不连续或质地突变时, 水分的下渗速率与路径会发生显著改变^[22], 进而影响碳酸钙的溶解、迁移过程, 致使碳酸钙在特定位置趋于优先沉淀。本研究区, 多个剖面(CA1、CA4、CA7、CA8)的碳酸钙富集层深度与沉积不连续层基本重合(图 5), 揭示了质地差异通过调控水分动力学与水化学过程, 间接决定了淀积层位置。其中, CA1、CA4、CA7 剖面土层质地由细变粗, 当水分由细粒层进入粗粒层时, 受毛细管力差异影响, 水溶液易在界面处产生“悬停效应”。而 CA8 剖面土层质地由粗变细(图 5), 当水分向下层运行时易发生“滞留效应”^[34-35]。上述两种质地突变均延长了水分与土壤颗粒的接触反应时间, 促进了离子($\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$)的局部富集与过饱和, 从而在质地突变界面处优先形成碳酸钙富集层。这解释了为何这些剖面的碳酸钙富集层深度偏离了降水预测值。

综上, 碳酸钙在剖面中的分布是多因子协同作用的结果。土壤质地与水分条件共同调控碳酸钙的迁移路径, 直接决定碳酸钙富集层的空间位置。该过程可能同时受到植被呼吸及有机质分解调节土壤 CO_2 分压的间接影响。而地貌格局则通过水分再分配, 进一步放大或削弱气候与质地的局部效应^[21, 30]。这些因子在宏观气候框架下相互交织, 最终在碳酸钙大尺度分布格局中塑造了复杂的局地规律。

4 结 论

本研究表明, 降水是驱动我国北方土壤碳酸钙垂向迁移的核心气候因子, 但其信号的传递效力受母质及质地均一性的制约。在母质连续且质地均一的剖面中, 碳酸钙淀积深度与降水量表现出良好的线性相关, 而在母质沉积不连续或质地突变的剖面中, 水分动力学过程的改变导致淀积位置偏离了气候预测值。此外, 碳酸钙的累积总量主要取决于成土母质钙源的丰缺程度, 受降水的影响相对有限。本研究揭示了降水与母质在调控土壤碳酸钙“淀积层位(深度)”与“积累强度(含量)”上的差异性机制。该发现强调, 在构建区域乃至全球尺度的土壤无机碳空间分布模型时, 必须充分考量局地母质属性及剖面物理结构的异质性。未来研究应致力于耦合多源空间数据与过程模拟手段, 定量解析气

候、母质等因子对碳酸钙空间变异的相对贡献,通过精细化非气候因子的参数化表达,进一步提升土壤无机碳分布预测模型的精度与普适性。

参考文献 (References)

- [1] Song X D, Yang F, Wu H Y, et al. Significant loss of soil inorganic carbon at the continental scale[J]. *National Science Review*, 2022, 9(2): nwab120.
- [2] Huang Y Y, Song X D, Wang Y P, et al. Size, distribution, and vulnerability of the global soil inorganic carbon[J]. *Science*, 2024, 384(6692): 233-239.
- [3] Tang Y Y, Yang X Y, Wang X R, et al. Soil inorganic carbon losses counteracted soil organic carbon increases in deeper soil over 30 years in North China[J]. *Land*, 2025, 14(8):1616.
- [4] Raza S, Irshad A, Margenot A, et al. Inorganic carbon is overlooked in global soil carbon research: A bibliometric analysis[J]. *Geoderma*, 2024, 443: 116831.
- [5] Mao N, Huang L, Shao M. Vertical distribution of soil organic and inorganic carbon under different vegetation covers in two toposequences of the Liudaogou watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(4): 479-491.
- [6] Li X T, Xia K, Wu T X, et al. Increased precipitation has not enhanced the carbon sequestration of afforestation in Northwest China[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 619.
- [7] Dong L W, Sun Y, Ran J Z, et al. Ecosystem organic carbon storage and their drivers across the drylands of China[J]. *Catena*, 2022, 214: 106280.
- [8] Stanbery C, Ghahremani Z, Huber D P, et al. Controls on the presence and storage of soil inorganic carbon in a semi-arid watershed[J]. *Catena*, 2023, 225: 106980.
- [9] Jenny H, Leonard C D. Functional relationships between soil properties and rainfall[J]. *Soil Science*, 1934, 38(5): 363-382.
- [10] Retallack G J. The environmental factor approach to the interpretation of paleosols[M]//Amundson R, Harden J, Singer M. Factors of soil formation: A fiftieth anniversary retrospective. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1994: 31-64.
- [11] Zhu X L, Si J H, He X H, et al. The distribution and driving mechanism of soil inorganic carbon in semi-arid and arid areas: A case study of Alxa region in China[J]. *Catena*, 2024, 247: 108475.
- [12] Wang D, Fu B J, Chen L D, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: A case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 3081-3089. [王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 3081-3089.]
- [13] Pendleton R L, Jenny H. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology[J]. *Geographical Review*, 1945, 35(2): 336.
- [14] Yang F, Zhang G L, Yang F, et al. Pedogenetic interpretations of particle-size distribution curves for an alpine environment[J]. *Geoderma*, 2016, 282: 9-15.
- [15] Yang F, Yang F, Huang L M, et al. Characteristics and mechanisms of the accumulation of salts and calcium carbonate in sediment-derived soils of the Gurinai Playa[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 393-404. [杨帆, 杨飞, 黄来明, 等. 古日乃湖盆沉积物发育土壤盐分与碳酸钙积累机制[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 393-404.]
- [16] Zamanian K, Pustovoytov K, Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 157: 1-17.
- [17] Kowalska J B, Zaleski T, Mazurek R. Micromorphological features of soils formed on calcium carbonate-rich slope deposits in the Polish Carpathians[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(6): 1310-1332.
- [18] Muhs D R. The geologic records of dust in the Quaternary[J]. *Aeolian Research*, 2013, 9: 3-48.
- [19] Zilberbrand M. The effect of carbonates and gypsum precipitation in the root zone on the chemical composition of groundwater[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 171(1/2): 5-22.
- [20] Yang F, Rossiter D G, He Y, et al. Quantification of the effect of loess admixture on soil hydrological properties in sandy slope deposits[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127904.

- [21] García-Gamero V, Vanwalleghem T, Peña A, et al. Modelling the effect of *Catena* position and hydrology on soil chemical weathering[J]. *Soil*, 2022, 8(1): 319-335.
- [22] McFadden L D, Tinsley J C. Rate and depth of pedogenic-carbonate accumulation in soils: Formulation and testing of a compartment model[M]//*Soils and quaternary geology of the Southwestern United States*. Geological Society of America, 1985: 23-42.
- [23] Gong Z T. China soil geography[M]. Beijing: Science Press, 2014. [龚子同. 中国土壤地理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [24] Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1981–2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(30): 3088-3099. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981—2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 2013, 58(30): 3088-3099.]
- [25] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [26] National Tibetan Plateau Data Center. China provincial 1 km resolution annual mean precipitation dataset (1901–2024) [DS/OL]. 2024. [国家青藏高原科学数据中心. 中国分省 1 km 分辨率逐年平均降水量数据集(1901–2024) [DS/OL]. 2024.]
- [27] Cerling T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 71(2): 229-240.
- [28] Liang J, Zhao Y, Chen L, et al. Soil inorganic carbon storage and spatial distribution in irrigated farmland on the North China Plain[J]. *Geoderma*, 2024, 445: 116887.
- [29] Ferdush J, Paul V. A review on the possible factors influencing soil inorganic carbon under elevated CO₂[J]. *Catena*, 2021, 204: 105434.
- [30] Wen H, Sullivan P L, MacPherson G L, et al. Deepening roots can enhance carbonate weathering by amplifying CO₂-rich recharge[J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(1): 55-75.
- [31] Pan J X, Wang J S, Tian D S, et al. Biotic factors dominantly determine soil inorganic carbon stock across Tibetan alpine grasslands[J]. *Soil*, 2022, 8(2): 687-698.
- [32] Billings S A, Brecheisen Z, Cherkinsky A, et al. Persistent biogeochemical signals of land use-driven, deep root losses illuminated by C and O isotopes of soil CO₂ and O₂[J]. *Biogeochemistry*, 2024, 167(12): 1469-1489.
- [33] Schlesinger W H. The formation of caliche in soils of the Mojave Desert, California[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(1): 57-66.
- [34] Wang M S, Deng B, Zhang W Q, et al. Quantitative characterization and simulation of soil moisture distribution in heterogeneous vadose zone [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2025, 44(3): 296-308. [王铭森, 邓斌, 张晚祺, 等. 非均质包气带土壤含水率分布定量刻画及其模拟 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(3): 296-308.]
- [35] Guo N N, Huang M B. Water movement characteristics of different reconstructed soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(3): 94-102. [郭拿拿, 黄明斌. 不同类型重构土壤水分运移特征[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 94-102.]

(责任编辑: 陈荣府)