植物营养与肥料学报 2017, 23(6): 1694–1698
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.17315
http://www.plantnutrifert.org

重视有机营养研究与有机碳肥创新
——关于植物营养经典理论的现代思考

廖宗文，毛小云，刘可星
（华南农业大学资源环境学院，广东广州 0510225）

摘要: 碳是 17 种必需营养元素之首，但长期以来对碳营养，尤其是有机碳营养的系统研究几乎为空白，由此导致了对作物碳饥饿的忽视。虽然作物可以通过光合作用从大气中获得碳，但仅能满足作物生长所需碳营养的 1/5。实践已经证明，通过施肥补充碳营养供给是作物高产优质的有效技术途径，生产可有效提供碳素营养的肥料也为现代化肥工业提供了新的发展机遇。为适应这种需求，迫切需要拓展现有经典的矿质营养框架，在有机营养理论方面取得突破，构建有机矿质营养理论的新体系。本文提出了有机碳肥的概念，分析了有机碳肥的特点及施肥补碳的重要性，讨论了有机碳肥在平衡施肥中的应用，指出基于有机碳概念的新型肥料研发是重大技术前沿和现代植物营养理论中富有生机的学术生长点。

关键词: 矿质营养；有机营养；碳饥饿；有机碳肥

More attention to organic nutrition research and innovation of organic carbon fertilizers——A modern thinking about classic plant nutrient theory

LIAO Zong-wen, MAO Xiao-yun, LIU Ke-xing
(*The College of Natural Resources and Environment of South China Agricultural University, Guangzhou 510225, China*)

Abstract: Carbon is listed on the first of the 17 necessary nutrient elements for plants. For a long time, however, there is little researche on carbon nutrition, even worse on the role of organic carbon in supplementation of plant carbon requirement. Plants are capable of acquiring carbon nutrition from atmosphere through photosynthesis and transferred CO_2 to organic carbon compounds for physiological metabolism and growth, which could only meet about 1/5 of plant demand in theory, and plants often suffer from carbon hunger actually. Some researches have proved the supplementary C nutrition through fertilization an effective way for increasing yield and quality of crops. The production of efficient carbon-containing fertilizers has offered a new opportunity for modern fertilizer industry. The concept of organic nutrition is proposed in this paper, and the features and importance of organic C fertilizer and its application in balanced fertilization are discussed. Organic C might become the frontier of new fertilizer and modern plant nutrient theory in research and development.

Key words: mineral nutrient; organic nutrient; carbon hunger; organic carbon fertilizer

1 靠天补碳导致作物碳饥饿

碳位列 17 种必需营养元素之首，在植物中的含量高达 50%[1]，为氮、磷、钾元素之和的 5 倍多，作物增产必需增碳。然而，国内外养分平衡研究和技术开发中的重点始终在氮、磷、钾，以及中微量元素，甚少涉及碳营养，尤其是有机碳。经典植物营养三个原理之一的最小因子律表达为木桶原理图，它形象地显示了消除营养元素短板对增产的重要性，同样，碳在经典理论上虽有其名而在木桶图中却无其位。100 多年来化肥工业生产出氮、磷、钾及中微量元素肥料品种，唯独碳肥 (除了二氧化碳施于

收稿日期：2017–08–14　　**接受日期：**2017–10–21
基金项目：广东省科技计划项目（2015B020237001）资助。
作者简介：廖宗文 (1947—)，男，广东新会人，教授，主要从事新型肥料研究。E-mail: zwliao@sohu.com

大棚外) 产品几为空白，这与碳营养的重要性是极不相配的。

碳主要来源于大气，通过光合作用将 CO_2 转化为需要的碳水化合物。大气 CO_2 浓度约为 360 mg/kg[1]，植物株间实际浓度 200 mg/kg，而光合作用的最佳浓度为 1000 mg/kg 左右[1−3]，大气浓度仅为最佳浓度的 1/5，在理论上作物存在碳饥饿。

作物生长过程是一种在大自然环境下进行的生化反应过程。作为生化反应最重要的底物之一，碳的供应不充分直接制约着生化反应的速率，同时减少反应物的生成，对于粮食作物来说，即产量减少。目前所有的高产记录均未将充足的碳营养作为前提，已有的肥料试验只能说是提高利用已有的碳供应量的结果，但作物产量有可能仍然受到碳饥饿的制约。若能在平衡施肥中补充碳，现有的高产记录可望被突破。

作为需求最多的营养元素，迄今碳未进入主流肥料生产，在肥料研究总结中也鲜有关注[4]。在大量施用氮磷钾的情况下，碳的供求矛盾更为尖锐。要改变这一现状，就必须施用超大量营养—碳，这样让碳的地位在肥料产品中得以落实[5]。

我国肥料企业和高校的科技人员在作物高产的探索中，逐步认识到碳营养的重要性，提出了“增产必须增碳，施氮必须施碳”的观点，并研发出化学降解、生物发酵等不同技术途径的有机碳肥生产方法，在大田生产中取得了明显的增产、提质和抗逆效果，显示了有机碳肥的各种优势[6−8]，为有机碳肥的研发和应用提供了良好的示范和引领作用。

2　有机碳肥、有机氮肥和有机肥不能混为一谈

有机肥和有机碳肥两者很容易混淆，其实两者在水溶性高低及有机成分官能团方面有很大区别[5−6]。有机肥虽然含有大量的碳，但其水溶性一般小于 10%，大都在 3% 左右，因而碳的有效性甚低，难以作为补碳的有效途径。其功效更多地通过改土而慢慢显示出来。有机碳肥特指水溶性高、含有易被植物吸收的糖、醇、酸 (含氨基酸) 等有机碳化合物的肥料，可以含氮 (如氨基酸)，也可以不含氮[5]。目前的有机碳肥按化学类型分，包括有机酸类，如乙酸、丙酸、氨基酸；糖类，如单糖、双糖、多糖；醇类，如乙醇、丙醇以及醛类等；链状、环状等。按存在状态可分为固态、液态和气态 (CO_2)。按结构复杂程度可分为简单碳营养，如单糖、乙酸、氨基酸等；复杂碳营养，如腐植酸、多糖、激素、多肽、维生素。结构复杂的有机碳营养，在植物体内需经多步反应才能合成，因而施用这类有机碳营养可节省更多的光能，肥效更明显。结构复杂的腐植酸和某些氨基酸类营养液则是其中的高端产品。

由于缺乏有机碳营养这一概念，有机碳肥还往往与有机氮肥混淆。含氮有机碳营养 (如氨基酸营养液)，多标为有机氮。其实，有机氮的肥效优势相当大程度上源于其中的碳架以及其中所含的光合能量。但这点往往被忽略而导致“见氮而不见碳”。研究显示，氨基酸、尿素等有机氮可直接被植物吸收[7−9]，且肥效往往优于无机氮[10−11]。氨基酸不仅是有机氮肥，更应被视为一种氮、碳二元复合肥。有机氮一定是有机碳，而有机碳未必是有机氮，但可包含有机氮。正确理解有机碳营养的概念，对于有机碳营养，尤其是无氮有机碳 (酸、醇等) 营养的开发利用十分重要。例如，光合作用中的重要代谢物，α－酮戊二酸具有突出的肥效[7−8]。

3　靠天补碳与施肥补碳的比较分析

施肥补碳已经在实践中显示了突出的增产、优质、抗逆优势。有机碳肥就其有机形态、应用范围及条件而言，远胜于二氧化碳，其优越性表现在三方面：

第一，可减少对光能的依赖。自然状态下的靠天补碳途径从头 (初始反应) 开始，如下。

$$CO_2+H_2O \xrightarrow[\text{光合能}]{\text{初始反应}} \text{糖} \xrightarrow[+\text{其他养分氮}]{\text{后续生化反应}} \text{系列大分子}(\text{糖、蛋白、酶})$$

这一过程受光照、温度和水分等诸多因素的影响。有机碳肥中的碳已经是有机态，无需消耗光能 (光合作用) 进行有机转化[1]，以后续生化反应为起点，初始反应的光合能可节省下来用于后续反应中，制造其他必需生化物质 (如酶、激素、信号传递物质等)，促进作物更好生长[1]。有机碳相对于无机化肥的独特优势是含有源于光合作用的化学内能，可用热力学的概念生成焓表示。其能值高低与结构复杂程度和反应步骤有关。有机碳营养如氨基酸、多肽、腐殖酸，其结构越复杂，经历的反应步骤就越多，所节省的生化反应能值 (焓) 也越高，可谓是构成作物生化组分的高端预构件。而一般的无机化肥及二氧化碳只是生化组分的初级原料，在阴雨或雾霾天光照不足时，作物因光合产物减少而生长不

良，有机碳肥节能补碳的优点表现得更明显，尤其在促长、抗病虫等方面更突出[6]。

第二，施用方便。有机碳肥为固体或液体，使用起来比气态碳肥方便，无论是大田或大棚均可广泛应用。

第三，增强作物抗逆性。作物对于寒、热、旱、涝、病虫害等逆境都有一套内在基因的对应机制，但作物对逆境的响应需要消耗含碳化合物去合成必需的信号物质并在不同部位进行传导、接收。碳供应不足必然影响抗逆信号物质的合成，降低作物的抗逆性。有机碳和二氧化碳碳的两种有效性优劣见表 1。

表 1 有机碳肥和二氧化碳对作物碳营养的有效性

Table 1 Effectiveness of organic carbon fertilizer and CO_2 on crop carbon nutrition

碳源 C source	形态 Phase	补碳途径 Supplementary path	能耗 Luminous energy	施用条件 Applying condition	光抑制程度 Light stress	光碳限制 Light-C limitation
CO_2	无机气态 Inorganic gaseous	叶面 Foliar	需光能 Consumed	大棚 Greenhouse	受限 Limited	多受限制 More limited
有机碳 Organics	固态/液态 Solid/liquid	叶和根 Foliar and root	省光能 Saved	大棚/大田 Greenhouse/field	较少受限 Less limited	较少限制 Less limited

4 有机碳肥与平衡施肥

氮、磷、钾以及中微量元素已经建立了营养诊断指标，用于平衡施肥[12–13]，碳尚未有诊断指标。有机碳种类多达上千种，从碳平衡的角度衡量其指标的难度很大。一个可行的办法是从有机物的共同特征碳链、碳环入手，把各种有机物均归纳为碳，以 C/N 为量化指标，则可实现以简驭繁，指导肥料生产及施用。初步试验表明，C/N 在 1 左右效果较好[5]，可作为进一步研究的参考。实际上，合适的碳氮比随气候 (光照、温度)，作物生长阶段 (前、中、后) 会有较大差别，因而不是一个稳定的常数[7–8]。

平衡施肥中，碳–光–氮的关系值得关注。缺光必少碳，少碳则氮的同化受阻，游离态水溶氮比例升高。光照不足时，以有机碳调整碳氮平衡，可降低游离态水溶氮比例，促生长、抗逆的肥效尤为明显[5, 7–8]。

最近在人工遮光条件下进行的等 NPK 水稻试验，显示出有机碳对碳–光–氮有重要调节作用，有“补碳增氮”效果[7]。无氮有机碳肥处理的生物量比对照高，增幅逾 30%，植株含氮量比对照高达 20%，水溶性氮占全氮的比例降幅高达 40%。这表明补碳促进了氮素的合成代谢，更多的水溶性小分子氮转化为功能性大分子，这一试验结果也为补碳增氮提供了佐证。

Myers 等[14]报道，大气中 CO_2 浓度的升高，会降低小麦、水稻、大豆等 C3 作物中的 Fe、Zn 及蛋白质含量，影响膳食营养质量。我们研究小组施用有机碳肥的研究结果表明，有机碳能提高稻米中 Fe、Zn 及粗蛋白的含量，平均增幅分别为 16%、23%、10%[8]。这也显示了在提高作物营养品质方面，二氧化碳不能替代有机碳营养。

5 有机碳肥生产的主要技术

基于有机碳营养概念的有机碳肥的技术目标是获取高有效性的小分子有机碳，而不是牺牲有机碳去获取无机态氮磷钾。一般的发酵技术关注氮磷钾有效化，过度好氧发酵使大量有机碳营养损失为二氧化碳，应予改进。因此，有机物料的分解反应尽量保持产物为有机形态，以最大限度地减少二氧化碳排放，保留小分子有机态产物的活性。依据此技术原则，目前有机碳肥的生产技术可大致归纳为生化 (发酵) 处理和化学降解处理二大途径，具体采取哪种处理途径，应依据原料来源及加工技术来决定。

以酒精、味精、酵母等发酵工业的废液为原料生产有机碳肥，可进一步降解废液提高有机碳产物活性。对蔗渣、秸秆等生物质原料，则宜采取以厌氧为主的少翻堆技术，将大分子有机物分子降解为小分子，尽量减少氧化导致的二氧化碳损失。福建绿洲公司的有机碳肥即是一成功的范例[6]。

西北农林科技大学研发成功的高效化学降解新技术，以食品、中药废渣等生物质为原料，通过独特的链式反应，可使 90% 的大分子有机物在 4 小时内转化为可溶性有机碳，生产出有机全营养肥料。以褐煤为原料加碱反应生产腐植酸这一传统工艺也能用于有机碳生产。新疆双龙、山西美邦等腐植酸公司通过原料选择、工艺处理及配方创新，生产的产品水溶性高、生理活性高，在全国各地应用效果

明显，并畅销海外。

6　我国有机碳肥的研发现状及发展前景

我国有机碳营养研究起步较早，上世纪八十年代，浙江农业大学孙曦先生领导的有机营养研究所进行了有机肥对作物的有机营养研究。有机营养在“六五”和“七五”期间被列入农业部重点项目，研究结果充分证明了有机肥中的有机成分对作物的直接作用及其优越性，后续研究仍在继续[11, 15]。虽然其研究重点是有机氮，但是长期积累的研究成果为有机碳的研究，尤其是含氮有机碳肥研究提供了重要的基础。

近年来，企业界、学术界已经出现了一些有机碳肥研发和生产先行者，还有企业家出版了有机碳肥专著[6]。有机碳的研发已经出现产学研结合、多学科攻关的苗头，开始显示出良好的发展前景。“碳基”系列产品陆续出现，其增产、优质和抗逆的独特优势引人注目，在药肥“双减”中显示了巨大作用[16–17]，成为企业新产品开发的热点。中国农业科学院农业资源与农业区划研究所新型肥料创新团队，在化肥中添加海藻、腐植酸、氨基酸等天然物质，开发了腐植酸尿素、海藻酸尿素和氨基酸尿素等增值尿素及复合肥新产品[17–19]，肥效显著，获多项发明专利。2012 年成立“化肥增值产业技术创新联盟”，推动我国传统化肥增值改性。华南农业大学新肥料资源研究中心利用有机废物资源研制了有机碳包膜氮肥 (黑尿) 及包膜钾肥等产品。有机碳肥还可被加工成活化剂，对磷、钾、镁、锌矿进行活化而生产促释型磷、钾、镁、锌肥料[20–21]。秸秆干馏产生的多元醇、酸等有机碳，不但改善作物的碳营养，还可发挥对中微量元素的增效作用。

有机碳施用与其他养分元素如何配合，尤其是氮肥的配合，是平衡施肥有待深入研究的新课题。有机碳与氮的配合比例对碳氮代谢和肥效有重要影响，比例适当，才能充分发挥肥效。最近的试验结果显示，平衡施肥中的碳氮平衡合适参数，以及施用浓度、施用频率等，可望为作物高产优质提供新的技术支撑和新的肥料产品[6–8]。

有机碳营养还可为有机污染物的处理提供新的治污思路及技术途径。有机污染物治理的主流技术是采用污水爆气，使有机物分解为无机物如 NH_3、NO_2 和 CO_2。若改换思路，以回收有机碳为目标，则可减少爆气氧化，结合微生物处理和化学处理，使之转化为高效的小分子有机碳营养，可化害为利和节能减排。

7　从矿质营养迈向有机营养

化肥工业的理论基础是 100 多年前李比西提出的经典矿质营养理论。我国有机碳研发已超出其“矿质营养”框架，不可能在经典矿质营养理论中找到相应的支撑。现有的有机碳肥的技术进步是生产实践巨大需求推动和肥料企业努力创新的结果，相关基础理论研究急待加强。研究表明，现有的高产记录都存在程度不一的碳饥饿[7–9]，试验证明通过施肥补碳可缓解碳饥饿。今后应开展更多的更严谨的试验论证施肥补碳的效果及其机制，可进一步提升产量。国内外一些有机碳的成果如腐殖酸、多肽氮肥、生物刺激物、菌肥等在一定程度上都属于有机碳肥，这些研发成果在矿质营养的经典框架下找不到相应的位置。需要从植物营养的角度增加、强化有机营养的理论，使零散的、局部的有机碳研究成果进入到有内在联系的系统中，最终探索归纳出有机营养的普遍规律，丰富和发展经典矿质植物营养理论。

参 考 文 献：

[1] 潘瑞炽. 植物生理学 (第六版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
Pan R Z. Plant physiology (6th Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

[2] 郑帷婕, 包维楷, 辜彬, 等. 陆生高等植物碳含量及其特点[J]. 生态学杂志, 2007, 26(3): 307–313.
Zheng W J, Bao W K, Gu B, *et al*. Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(3): 307–313.

[3] 杨连新, 李世峰, 王余龙, 等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 75–80.
Yang L X, Li S F, Wang Y L, *et al*. Effects of free-air CO_2 enrichment (FACE) on yield formation of wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1): 75–80.

[4] 杨帆, 孟远夺, 姜义, 等. 2013年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 217–225.
Yang F, Meng Y D, Jiang Y, *et al*. Chemical fertilizer application and supply in crop farming in China in 2013[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 217–225.

[5] 廖宗文, 毛小云, 刘可星. 有机碳肥对养分平衡的作用初探—试析植物营养中的碳短板[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 237–240.
Liao Z W, Mao X Y, Liu K X. Effect of organic carbon fertilizer on nutrient balance-analysis of carbon, a shortboard, in plant nutrition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 237–240.

[6] 李瑞波, 吴少全. 生化黄腐酸与有机碳肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

Li R B, Wu S Q. Biology fulvic acid and organic carbon fertilizer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[7] 桂丕, 廖宗文, 汪立梅, 毛小云. 弱光照条件下有机碳营养对水稻生长的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 936–939.
Gui P, Liao Z W, Wang L M, Mao X Y. Effects of organic carbon nutrition on rice growth under weak light conditions[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4): 936–939.

[8] 桂丕, 陈娴, 廖宗文, 等. 不同氮水平下有机碳对薤菜碳氮代谢及生长的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 746–753.
Gui P, Chen X, Liao Z W, *et al*. Effect of organic carbon on carbon and nitrogen metabolism and the growth of water spinach as affected by soil nitrogen levels[J]. Acta Pedosphere Sinica, 2016, 53(3): 746–753.

[9] 莫良玉, 吴良欢, 陶勤南. 高等植物对有机氮吸收与利用研究进展[J]. 生态学报, 2001, 22(1): 118–124.
Mo L Y, Wu L H, Tao Q N. Advances in study of plant organic nitrogen nutrition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 22(1): 118–124.

[10] 吴良欢, 陶勤南. 水稻氨基酸态氮营养效应及其机理研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 464–473.
Wu L H, Tao Q N. Effects of amino acid-N on rice nitrogen nutrition and its mechanism[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 464–473.

[11] 张夫道, 孙曦. 氨基酸对水稻营养作用的研究[J]. 中国农业科学, 1984, (5): 61–66.
Zhang F D, Sun X. A study of nutrition of amino acids in rice seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1984, (5): 61–66.

[12] 浙江农业大学. 作物营养与施肥[M]. 北京: 农业出版社, 1990.
Zhejiang Agricultural University. Crop nutrition and fertilization [M]. Beijing: Agriculture Press, 1990.

[13] 黄云. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014. 10–14.
Huang Y. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014. 10–14.

[14] Myers S S, Zanobetti A, Kloog I, *et al*. Increasing CO_2 threatens human nutrition[J]. Nature, 2014, 510: 139–142.

[15] 曹小闯, 吴良欢, 陈贤友, 韩科峰. 氨基酸部分替代硝态氮对小白菜产量、品质及根际分泌物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 699–705.
Cao X C, Wu L H, Chen X Y, Han K F. Effects of partial replacing NO_3^--N with amino acid on yield, quality and root secretion of pakchoi(*Brassica Chinensis* L.)[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 699–705.

[16] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 1–7.
Zhao B Q. Improving performance and function of traditional fertilizers by synergistic modification[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 1–7.

[17] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1065–1076.
Zhang S Q, Yuan L, Lin Z A, *et al*. Progress in the mechanism of humic acid promoting plant growth[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(4): 1065–1076.

[18] 杜伟, 赵秉强, 林治安, 等. 有机无机复混肥优化化肥养分利用的效应与机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 579–586.
Du W, Zhao B Q, Lin Z A, *et al*. Study on effect and mechanism of organic inorganic compound fertilizer optimizing nutrient utilization of chemical fertilizer[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 579–586.

[19] 袁亮, 赵秉强, 林治安, 等. 增值尿素对小麦产量、氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 620–628.
Yuan L, Zhao B Q, Lin Z A, *et al*. Effects of value-added urea on wheat yield, nitrogen use efficiency and distribution of fertilizer nitrogen in soil profiles[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(3): 620–628.

[20] 孙克君, 赵冰, 卢其明, 廖宗文. 活化磷肥的磷素释放特性、肥效及活化机理研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1722–1729.
Sun K J, Zhao B, Lu Q M, Liao Z W. Study on release characteristics, fertilizer effect and activated mechanism of activated phosphoric fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1722–1729.

[21] 廖宗文, 刘可星, 毛小云. 腐植酸的三大作用—有机营养、活化、微生态调控及其技术开发[J]. 腐植酸, 2012, (6): 1–4.
Liao Z W, Liu K X, Mao X Y. Three major functions of humic acid - organic nutrition, activation, micro ecology and its technical development[J]. Humic Acid, 2012, (6): 1–4.