

专题16: 关键带生物地球化学过程与物质迁移

喀斯特环境下根际重碳酸盐的多重生物学效应

吴沿友^{1*}, 姚凯², 饶森¹

1. 中国科学院 地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 贵州师范大学 生命科学学院, 贵阳 550002

全球喀斯特(岩溶)分布面积约 2200 万 km², 占据陆地表面面积的 15%; 中国喀斯特分布面积约有 130 多万 km², 其中石漠化面积约占 28.7%。喀斯特生境中的基岩多为碳酸盐岩类, 其主要化学成分为 CaCO₃、MgCO₃ 等。由于长期强烈的岩溶作用, 造成喀斯特地区水文地质结构为地表地下双重空间结构。该区地下河系很发育, 地表发育有众多的溶洞、溶洼、溶沟、溶隙、漏斗和落水洞天窗等, 再加上土层较薄, 大部分岩石裸露, 致使雨水很快渗漏到地下, 成为深埋的地下水, 形成水土分离格局, 很薄的土壤覆盖层所形成的土壤水又迅速被蒸发掉, 致使土壤干旱。即使在降水充足的情况下, 岩溶地区的土壤的持水量也只能维持 7~14d 的植物生长。同时, 在基岩的岩溶作用过程中, 也消耗了氢离子, 形成大量的钙离子和碳酸氢根离子, 通常, 岩溶水体中的重碳酸盐浓度在 4.5mmol/L 左右(章程等, 2012), 石灰土中的重碳酸盐浓度在 1~5mmol/L 之间(McCray and Matocha 1992)。由于降雨不均、降水量和径流遽变, 导致喀斯特关键带的岩溶作用高度异质化, 高度异质化的岩溶作用给喀斯特土壤中重碳酸盐带来了高度异质化的特征。

通常, 土壤的重碳酸盐对植物的生命活动有以下几方面的影响: (1)高浓度的重碳酸盐给植物带来盐害和酸碱胁迫。(2)高浓度的重碳酸盐影响植物对诸多的营养元素如 Fe、Zn、Mn、Ca、K 等的吸收。(3)重碳酸盐结合光系统 II 在光合作用的电子传递系统中发挥必不可少的作用。(4)低浓度的重碳酸盐促进气孔的张开, 高浓度的重碳酸盐促进气孔的关闭。但是, 在喀斯特环境下, 重碳酸盐对喀斯特适生植物的作用远不止这些。最近, 我们利用稳定同位素技术结合生理生化的测定, 发现了喀斯特环境下根际重碳酸盐的新的生物学作用, 揭示了喀斯特适生植物岩溶-光合耦合的新的生物地球化学特征。

(1)作为光合同化的重要碳源和水源

采用近自然丰度的碳同位素双向标记技术, 在两组标记处理下设置不同水分胁迫实验。结果表明, 在高重碳酸盐的背景下, 喜树(*Camptotheca acuminata*)在正常水分条件(WW)、中度水分胁迫(MS)和重度水分胁迫(SS)下, 对重碳酸盐的利用份额分别是 10.34%、20.05%和 16.60%, 水分利用效率分别为 4.44、9.52 和 9.44 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ (如表 1), 表明重碳酸盐是光合同化的重要碳源和水源。

结论: 在持续稳定的重碳酸盐的刺激下, 重碳酸盐大部分作为底物起作用。植物在利用重碳酸盐时, 不仅解决喀斯特逆境下的植物碳限制, 而且也解决了植物的水分限制; 增加了植物无机碳同化、提高水分利用率。

(2)刺激存储的碳库转变成可利用的非结构性碳水化合物

通过高丰度 ¹³C-NaCO₃(10% atm. ¹³C(8887‰)), 供应喜树根系吸收 24 和 72h。结果表明, 24h 的标记处理时间里喜树根茎叶器官的非结构性碳水化合物的含量均有了显著性增

基金项目: 喀斯特筑坝河流水安全与调控对策-流域植被的生态水文效应(批准号: U1612441-02)

*第一作者及通信作者简介: 吴沿友(1966-), 男, 研究员, 研究方向: 生物地球化学. E-mail: wuyanyou@mail.gyig.ac.cn

加, 在标记 72h 后只有茎里面的含量出现下降。非结构性碳水化合物在根里的含量变化幅度比茎和叶要小得多。随着 ^{13}C 标记时间增加, 非结构性碳水化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著受到标记物的影响, 根系 $\delta^{13}\text{C}$ 变化幅度高于茎和叶片, 明显偏正; ^{13}C 标记 24 h 后, 约有 25% 的标记物达到了叶片, 但 72 h 后这一比例无显著变化。重碳酸盐 24h 刺激对净光合速率的抑制为 30%, 但对气孔导度和蒸腾速率的抑制均达 40%, 水分利用率增加不到 20%, 但是重碳酸盐 72h 刺激对净光合速率的抑制为 40%, 但对气孔导度和蒸腾速率的抑制分别达 60% 和 70%, 水分利用率增加 100% (如表 2)。

结论: 在前期无或少重碳酸盐的刺激下, 重碳酸盐一方面起着底物的作用, 自身经光合同化后也变成非结构性碳水化合物的一小部分。另一方面刺激存储的碳库大量转变成可利用的非结构性碳水化合物, 再由非结构性碳水化合物转变成代谢水和二氧化碳, 供植物进行光合作用, 大大提高水分利用率。

表 1 三种水分胁迫处理下喜树的水分代谢(Tr, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$; WUEi/WUEa, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)

处理 天数	WW ($f=10.34\%$)			MS ($f=20.05\%$)			MS ($f=16.60\%$)		
	Tr	WUEi	WUEa	Tr	WUEi	WUEa	Tr	WUEi	WUEa
1	1.65	2.5	2.79	1.01	5.15	6.44	0.79	5.45	6.53
3	1.16	3.95	4.41	0.5	7.91	9.89	0.24	7.81	9.36
5	1.34	3.03	3.38	0.51	6.85	8.57	0.18	7.75	9.29
7	1.74	2.74	3.06	0.88	6.16	7.7	0.25	6.07	7.28
9	1.08	4.06	4.53	0.4	9.76	12.21	0.16	10.25	12.29
11	0.69	6.52	7.27	0.32	9.47	11.84	0.18	10.21	12.24
13	1.28	3.93	4.38	0.59	7.11	8.89	0.22	7.65	9.17
15	0.77	5.13	5.72	0.36	8.51	10.64	0.16	7.77	9.32
T-mean	1.21	3.98	4.44	0.57	7.62	9.52	0.27	7.87	9.44

表 2 NaHCO_3 处理时间对光合作用和水分代谢的影响

(Tr, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$; Pn, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; WUEi, $\mu\text{mol CO}_2 \text{mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)

	净光合速率	气孔导度	蒸腾速率	水分利用效率
	Pn	g_s	Tr	WUEi
Control	7.62 (0.53)	0.05 (0.00)	1.43 (0.08)	5.33
24 h	5.59 (0.43)	0.03 (0.01)	0.87 (0.16)	6.43
72 h	4.49 (0.27)	0.02 (0.00)	0.41 (0.05)	10.95

(3) 改变干旱逆境下的糖代谢歧化及提高植物的抗逆性和水分利用率

为了阐明喀斯特生态系统中植物应对岩溶干旱时重碳酸根所起的作用, 在实验室以喀斯特适生植物构树(*Broussonetia papyrifera* L.)为材料, 利用 PEG 6000 模拟水分胁迫, 利用不同梯度的 NaHCO_3 [0(T_1)、3(T_2)、6(T_3)、9(T_4)mmol/L] 模拟干旱过程中不同的根际重碳酸盐环境, 对植物的糖代谢调控、光合指标、抗氧化能力和细胞的伤害情况进行了研究。结果表明, 在植物处于中等程度的干旱胁迫时, 低浓度(3mmol/L)的根际重碳酸盐不仅不降低气孔导度, 反而提高光合能力和糖代谢能力。低浓度的根际重碳酸盐主要是通过提供碳源、增加磷酸戊糖途径, 提高植物的抗逆性和水分利用率; 而高浓度(9mmol/L)的根际重碳酸盐, 因为其对植物造成更大的渗透胁迫压力, 导致植物吸水更加困难, 体内可溶性糖快速消耗, 糖代谢状况恶化, 过氧化物清除能力下降, 植物细胞伤害程度上升, 最终抑制植物的生长。喀斯特适生植物的这种生理特性与岩溶干旱和高度异质化的土壤重碳酸盐特征相适应。随着岩溶干旱的加深, 土壤的重碳酸盐浓度增高, 植物的抗岩溶干旱能力增加, 但重碳酸盐浓度超过一定阈值时, 可能新一轮降雨将会发生, 岩溶干旱得以消失, 重碳酸盐浓度也降至最低。