

喀斯特适生植物固碳增汇策略

吴沿友

(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, 贵州 贵阳 550002)

摘要:通过分析喀斯特地区的土壤化学性质,明确了喀斯特地区植物的固碳增汇的限制因素为岩溶干旱、低营养、高pH、高重碳酸盐等。通过对喀斯特适生植物和非适生植物的无机碳源、氮源的利用以及对低营养的响应差异分析,总结出了喀斯特适生植物交替、高效利用碳酸氢根离子作碳源的开源固碳增汇策略,以较低的营养成本获取较高的光合固碳能力的低成本倍增固碳增汇策略,以及掠夺式吸收限制性的铵态氮和补偿式吸收硝态氮来实现固碳增汇作用的以氮增汇策略等;提出了喀斯特适生植物固碳增汇能力的利用途径,可最大限度挖掘出喀斯特地区植物的固碳增汇潜能。

关键词:喀斯特;适生植物;碳汇

中图分类号:Q945.1

文献标识码:A

0 引言

中国喀斯特(岩溶)分布面积约有124万 km^2 ,其中石漠化面积约占28.7%^[1]。“南石(石漠化)北沙(沙漠化)”成为制约西部地区可持续发展的两大生态环境问题。喀斯特环境的脆弱性主要表现在基岩裸露(石漠化)、岩石透水漏水(岩溶干旱)、土壤瘠薄(低营养)、高pH、高重碳酸盐以及高钙镁浓度等特征上^[2-4];这种脆弱性严重影响植物生长发育以及固碳增汇能力。

森林是巨大的碳汇,这已为大家所共识^[5-9]。国内外对造林或实施生态项目进行固碳增汇已有很多研究^[10-15],即使是岩溶地区石漠化综合治理的固碳增汇效应也有研究^[16-17],这些研究形成一系列技术,大大提高了治理区的植被固碳增汇能力。但是,也有一些石漠化治理工程,由于未严格筛选喀斯特适生植物,致使一些地区出现“年年植树不见树,年年造林不见林”的局面,这样不仅不能改善生态环境,提高固碳增汇能力,而且还使生态环境进一步恶化、石漠化加

重^[18]。

为了充分挖掘喀斯特地区植物的固碳增汇能力,必须利用喀斯特适生植物来治理和恢复脆弱喀斯特生态环境,借用喀斯特适生植物的固碳增汇策略,最大地挖掘植物的光合潜能,将喀斯特生态环境治理与固碳增汇技术融合,构建配置喀斯特适生植物的固碳增汇技术体系,减少喀斯特生态系统的净 CO_2 排放量,促使喀斯特生态系统的改善。

1 喀斯特地区植物光合固碳能力的限制因素

1.1 岩溶干旱

干旱大都是由于降水量少造成的,而我国西南喀斯特地区年平均降雨量为1000~1800mm,干旱缺水主要是由于特殊的地质环境造成的^[19]。长期强烈的岩溶化作用,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

基金项目:国家自然科学基金项目(40973060)、中国科学院战略性先导科技专项重大课题(XDA05070400)、贵州省社会发展科技攻关计划项目(SY[2010]3043)

作者简介:吴沿友(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,专业方向:生物地球化学。E-mail:wuyanyou@mails.gyig.ac.cn。

收稿日期:2011-10-21

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。而暴雨来临,地下管道来不及排泄,又造成洪涝灾害^[20-21]。岩溶干旱,造成植物叶片的气孔关闭,严重地降低植物的光合作用和固碳增汇能力,甚至造成植物死亡,以至于减少碳汇。

1.2 高 pH、高钙和高重碳酸盐

喀斯特生境中的基岩多为碳酸盐岩类,其主要化学成分为 CaCO_3 、 MgCO_3 等可溶性盐类。由于基岩的岩溶作用,使得其上覆土壤形成高 pH、高钙和高重碳酸盐的特征^[22-23]。

刘璐等(2010)^[24]对喀斯特木论自然保护区土壤 pH 测定时发现,该区的平均 pH 为 6.96,最大值为 7.68,最小值也达到 5.76。董玲玲等(2008)^[25]对喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤的 pH 研究时发现,石灰岩发育的土壤 pH 为 7.69,白云岩发育的土壤 pH 为 7.85,明显地高于页岩的(5.32)、砂岩的(5.44)以及红色粘土的(5.32)。

姬飞腾等(2009)^[26]对喀斯特地区的普定、花江、荔波、罗甸的土壤进行测定发现,这 4 个地区的土壤平均交换性钙为 3 612.43 mg/kg,比福建非石灰岩地区土壤交换性钙含量 519.33 mg/kg 高 6 倍^[27],比我国南方丘陵山地的非石灰岩地区土壤平均交换性钙含量 14.22 mg/kg 高 250 倍以上^[28]。

碳酸盐岩的溶蚀作用,消耗了氢离子,形成大量的钙离子和碳酸氢根离子,对其上覆土壤进行改造,使其上覆土壤呈现出高 pH、高钙和高重碳酸盐的环境。这种环境将严重地阻碍植物进行光合作用,导致碳汇的减少。

1.3 有效态氮、磷及营养元素缺乏

喀斯特地区由于溶蚀作用强烈,土壤中的很多有效态的营养元素被流失,加之,土壤的 pH 值和钙离子浓度高,使有效态的营养元素更加缺乏。

由于喀斯特地区土壤 pH 值以及重碳酸盐浓度高,铵态氮容易生成氨气进入大气^[29]。因此,喀斯特地区土壤的铵态氮含量常常低于非喀斯特地区,而硝态氮含量则常常高于非喀斯特地区。刘丛强^[30]对喀斯特地区石漠化和非石漠化区域的土壤的氮的研究表明,20 个土壤样本平均铵态氮的含量为 5.09 mg/kg,而平均硝态氮的含量为 13.60 mg/kg。这样的铵态氮的含量甚至不到黄土高原的 70%,而硝态氮的含量则是黄土高原的 6.5 倍^[31]。土壤中低铵态氮高硝态氮是喀斯特地区土壤的典型特征。

喀斯特地区土壤高 pH 和高钙,使得土壤中的磷及营养元素难以移动,造成有效磷及营养元素的缺乏。刘丛强^[30]对石灰岩上的土壤和砂岩上的土壤的有效磷进行了比较发现,石灰岩地区的土壤有效磷的平均值仅为砂岩地区的 1/3。广西石灰土有效态的 Zn、Cu 和 B 的含量分别为 1.48、1.45 和 0.04 mg/kg^[32],而江苏宜兴市 1995 年测得的水稻土表层土壤有效态 Zn、Cu 和 B 的含量则为 3.94、5.12 和 0.28 mg/kg^[33]。由此可以看出,喀斯特地区土壤中的一些无机营养严重不足。

喀斯特地区植物因土壤养分不足,限制了它们的生长发育,导致它们固碳增汇能力的减弱;有效态氮、磷及营养元素缺乏也成为喀斯特地区植物光合固碳能力的另一限制因素。

2 喀斯特适生植物固碳增汇策略

2.1 开源固碳增汇策略

喀斯特环境下土壤中的重碳酸根离子含量高以及岩溶干旱等逆境严重地影响着植物的同化二氧化碳能力。喀斯特适生植物采用了交替、高效利用碳酸氢根离子作碳源的策略,应对这些喀斯特逆境。

在遭受喀斯特逆境(岩溶干旱、高钙、pH、重碳酸根离子以及低无机营养等)后,喀斯特适生植物的叶片碳酸酐酶活力升高,一方面导致气孔导度减小或关闭,减少蒸腾以防止植物进一步脱水;另一方面将细胞内的碳酸氢根离子转化成水和 CO_2 ,以应对因气孔导度减小或关闭造成的水分和 CO_2 的不足,在喀斯特逆境下进行光合碳还原,利用无机碳^[34-37]。

构树是喀斯特适生木本植物;诸葛菜是喀斯特适生草本植物。通过测定构树和桑树叶片碳酸氢根离子利用能力发现,构树碳酸氢根离子的利用能力为 6.60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而桑树仅为 2.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。通过测定诸葛菜和甘蓝型油菜叶片碳酸氢根离子利用能力发现,诸葛菜碳酸氢根离子的利用能力为 4.49 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而油菜仅为 0.09 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[38]。

植物对碳酸氢根离子的利用能力的大小与碳酸酐酶活力有关,喀斯特适生植物能交替利用碳酸氢根离子作无机碳源是它们固碳增汇的一个重要策略。

2.2 低成本倍增固碳增汇策略

植物的生长发育需要矿质营养。喀斯特环境地区因土壤浅薄、营养元素缺乏,严重地影响植物的光合作用和生长发育,因此,喀斯特适生植物在进化中

形成了高效利用无机营养的机制。

喀斯特适生植物对营养物质的吸收具有较大的亲和力和较小的营养吸收浓度^[39]。诸葛菜对 H_2PO_4^- 吸收的亲和力明显大于芥菜型油菜;吸收的最小浓度,诸葛菜为 $0.029 \mu\text{mol/L}$, 芥菜型油菜则达到 $0.078 \mu\text{mol/L}$ 。诸葛菜对 K^+ 吸收亲和力为 $0.059 \text{ L}/\mu\text{mol}$, 而芥菜型油菜则仅有 $0.036 \text{ L}/\mu\text{mol}$;吸收的最小浓度,诸葛菜也显著小于芥菜型油菜。

梁铮^[40]利用磷含量为 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ 、 $1/32$ 、 $1/64$ 和 0 六个水平的改进 Hoglland 营养液,在温度 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 $40\% \sim 50\%$ 、光照 $300 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 条件下,培养构树和桑树 45 天,分别测定它们的净光合速率,发现构树在供磷水平为 Hoglland 营养液的 $1/8$ 时,净光合速率与对照仍无显著区别,在供磷水平为 Hoglland 营养液的 $1/32$ 时,净光合速率还可达到对照的 $1/2$ 。而桑树的净光合速率受低磷胁迫的影响较大,在供磷水平为 Hoglland 营养液的 $1/8$ 时,净光合速率却不到对照的 $1/2$ 。由此可以看出,相对于桑树来说,构树可以以较低的成本获取较高的光合固碳能力。

金银花是喀斯特适生藤本植物。邢德科^[41]利用凡尔赛(Versailles)营养液作为母液,通过对原始营养液的稀释,配成原始浓度、 $1/2$ 浓度、 $1/4$ 浓度、 $1/8$ 浓度、 $1/16$ 浓度和 $1/32$ 浓度六种不同浓度的营养液,培养金银花、牵牛花、爬山虎,培养一个月后,测定植物的生长量,发现金银花的株高、茎粗、叶面积和植物干重的相对增长速率均在 $1/8$ 原始营养液浓度处达到最大值,而牵牛花和爬山虎各指标值则大部分都在 $1/2$ 原始营养液浓度处达到最大值。由此可以看出,相对于牵牛花和爬山虎来说,金银花可以以较低的成本获取较高的生物量。

总之,无论是喀斯特适生的藤本植物还是草本植物以及木本植物,它们都能够以低成本的营养来倍增固碳增汇。

2.3 以氮增汇策略

喀斯特环境地区由于土壤 pH 值高,造成铵态氮大量丧失。喀斯特适生植物在进化中形成了对铵态氮的高效吸收能力以及高效利用硝态氮的能力,成为植物克服氮源限制的重要手段。

喀斯特适生植物对铵态氮的吸收也具有较大的亲和力和较小的营养吸收浓度^[39]。诸葛菜对铵态氮的吸收亲和力为 $0.056 \text{ L}/\mu\text{mol}$, 而芥菜型油菜则仅有 $0.029 \text{ L}/\mu\text{mol}$;吸收的最小浓度,诸葛菜为 0.39

$\mu\text{mol/L}$, 芥菜型油菜则达到 $0.88 \mu\text{mol/L}$ 。

对构树、桑树和诸葛菜的铵态氮和硝酸盐利用能力测定表明,在营养液 pH 为 8.2 时,诸葛菜和构树的硝酸盐利用能力明显地大于桑树的。其中诸葛菜有平均 90.8 % 的氮源来自于硝酸盐,而桑树有平均 86.2 % 以上的氮源来自于铵态氮。在以聚乙二醇模拟干旱的条件下构树的硝酸盐利用能力大大增强,但整体氮的利用能力并未下降,而在以聚乙二醇模拟干旱严重的条件下,桑树对氮的利用能力下降则很快^[42]。

总之,喀斯特适生植物通过掠夺吸收限制性的铵态氮源,和以补偿式吸收硝态氮来破解氮的限制,从而实现固碳增汇作用。

2.4 其他策略

根据喀斯特适生植物的适生机制^[39,43],还可推断出喀斯特适生植物的一些其他固碳增汇策略。如:生物多样性策略,高光合策略以及优化根际环境等策略。

除此以外,喀斯特适生植物在有机物的分解方面可能有一些适应策略,在其他代谢过程上也可能有一些固碳增汇策略,这需要今后进一步研究。

3 喀斯特适生植物固碳增汇能力的利用途径

依据喀斯特适生植物的固碳增汇策略和机制,结合退耕(牧)还林、封山育林、低效林改造、植树造林等林业和生态恢复措施,通过筛选高光合植物、高效利用碳酸氢根离子植物、耐低营养植物、高效利用硝酸盐植物,配置种植,组合使用乔、灌、草本植物,构建喀斯特适生植被,形成生态恢复的固碳增汇体系以及经济植物、能源植物、中草药等开发利用的固碳增汇体系,最大限度挖掘出喀斯特地区植物的固碳增汇潜能。

4 结 语

喀斯特生态系统是脆弱的生态系统。虽然喀斯特地区的植物生产力受到岩溶干旱、低营养、高 pH、高重碳酸盐以及钙镁浓度等生态因子的限制,但是喀斯特适生植物已进化获得了一些相应的适应策略,如开源固碳增汇策略、低成本倍增固碳增汇策略以及以氮增汇策略等。把喀斯特适生植物自身的适应策略充分地运用到生态修复、石漠化治理与植物资源可持

续利用中,可以最大限度地挖掘喀斯特地区植物的固碳增汇能力,最终建成生态修复、石漠化治理与植物资源可持续利用固碳增汇体系。

此外,喀斯特适生植物的固碳增汇策略是多样的。不同的植物可能有一种或多种策略。因此,我们不仅要多方面来研究喀斯特适生植物的固碳增汇策略,而且还要充分利用好不同植物的不同策略,做到“因地制宜”,“适地”种植。

参考文献

- [1] 孔兰,梁虹,贺向辉,李陶琳,等. 喀斯特流域水资源问题及可持续利用对策[J]. 中国农村水利水电, 2008, (3): 17—19.
- [2] 苏维词,杨汉奎. 贵州岩溶区生态环境脆弱性类型的初步划分[J]. 环境科学研究, 1994, 7(6): 35—41.
- [3] 王德炉,喻理飞. 喀斯特环境生态脆弱性数量评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(6): 23—26.
- [4] 周游游,蒋忠诚,韦珍莲. 广西中部喀斯特干旱农业区的干旱程度及干旱成因分析[J]. 中国岩溶, 2003, 22(2): 144—149.
- [5] Betts R A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo [J]. Nature, 2000, 408: 187—190.
- [6] Myneni R, Dong J, Tucker C, et al. A large carbon sink in the woody biomass of northern forests [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2001, 98: 14784—14789.
- [7] Goodale C L, Apps M J, Birdsey R A, et al. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere [J]. Ecological Applications, 2002, 12: 891—899.
- [8] 张治军,张小全,朱建华,等. 2010, 广西主要人工林类型固碳成本核算[J]. 林业科学, 2010, 46: 16—22.
- [9] 张鹏超,张一平,杨国平,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林乔木碳储量及固碳增量[J]. 生态学杂志, 2010, 29: 1047—1053.
- [10] 于贵瑞,王秋风,刘迎春,等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础[J]. 地理科学进展, 2011, 30: 771—787.
- [11] 张志华,彭道黎. 森林管理对森林碳汇的作用和影响分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36: 3654—3656.
- [12] McKenney D W, Yemshanov D, Fox G, et al. Cost estimates for carbon sequestration from fast growing poplar plantations in Canada [J]. Forest Policy and Economics, 2004, 6: 345—358.
- [13] Xu D. The potential for reducing atmospheric carbon by large-scale afforestation in China and related cost/benefit analysis [J]. Biomass and Bioenergy, 1995, 8: 337—344.
- [14] Yoshimoto A. Evaluation of carbon sequestration and thinning regimes within the optimization framework for forest stand management [J]. European Journal of Forest Research, 2007, 126(2): 315—329.
- [15] Bravo F, Bravo-Oviedo A, Diaz-Balteiro L. Carbon sequestration in Spanish Mediterranean forests under two management alternatives: a modeling approach [J]. European Journal of Forest Research, 2008, 127: 225—234.
- [16] 陈伟杰,熊康宁,任晓冬,等. 岩溶地区石漠化综合治理的固碳增汇效应研究——基于实地监测数据的分析[J]. 中国岩溶, 2010, 29: 229—238.
- [17] 田大伦,王新凯,方晰,等. 喀斯特地区不同植被恢复模式幼林生态系统碳储量及其空间分布[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 7—14.
- [18] 刘合满,曹丽花. 退化草地碳动态及固碳潜力[J]. 中国农学通报, 27: 11—15.
- [19] Yuan D. Rock desertification in the subtropical karst of south China. Zeitschrift Fur Geomorphologie Supplementband [J]. 1997, 108: 81—90.
- [20] 覃小群. 桂中岩溶干旱特征及综合治理对策[J]. 桂林工学院学报, 2005, 25(3): 278—283.
- [21] Legrand H E, Stringfield V T. Karst hydrology: A review [J]. Journal of Hydrology, 1973, 20(2): 97—120.
- [22] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18: 37—44.
- [23] Guo F, Jiang G, Yuan D. Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas, China [J]. Environmental Geology, 2007, 53: 533—541.
- [24] 刘璐,曾馥平,宋同清,等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学, 2010, 21: 1667—1673.
- [25] 董玲玲,何腾兵,刘元生,等. 喀斯特山区不同母质(岩)发育的土壤主要理化性质差异性分析[J]. 土壤通报, 2008, 39: 471—474.
- [26] 姬飞腾,李楠,邓攀. 喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析[J]. 植物生态学报, 2009, 33: 926—935.
- [27] 熊德中,蔡海洋,张仁椒,等. 福建烟区土壤中量和微量营养元素含量状况的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15: 36—38.
- [28] 李志安,邹碧,曹裕松,等. 南方典型丘陵退化荒坡地土壤养分特征分析[J]. 生态学报, 2003, 23: 1648—1656.
- [29] Paramasivam S, Alva A K. Nitrogen recovery from controlled-release fertilizers under intermittent leaching and dry cycles [J]. Soil Science, 1997, 162: 447—453.
- [30] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特土壤—植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 308—353, 401—443.
- [31] 魏孝荣,邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 603—613.
- [32] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 843—984.
- [33] 蒋定安,成杰民. 近十几年来宜兴市水稻表层土壤pH及B、Cu、Zn、Mn有效态含量的变化[J]. 南京农业大学学报, 1997, 20(4): 111—113.
- [34] Hu H, Boisson-Dernier A, Israelsson-Nordström M, et al. Carbonic anhydrases are upstream regulators of CO₂ - controlled stomatal movements in guard cells [J]. Nature Cell Biology, 2010, 12: 87—93.

[35]

Wu Y Y, Zhao X Z, Li P P, et al. A study on the activities of carbonic anhydrase of two species of bryophytes, *Tortula sinensis* (Mull. Hal.) Broth. and *Barbula convoluta* Hedw. [J]. *Cryptogamie Bryologie*, 2006, 27 (3):349–355.

[36]

吴沿友, 邢德科, 朱咏莉, 等. 营养液 pH 对 3 种藤本植物生长和叶绿素荧光的影响[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(2):338–343.

[37]

Wu Y Y, Wu X M, Li P P, et al. Comparison of photosynthetic activity of *Orychophragmus violaceus* and oil-seed rape [J]. *Photosynthetica*, 2005, 43(2):299–302.

[38]

吴沿友, 邢德科, 刘莹. 植物利用碳酸氢根离子的特征分析[J]. *地球与环境*, 2011, 39(2): 273–277.

[39]

吴沿友, 刘丛强, 王世杰, 诸葛菜的喀斯特适生性[M]. 贵阳, 贵州科技出版社, 2004, 1–153.

[40]

梁铮. 构树和桑树对聚乙二醇诱导的干旱以及低磷的生理响应[D]. 镇江:江苏大学硕士学位论文, 2010.

[41]

邢德科. 三种藤本植物对高 pH 和低营养浓度适应性的对比研究[D]. 镇江:江苏大学硕士学位论文, 2009.

[42]

Wu Y Y, Zhao K. Determination on nitrate use capacity in plants via isotope tracer [J]. *Mineralogical Magazine*, 2011, 75(3):2183–2183.

[43]

吴沿友. 喀斯特适生植物诸葛菜综合研究[M]. 贵阳, 贵州科技出版社, 1997, 1–168.

Strategies to increase carbon fixation and sequestration by karst-adaptable plants

WU Yan-you

(State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: Based on the analysis on the soil chemical properties in karst area, it is proved the factors that restrict the increasing of carbon fixation and sequestration by the karst-adaptable plants involve karst drought, low nutrient, high pH value and high concentration of bicarbonate. The differences in the use of inorganic carbon and nitrogen as well as in responds to low nutrient by karst-adaptable and karst-inadaptable plants are also analyzed in the paper. The strategies to increase carbon fixation and sequestration by karst-adaptable plants are put forth, which includes the following strategies - efficiently using of bicarbonate source; gaining photosynthetic carbon fixation with low nutrition cost; absorbing restrictive ammonium nitrogen rapaciously and absorbing nitrate nitrogen as compensation. The ways to increase carbon fixation and sequestration by karst-adaptable plants is also proposed, that will maximally excavate the potential of increasing carbon fixation and sequestration by the plants in karst area.

Key words: karst; adaptable plants; carbon sequestration