

文章编号:1000-0550(2018)06-1131-08

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.111

阿拉善沙漠全新世钙质根管形成机制及其古环境指示意义:来自微观形态学证据

李卓仑,高有红,李若兰,王乃昂,朱瑞霞

兰州大学资源环境学院 兰州大学冰川与沙漠研究中心,兰州 730000

摘要 阿拉善沙漠腹地广泛分布着全新世时期的钙质根管。虽然已有研究将其应用于古环境重建工作,但对其形成机制尚缺乏明确认识并且存在较大的分歧,这些分歧限制了其在古环境重建中的应用,同时对钙质根管是否具有明确的古环境指示意义提出了需要进一步深入探讨的问题。对阿拉善沙漠 32 组全新世钙质根管进行了扫描电镜分析,观察了钙质根管中是否具有方解石结晶垫和钙化细丝等明确生物成因的微观结构。研究结果显示:全部 32 组样品中均发现了方解石结晶垫结构或钙化细丝结构,其中 20 组样品发现了方解石结晶垫结构;19 组样品发现了钙化细丝结构。证实了植物根系和根围微生物活动参与了该地区钙质根管的形成。阿拉善沙漠钙质根管的形成主要是由于土壤水分的季节性亏损,在蒸发作用的影响下,土壤中的次生碳酸盐在植物根系周围形成了管状的沉积,而非由地下水重结晶作用形成的。由于阿拉善沙漠钙质根管在形成过程中,不仅受到了土壤含水量以及蒸发量的影响,还受到植物根系和微生物作用的影响。因此,钙质根管中记录了区域古环境和古植被信息,是沙漠腹地古环境重建良好的信息载体。可从钙质根管中提取古环境信息,重建沙漠腹地古气候以及古植被的变化。但是对沙漠腹地湖泊周围的丘间洼地和局地滞水环境下形成的钙质根管,更多的指示了一种局地土壤水分环境而非区域古气候环境。本研究为沙漠地区古气候变化提供了新的重建材料和证据,并拓展了干旱区古气候和古环境变化的研究领域。

关键词 阿拉善沙漠;钙质根管;次生碳酸盐;全新世;气候变化

第一作者简介 李卓仑,男,1984 年出生,副教授,沙漠环境演变研究,E-mail: lizhuolunlzl@163.com

中图分类号 P512.2 Q914 **文献标志码** A

0 引言

钙质根管(Calcareous root tubes/rhizoliths)是陆生高等植物在生物沉积作用下,形成于存在土壤水分季节性亏损的干旱和半干旱地区石灰质土壤中的次生碳酸盐结壳^[1-5]。在黄土—古土壤序列^[6-8]、海岸沙丘^[9-11]以及干旱内陆地区^[12-15]均有报道。年代学研究结果表明全新世时期钙质根管的¹⁴C 年代结果在千年尺度可靠性较高^[4,16-17],并且形成时间远小于其他次生碳酸盐^[18]。此外,钙质根管具有纯的生物成因源特征^[5,19]。上述研究揭示了钙质根管具有分布广泛、测年结果可靠性较高、环境指示意义相对明确等优势,是建立千年尺度环境演变序列的良好材料,已被广泛应用于古环境重建中^[20-22]。因此,对钙质根管深入研究,有望为古环境重建提供新的信息载体,亦可为区域古环境变化研究提供新的证据。

虽然前人对钙质根管的分类^[1,23]和形成机制^[6,18,24]等方面进行了研究,但由于钙质根管分布地区自然环境特征的差异性、不同环境下形成的钙质根

管外观结构的特殊性,导致对钙质根管的形成机制研究存在较大的争议。此外,其环境指示意义也有待于进一步的深入研究。以阿拉善沙漠钙质根管为例,其在巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和乌兰布和沙漠都有大量的分布^[15],高尚玉等^[25]认为腾格里沙漠钙质根管产自砂质古土壤中的蚀余堆积;陈建生等^[26]认为巴丹吉林沙漠钙质根管是由地下水中的碳酸盐重结晶作用形成。但不同的观点则认为阿拉善沙漠钙质根管主要是由于气候湿润时期高降水量所形成的,可以指示湿润气候^[4,12]。这些分歧无疑造成了钙质根管的形成机制及其环境指示意义在该区域尚不明确,限制了其在古环境重建中的应用。同时,上述分歧的存在对钙质根管是否具有明确的古环境指示意义提出了需要进一步深入探讨的问题。

钙质根管的形成过程及其机制往往在钙质根管的微观形态上具有明显的特征^[27]。然而,现有的研究缺乏对阿拉善沙漠地区钙质根管微观形态学研究,对钙质根管的成因解释更多的停留在经验假设的基础上,这一研究的不足是造成上述分歧的主要原因所在。

收稿日期:2018-01-12;收修改稿日期:2018-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41771211,41301217)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771211, 41301217]

基于上述,本研究以近10年已采集的32组阿拉善沙漠全新世钙质根管样品为基础,采用扫描电镜分析的方法,明确该区域钙质根管的微观特征并以此探讨该区域钙质根管的形成机制及其古环境指示意义,为沙漠腹地古环境研究提供新的信息载体。

1 区域概况

阿拉善沙漠位于内蒙古北部及甘肃北部,主要包括巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和乌兰布和沙漠,面积约 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。海拔高度1 000~1 500 m左右,地势由南向北倾斜,地面起伏不大,仅有少数山地超过2 000 m,最低处居延海附近为820 m。高原上有若干相对高差100~250 m的干燥剥蚀丘陵低山,把高原分割成为许多内陆盆地。地表物质西部以戈壁为主,东部沙漠面积广。自然景观主要以荒漠草原、流动沙丘、戈壁为主。

巴丹吉林沙漠位于雅布赖盐湖与雅布赖山之西北,宗乃山、省道S218公路以西,黑河正义峡出山口、弱水东岸至古日乃湖以东,合黎山、北大山以北,拐子湖、古居延泽以南(图1),面积为 $5.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,系我国第二大沙漠^[28]。气候干旱,多年平均降水量由东南向西北逐渐减少,东南部约为120 mm,西北部不足40 mm,沙漠腹地降水量在100~110 mm并且90%以上的降水为单次小于5 mm降水^[29]。与世界上其他沙漠明显不同的是,东南部的高大复合型沙山,相对

高度一般达200~300 m,最高的超过430 m;沙山之间的洼地分布着许多大小不等的永久性湖泊,最大达 1.5 km^2 ,绝大多数属矿化度很高的盐碱湖,还有一定数量的淡水湖^[30-31]。腾格里沙漠位于阿拉善沙漠东南部,介于贺兰山、祁连山与雅布赖山之间(图1),面积约为 $4.27 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国第四大沙漠^[32]。区内地势总体呈现西南高,东北低的趋势,海拔1 100~2 000 m。沙漠内部分布着众多湖泊,大小不等,形态各异,除淡水湖泊之外,还有很多矿化度高的咸水湖及一定数量的干涸盐碱湖盆^[33]。年平均降水量125~160 mm。乌兰布和沙漠位于阿拉善沙漠东部(图1),面积约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。包括河套以西、阴山以南一直到贺兰山以北的大面积流沙地区,东部与黄河紧邻。沙漠南部主要为高大沙山,北部以流动沙丘、固定一半固定沙垄为主^[34]。该区域年平均温度为7℃,年降水量103 mm,65%年降水主要集中在夏季。

2 材料和方法

2.1 样品采集

钙质根管广泛分布在阿拉善沙漠腹地,呈水平或直立状分布于平沙地与丘间洼地中,并在巴丹吉林沙漠高大沙山上亦有分布^[4,15]。本研究分别在巴丹吉林沙漠采集了5组钙质根管样品,在腾格里沙漠采集了14组钙质根管样品,乌兰布和沙漠采集了13组钙质根管样品,共计采集了32组全新世钙质根管样品,

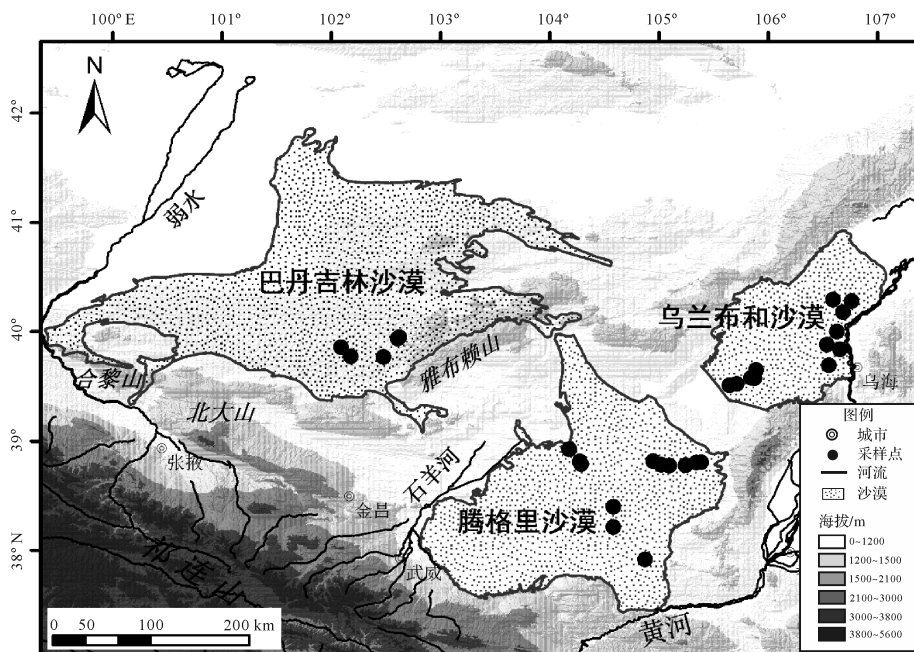


图1 研究区示意图及阿拉善沙漠全新世钙质根管样品采样点分布

Fig.1 Location of the study area and the Holocene calcareous root tubes sampled in the Alashan Desert

采样位置如图 1 所示。样品的宏观形态描述以及¹⁴C 年代结果详见文献[15]。

2.2 实验方法

扫描电镜实验在兰州大学物理科学与技术学院 Hitachi S-4800 扫描电子显微镜和 MIRA 3 XMU 场发射扫描电子显微镜下完成。将已经自然风干的钙质根管样品外侧石英砂胶结物、内部碳酸盐胶结物、以及全样钙质根管的横截面分别使用常规真空喷镀法喷金 60 秒后,放大 30~30 000 倍之间共 14 个倍数下观察并成像。累计拍摄扫描电镜图片 433 张。

钙质根管中方解石结晶垫结构和钙化细丝微观结构的形成与植物根系活动密切相关^[1,27],是受到真菌、蓝藻细菌、地衣、细菌和植物根系活动的影响而由生物作用形成的微形态结构^[35-36]。因此,本文选取方解石结晶垫结构和钙化细丝微观结构进行统计。

3 结果分析

扫描电镜结果显示,本研究中的 32 组钙质根管

样品全部含有方解石结晶垫结构或钙化细丝微观结构。其中 20 组钙质根管样品具有方解石结晶垫结构,占样品总数的 62.5%;19 组钙质根管样品具有钙化细丝微观结构,占样品总数的 59.37%。此外,所有样品中未发现钙化细胞的存在。在巴丹吉林沙漠的 5 组样品中均发现了方解石结晶垫结构和钙化细丝结构。在腾格里沙漠,有 2 组样品既发现了方解石结晶垫结构又发现了钙化细丝结构,其余各自有 6 组样品分别有方解石结晶垫或钙化细丝结构。在乌兰布和沙漠,有 7 组样品含有方解石结晶垫结构,其余 6 组样品中含有钙化细丝结构。这种方解石结晶垫或钙化细丝结构,在不同区域或不同年代的钙质根管样品中,并没有明显的分布差别。

方解石结晶垫结构分布在钙质根管样品的内侧。方解石结晶垫在形态上为表面布满了长粒状或针状的方解石结晶,结晶方向随机,具有锯齿状边缘(图 2)。巴丹吉林沙漠样品的方解石结晶有粒状方解石结晶和针状方解石结晶两种类型(图2a,b):其中粒

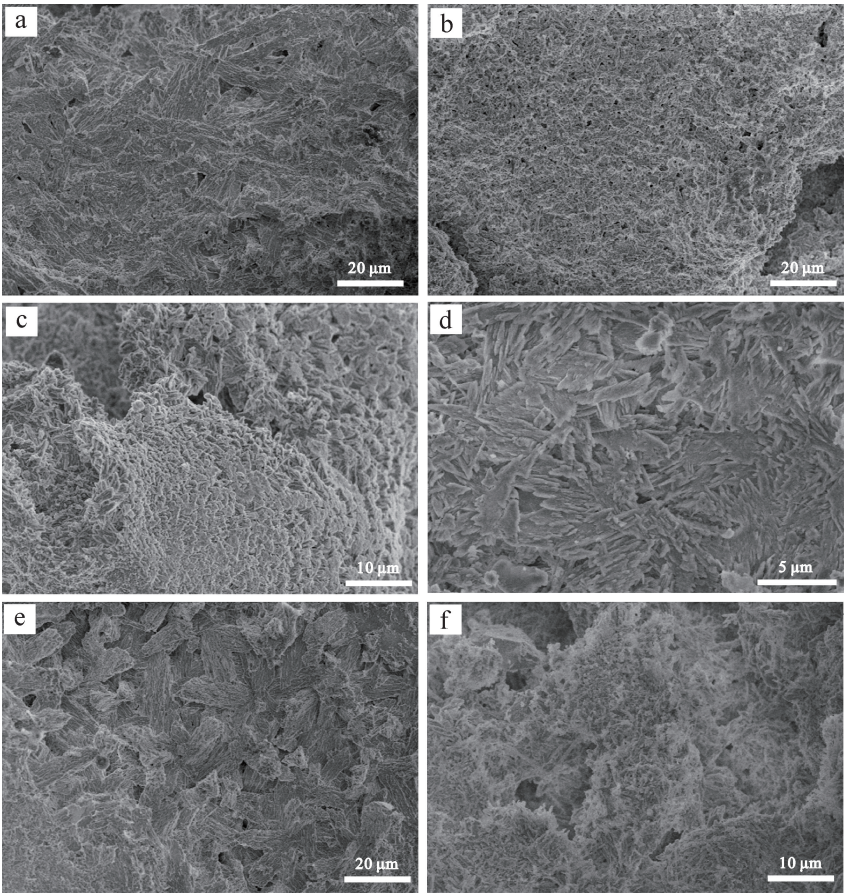


图 2 阿拉善沙漠全新世钙质根管方解石结晶垫微观特征

a,b.巴丹吉林沙漠钙质根管的方解石结晶垫;c,d.腾格里沙漠钙质根管的方解石结晶垫;e,f.乌兰布和沙漠钙质根管的方解石结晶垫

Fig.2 Micromorphology (calcite crystal cushion) of the calcareous root tubes

a, b. sampled from the Badain Jaran Desert; c, d. sampled from the Tengger Desert; e, f. sampled from the Ulanbuh Desert

状方解石结晶长约 $45 \sim 50 \mu\text{m}$, 直径约 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ (图 2a); 针状方解石结晶长度小于 $50 \mu\text{m}$, 直径小于 $5 \mu\text{m}$ (图 2b)。腾格里沙漠样品的方解石结晶垫上的结晶有米粒状结晶和针状方解石结晶两种类型 (图 2c,d): 米粒状的结晶中间粗, 两端细, 其长约 $2 \sim 7 \mu\text{m}$, 直径约 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ (图 2c); 针状方解石结晶长度不足 $5 \mu\text{m}$ (图 2d)。乌兰布和沙漠钙质根管方解石结晶垫上的结晶则以粒状方解石结晶 (图 2e) 和极细针状方解石结晶 (图 2f) 两种类型为主: 粒状方解石结晶 (图 2e) 与巴丹吉林沙漠方解石结晶垫上结晶形态相似, 极细针状方解石 (图 2f) 直径小于 $5 \mu\text{m}$ 。

钙化细丝微观结构由菱形方解石构成, 在钙质根管结构内侧和外侧均有分布。巴丹吉林沙漠样品中钙化细丝长约 $0.4 \sim 6 \mu\text{m}$, 宽约 $0.1 \mu\text{m}$, 与粒状和块状的钙化结晶均匀相交分布 (图 3a); 长粒状钙化细丝长约 $1.5 \sim 5 \mu\text{m}$, 直径约 $0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$, 与长粒状方解石结晶之间紧密胶结 (图 3b)。腾格里沙漠钙质根

管钙化细丝表面粗糙, 最长可达 $165 \mu\text{m}$, 直径 $4 \sim 6 \mu\text{m}$ (图 3c,d)。乌兰布和沙漠片状钙化细丝结构分布于钙质根管结构外侧, 表面粗糙, 具有折角, 长约 $4 \sim 60 \mu\text{m}$, 宽约 $1 \sim 6 \mu\text{m}$ (图 3e,f)。

4 讨论

4.1 钙质根管的形成机制

在不同区域钙质根管的形成机制可能存在一定差异。生长在酸性中和度较高的石灰质土壤和盐碱土壤中的植物会通过根系的呼吸作用, 呼出 CO_2 , 同时交换周围土壤中的 Ca^{2+} 和 H^+ 供植物生长的营养所需, 并溶解周围土壤中的矿物质和营养元素。矿物质和营养元素逐渐在植物根部表皮细胞中沉淀胶结并形成钙化细胞^[6], 即细胞内钙化机制, 无微生物活动的参与。

另一种观点则认为, 在干旱环境条件下, 土壤溶液沿植物根部移动的过程中 Ca^{2+} 会积累在根围并被

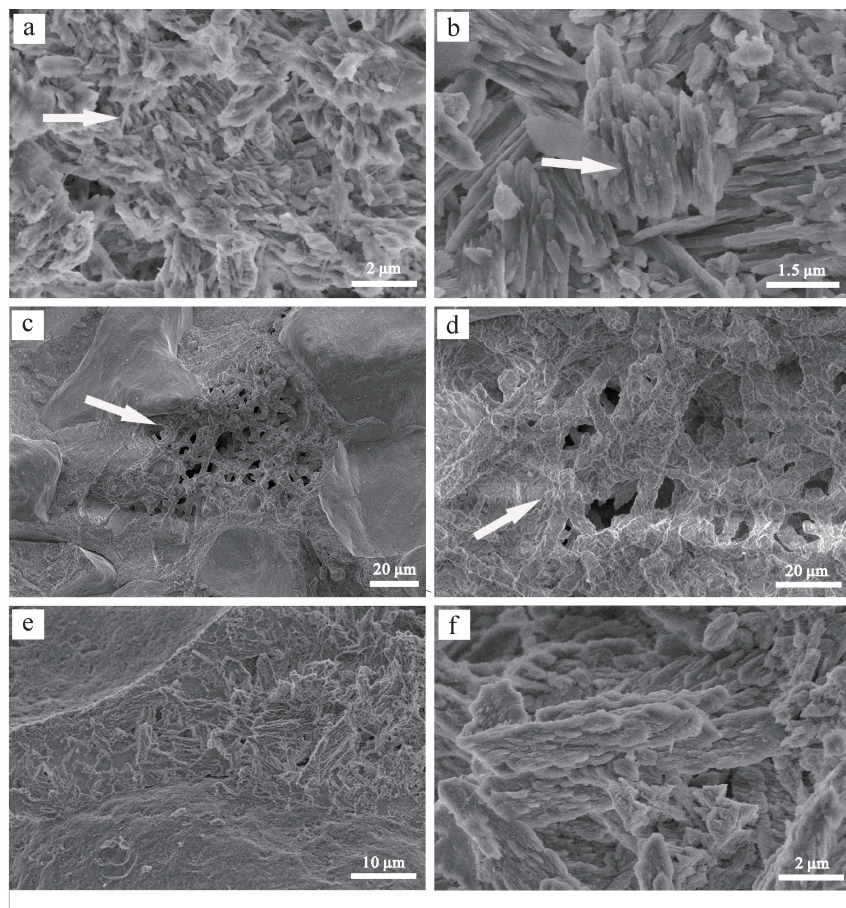


图3 阿拉善沙漠全新世钙质根管钙化细丝微观结构

a, b. 巴丹吉林沙漠钙质根管的钙化细丝结构; c, d. 腾格里沙漠钙质根管的钙化细丝结构; e, f. 乌兰布和沙漠钙质根管的钙化细丝结构

Fig.3 Micromorphology (calcified filaments) of the calcareous root tubes

a, b. sampled from the Badain Jaran Desert; c, d. sampled from the Tengger Desert; e, f. sampled from the Ulanbuh Desert

转化成碳酸盐,在蒸发作用下碳酸盐围绕着植物根系沉淀形成了管状的胶结^[5]。与此同时,植物根系和根围的微生物向根围释放 CO_2 和黏液,并且植物根系在死亡腐烂期间,微生物降解亦能向周围环境释放大量的 CO_2 ,上述植物根系以及微生物活动产生的 CO_2 与有效水结合形成碳酸,溶解根围的含钙矿物进一步形成碳酸盐沉淀,并且植物根系释放的黏液有利于胶结周围土壤形成坚硬的外壳。此机制即为根围钙化机制。根围钙化机制发生在植物活着和腐烂期间,并需要有植物根系活动和根围微生物的参与。并且,与其他次生碳酸盐相区别的是,由于受到真菌、蓝藻细菌、地衣、细菌和植物根系活动等生物作用的影响,加快了次生碳酸盐的沉淀^[35-36],使钙质根管的形成时间远小于非生物成因的次生碳酸盐^[37]。

前人的研究表明,钙质根管中方解石结晶垫结构和钙化细丝微观结构的形成与植物根系活动密切相关^[1,27],由生物作用形成^[35-36]。本研究结果表明,所有样品中均未观测出钙化细胞的存在,表明阿拉善沙漠钙质根管的形成,与植物细胞内的钙化无关。相反,方解石结晶垫结构或钙化细丝结构在全部钙质根管样品中均存在,表明了根围微生物活动参与了钙质根管的形成过程。Li *et al.*^[22] 对本研究的钙质根管样品中有机地球化学分析结果显示,阿拉善沙漠钙质根管中含有大量以 C_{16} 为主峰的短链正构烷烃,揭示了微生物作用对钙质根管的形成具有重要的影响。这也证明了钙质根管的形成不是受到细胞钙化机制的影响。换言之,阿拉善沙漠钙质根管的形成过程伴随着微生物活动作用,即符合根围钙化机制。

李卓仑等^[38] 研究指出,阿拉善沙漠钙质根管碳酸盐矿物主要以方解石为主,不含文石,是典型的次生碳酸盐。陈建生等^[26] 曾认为,巴丹吉林沙漠钙质根管主要是由地下水重结晶作用所形成。但值得注意的是,从目前已采集的 40 余组钙质根管样品的 ^{14}C 年代结果分布,其主要在 MIS 3a 阶段和全新世中晚期,并无小于 1 cal kyr B.P. 的年代结果^[4,15]。即使考虑了 ^{14}C 测年结果的误差,单纯的地下水重结晶作用仍无法解释为何在该区域未有近 1 ka 时期的钙质根管的形成,同时也无大量现代钙质根管的形成。

钙质根管是一种次生碳酸盐的沉积^[27,39],这一特点限制了钙质根管形成所需的水分条件,即除需要有微生物活动的参与外,还需要满足土壤水分的季节性亏损前提,才能够形成钙质根管这种类型的次生碳酸盐的沉积^[27,39]。当降水量过高会导致土壤水分的

强烈下渗而无法形成次生碳酸盐的沉积;当降水量过低,低土壤含水量无法溶解方解石并产生碳酸盐溶液。因此,土壤含水量过高和过低均会影响钙质根管的形成。已有研究表明^[5,40-41] 次生碳酸盐沉积往往发生在年降水量小于 500 mm 的地区,在多年平均降水量为 150~400 mm 地区分布最为广泛。Li *et al.*^[4] 对阿拉善沙漠钙质根管形成所需的降水量阈值研究认为,其钙质根管形成时,多年平均降水量可能在 200 mm 以上。阿拉善沙漠位于中国北方干旱区,该地区表层土壤中的水分含量主要受控于降水量的多寡,并存在明显的季节性土壤水分亏损^[29,42]。由于该地区年降水量多在 150 mm 以下,导致了低土壤含水量无法溶解方解石更无法产生碳酸盐溶液,亦即无法形成钙质根管。因此,该地区已发现并报道的钙质根管均为地质历史时期的产物^[4,12,15,25-26],尚未有关于现代钙质根管大量分布的报道。

综上,阿拉善沙漠钙质根管的形成主要是由于土壤水分的季节性亏损,在蒸发作用的影响下,土壤中的次生碳酸盐在植物根系周围形成了管状的沉积。而非由地下水重结晶作用形成的。

4.2 古环境指示意义

在阿拉善沙漠地区,钙质根管的形成除受到生物因素的影响外,还受到土壤含水量(或降水量)以及蒸发量的控制。因此,钙质根管的形成过程会记录当时的古气候特征。在全新世中期,该区域夏季降水量较现代增加^[43],蒸发量较现代偏低,气候相对湿润,在腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠腹地湖泊水位较高,形成了全新世高湖面和泛湖期^[44-46]。在此气候背景下,土壤水分会形成季节性亏损,有利于钙质根管的形成。Li *et al.*^[15] 统计分析了阿拉善沙漠 34 组全新世钙质根管的时间分布频率,其中 62% 的钙质根管分布在全新世中期(8.0~5.0 cal kyr B.P.),与该地区其他代用指标所揭示的气候相对湿润特点相一致。这一结果一方面揭示了该区域钙质根管的形成受到气候因素(有效湿度)的影响:气候相对湿润时期有利于钙质根管的形成,气候干旱时期则不利于钙质根管的形成;另一方面亦表明,干旱沙漠地区钙质根管具有明确的古环境指示意义:大量钙质根管的存在可以指示气候相对湿润时期,并且钙质根管的时间分布频率可以指示区域有效湿度的变化^[15]。但是由于太湿润和太干旱气候条件下,均不利于次生碳酸盐的积累和钙质根管的形成^[5,40-41],因此钙质根管可能无法指示极端的气候事件。此外,沙漠腹地湖泊周围的丘

间洼地和局地滞水环境下的土壤含水量往往会相对较高,因此即使在干旱气候条件下局地滞水环境下亦可能形成少量的钙质根管^[15],这种钙质根管更多的指示了一种局地土壤水分环境而非古气候环境。故而,单个钙质根管具体的环境指示意义需要结合沉积地层以及沉积环境进行详细的分析^[15],才能确定其指示的是局地环境还是一个区域环境。

土壤中碳酸盐溶液沉淀形成管状胶结的过程中,由于受到蒸发作用的影响,土壤溶液中的元素往往会发生化学分异过程,故而钙质根管中的化学元素比值可以很好的记录当时的环境信息^[47]。譬如,在降水较多、土壤水分充足的条件下,离子半径较小的Ca会比Sr更容易迁移,Ca会先被土壤水溶解达到饱和,Sr则会继续溶解。故土壤中水分含量越高、土壤水中Sr的含量越高。因此,钙质根管中Sr/Ca比值即可以指示有效湿度的变化^[47]。此外,由于钙质根管的形成受到了植物根系以及微生物作用的影响,故而在形成过程中可以记录当时的植被信号^[22,37,48]。Li *et al.*^[22]研究表明,阿拉善沙漠钙质根管中正构烷烃主要来源于高等植物的根系和微生物,高等植物中的正构烷烃主要以C₂₇为主,揭示了沙漠腹地中全新世以来主要以木本植被为主的特点。因此,钙质根管中的有机地球化学特征往往可以揭示沙漠腹地的古植被特征。

5 结论

通过对阿拉善沙漠钙质根管的微观形态分析,明确了阿拉善沙漠钙质根管的形成机制,证实了植物根系和根围微生物活动参与了该地区钙质根管的形成。阿拉善沙漠钙质根管的形成主要是由于土壤水分的季节性亏损,在蒸发作用的影响下,土壤中的次生碳酸盐在植物根系周围形成了管状的沉积。而非由地下水重结晶作用形成的。

阿拉善沙漠钙质根管在形成过程中,不仅受到了土壤含水量以及蒸发量的影响,还受到植物根系和微生物作用的影响。因此,钙质根管中记录了区域古环境和古植被信息,是沙漠腹地古环境重建良好的信息载体。我们可以从钙质根管中提取古环境信息,重建沙漠腹地古气候以及古植被的变化。但是对沙漠腹地湖泊周围的丘间洼地和局地滞水环境下形成的钙质根管,更多的指示了一种局地土壤水分环境而非区域古气候环境。

致谢 感谢审稿专家对本文提出了宝贵的修改

意见,谨致谢忱!

参考文献 (References)

- [1] Klappa C F. Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance [J]. *Sedimentology*, 1980, 27 (6): 613-629.
- [2] Kosir A. Microcodium revisited: root calcification products of terrestrial plants on carbonate-rich substrates [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74: 845-857.
- [3] Alonso-Zarza A M, Genise J F, Cabrera M C, et al. Megarhizoliths in Pleistocene aeolian deposits from Gran Canaria (Spain): ichnological and palaeoenvironmental significance [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 265(1/2): 39-51.
- [4] Li Z L, Wang N A, Cheng H Y, et al. Formation and environmental significance of late Quaternary calcareous root tubes in the deserts of the Alashan Plateau, Northwest China [J]. *Quaternary International*, 2015, 372: 167-174.
- [5] Zamanian K, Pustovoytov K, Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: forms and formation processes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 157: 1-17.
- [6] Jaillard B, Guyon A, Maurin A F. Structure and composition of calcified roots, and their identification in calcareous soils [J]. *Geoderma*, 1991, 50(3): 197-210.
- [7] Wright V P, Platt N H, Marriott S B, et al. A classification of rhizogenic (root-formed) calcretes, with examples from the Upper Jurassic-Lower Cretaceous of Spain and Upper Cretaceous of southern France [J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 100(1/2/3/4): 143-158.
- [8] Barta G. Palaeoenvironmental reconstruction based on the morphology and distribution of secondary carbonates of the loess-paleosol sequence at Süttő, Hungary [J]. *Quaternary International*, 2014, 319: 64-75.
- [9] Roberts D L, Bateman M D, Murray-Wallace C V, et al. Last Interglacial fossil elephant trackways dated by OSL/AAR in coastal aeolianites, Still Bay, South Africa [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 257(3): 261-279.
- [10] 魏喜,贾承造,孟卫工,等. 西沙群岛石岛根管石特征、成因及地质意义 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(10): 2415-2422. [Wei Xi, Jia Chengzao, Meng Weigong, et al. Characteristics, origin and geological significance of rhizolith in Shidao of Xisha Islands [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(10): 2415-2422.]
- [11] Cramer M D, Hawkins H J. A physiological mechanism for the formation of root casts [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 274(3/4): 125-133.
- [12] Yang X P. Landscape evolution and precipitation changes in the Badain Jaran Desert during the last 30 000 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(11): 1042-1047.
- [13] Kraus M J, Hasiotis S T. Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleohydrologic settings: examples from paleogene paleosols, Bighorn Basin, Wyoming, U.S.A [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76

- (4): 633-646.
- [14] Liutkus C M. Using petrography and geochemistry to determine the origin and formation mechanism of calcitic plant molds; Rhizolith or tufa? [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(12): 906-917.
 - [15] Li Z L, Wang N A, Li R L, et al. Indication of millennial-scale moisture changes by the temporal distribution of Holocene calcareous root tubes in the deserts of the Alashan Plateau, Northwest China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 440: 496-505.
 - [16] Kuzyakov Y, Shevtzova E, Pustovoytov K. Carbonate re-crystallization in soil revealed by ^{14}C labeling: experiment, model and significance for paleo-environmental reconstructions [J]. *Geoderma*, 2006, 131(1/2): 45-58.
 - [17] Pustovoytov K, Schmidt K, Parzinger H. Radiocarbon dating of thin pedogenic carbonate laminae from Holocene archaeological sites [J]. *The Holocene*, 2007, 17(6): 835-843.
 - [18] Gocke M, Pustovoytov K, Kühn P, et al. Carbonate rhizoliths in loess and their implications for paleoenvironmental reconstruction revealed by isotopic composition: $\delta^{13}\text{C}$, ^{14}C [J]. *Chemical Geology*, 2011, 283(3/4): 251-260.
 - [19] 张普, 刘卫国. 西峰、洛川黄土碳酸盐根茎体碳同位素分布特征及古环境意义探讨 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(1): 179-186. [Zhang Pu, Liu Weiguo. Carbon isotope composition and paleoenvironment information of rhizolith in Xifeng and Luochuan loess [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(1): 179-186.]
 - [20] Huguet A, Wiesenberg G L B, Gocke M, et al. Branched tetraether membrane lipids associated with rhizoliths in loess: rhizomicrobial overprinting of initial biomarker record [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 43: 12-19.
 - [21] Gallant C E, Candy I, van den Bogaard P, et al. Stable isotopic evidence for Middle Pleistocene environmental change from a loess-paleosol sequence: Kärlich, Germany [J]. *Boreas*, 2014, 43(4): 818-833.
 - [22] Li Z L, Gao Y H, Han L. Holocene vegetation signals in the Alashan Desert of Northwest China revealed by lipid molecular proxies from calcareous root tubes [J]. *Quaternary Research*, 2017, 88(1): 60-70.
 - [23] 高有红, 李卓仑, 韩朗, 等. 阿拉善沙漠植物钙质根管: 形态特征、分类及其环境指示意义 [J]. *沉积学报*, 2017, 35(1): 75-84. [Gao Youhong, Li Zhuolun, Han Lang, et al. Calcareous root tubes in the Alashan Deserts: morphological characteristics, classification and environmental significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 75-84.]
 - [24] Felix-Henningsen P, Kandel A W, Conard N J. The significance of calcretes and paleosols on ancient dunes of the western Cape, South Africa, as stratigraphic markers and paleo-environmental indicators [C]//Papers of the 1st international conference on archaeology and soils. Oxford: BAR International, 2003, 1163: 45-52.
 - [25] 高尚玉, 陈渭南, 靳鹤龄, 等. 全新世中国季风区西北缘沙漠演化初步研究 [J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(2): 202-208. [Gao Shangyu, Chen Weinan, Jin Heling, et al. Preliminary study on the Holocene desert evolution in the NW boundary of the Asia monsoon. *Science in China [J]. Science in China (Series B)*, 1993, 23(2): 202-208.]
 - [26] 陈建生, 赵霞, 汪集旸, 等. 巴丹吉林沙漠湖泊钙华与根状结核的发现对研究湖泊水补给的意义 [J]. *中国岩溶*, 2004, 23(4): 277-282. [Chen Jiansheng, Zhao Xia, Wang Jiyang, et al. Meaning of the discovery of lacustrine tufa and root-shaped nodule in Badain Jaran Desert for the study on lake recharge [J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(4): 277-282.]
 - [27] Jones B, Ng K C. The structure and diagenesis of rhizoliths from Cayman Brac, British West Indies [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(3): 457-467.
 - [28] 朱金峰, 王乃昂, 陈红宝, 等. 基于遥感的巴丹吉林沙漠范围与面积分析 [J]. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1087-1094. [Zhu Jinfeng, Wang Naiang, Chen Hongbao, et al. Study on the boundary and the area of Badain Jaran Desert based on remote sensing imagery [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1087-1094.]
 - [29] Ma Ni, Wang N A, Zhao L Q, et al. Observation of mega-dune evaporation after various rain events in the hinterland of Badain Jaran Desert, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(2): 162-170.
 - [30] 李卓仑, 马素辉, 王乃昂, 等. 巴丹吉林沙漠盐湖面积变化对湖泊边缘表层沉积物盐类矿物组合影响 [J]. *盐湖研究*, 2015, 23(4): 8-14. [Li Zhuolun, Ma Suhui, Wang Naiang, et al. Impacts of salt lakes area changes in Badain Jaran Desert on saline minerals assemblages [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2015, 23(4): 8-14.]
 - [31] Wu Y, Wang N A, Zhao L Q, et al. Hydrochemical characteristics and recharge sources of Lake Nuortu in the Badain Jaran Desert [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(9): 886-895.
 - [32] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1980: 68-76. [Zhu Zhenda, Wu Zheng, Liu Shu, et al. *Introduction to the deserts in China [M]*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1980: 68-76.]
 - [33] 来婷婷, 王乃昂, 黄银洲, 等. 2002 年腾格里沙漠湖泊季节变化研究 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(6): 957-964. [Lai Tingting, Wang Naiang, Huang Yinzhou, et al. Seasonal changes of lake in Tengery Desert of 2002 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(6): 957-964.]
 - [34] Fan Y X, Chen F H, Fan T L, et al. Sedimentary documents and Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating for formation of the present landform of the northern Ulan Buh Desert, northern China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(11): 1675-1682.
 - [35] Knox G J. Caliche profile formation, Saldanha Bay (South Africa) [J]. *Sedimentology*, 1977, 24(5): 657-674.
 - [36] Barta G. Secondary carbonates in loess-paleosol sequences: a general review [J]. *Central European Journal of Geosciences*, 2011, 3(2): 129-146.
 - [37] Gocke M, Kuzyakov Y, Wiesenberg G L B. Rhizoliths in loess-evi-

- dence for post-sedimentary incorporation of root-derived organic matter in terrestrial sediments as assessed from molecular proxies [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(11): 1198-1206.
- [38] 李卓仑, 邵孔兰, 宁凯, 等. 阿拉善高原沙漠地区植物钙质根管的矿物组成特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1483-1488. [Li Zhuolun, Shao Konglan, Ning Kai, et al. Mineral composition characteristics of calcareous root tubes in the deserts of the Alxa Plateau, NW China [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6): 1483-1488.]
- [39] Wright V P. Paleosols in shallow marine carbonate sequences[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 35(4): 367-395.
- [40] Birkeland P W. Soils and geomorphology[M]. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 1999: 1-100.
- [41] Landi A, Mermut A R, Anderson D W. Origin and rate of pedogenic carbonate accumulation in Saskatchewan soils, Canada[J]. *Geoderma*, 2003, 117(1/2): 143-156.
- [42] Dong C Y, Wang N A, Chen J S, et al. New observational and experimental evidence for the recharge mechanism of the lake group in the Alxa Desert, North-central China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 124: 48-61.
- [43] Li Z L, Wang N A, Cheng H Y, et al. Early-middle Holocene hydroclimate changes in the Asian monsoon margin of Northwest China inferred from Huahai terminal lake records[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2016, 55(3): 289-302.
- [44] Zhang H C, Peng J L, Ma Y Z, et al. Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1/2): 45-58.
- [45] Wang N A, Li Z L, Cheng H Y, et al. High lake levels on Alxa Plateau during the Late Quaternary[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(17): 1799-1808.
- [46] Wang N A, Ning K, Li Z L, et al. Holocene high lake-levels and pan-lake period on Badain Jaran Desert[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(8): 1633-1641.
- [47] 李若兰, 李卓仑, 宁凯, 等. 腾格里沙漠植物钙质根管 Sr/Ca 比值揭示的全新世千年尺度有效湿度变化[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(2): 379-387. [Li Ruolan, Li Zhuolun, Ning Kai, et al. Holocene millennial-scale effective moisture changes revealed by Sr/Ca ratios from calcareous root tubes in the Tengger Desert[J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(2): 379-387.]
- [48] Gocke M, Gulyás S, Hambach U, et al. Biopores and root features as new tools for improving paleoecological understanding of terrestrial sediment-paleosol sequences[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 394: 42-58.

Formation Mechanism and Environmental Significance of Holocene Calcareous Root Tubes in the Alashan Desert, as Revealed by Micromorphology

LI ZhuoLun, GAO YouHong, LI RuoLan, WANG NaiAng, ZHU RuiXia

College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Holocene calcareous root tubes occur widely across the hinterland of the Alashan Desert and have been used for paleoenvironmental reconstructions. However, a clear and common understanding of their formation mechanism is still lacking, which limits their application to paleoenvironmental reconstructions. In addition, whether calcareous root tubes have any specific environmental significance needs to be investigated further. In this study, 32 calcareous root tube samples from the Alashan Desert were analyzed by scanning electron microscope to observe the calcite crystal mats or calcified filaments that characterize their absolute biogenic origin. Results showed that these structural features existed within all 32 calcareous root tube samples, which indicated that plant roots and rhizosphere microorganisms participated in the formation of the calcareous root tubes. Under a pronounced seasonal soil moisture regime, dissolved bicarbonates precipitate around the roots because of water evaporation in the rhizosphere and then cement loose sediments or sands, resulting in formation of calcareous root tubes. Recrystallization of groundwater could not explain the formation of such tubes. Calcareous root tube formation was found to be affected by soil moisture content and evaporation, which demonstrated that these tubes have explicit environmental significance. Furthermore, paleoenvironmental signals can be obtained from them to reconstruct changes in paleovegetation and paleo-effective moisture. This study could provide new valuable archives of paleoclimatic changes in desert hinterlands and develop research into paleoenvironmental evolution in arid regions.

Key words: Alashan Desert; calcareous root tubes; secondary carbonate; Holocene; climate change