

土壤碳 重建

生物学可否完成这项工作？



杰克 基特里奇

政策主管，东北有机农耕协会/马萨诸塞州分会

www.nofamass.org

东北有机农耕协会/马萨诸塞州分会

2015年8月14日



翻译文件由国际再生提供。
给地球降温。喂养全世界。

更多资讯请访问：www.regenerationinternational.org/international-translations

前言

近来在科学界和政界许多讨论聚焦于如何处理温室气体的排放及因此而引起的极端天气。大多分析家认为，如果我们希望减少进一步的天气危机及其引起的相关人类悲剧、经济混乱以及社会冲突，我们必须停止化石燃料的燃烧以避免大气含碳量的进一步增加，同时寻求途径去除大气中已有的碳。

但是我们于何处安置那些从大气中移除的碳？唯一的可行途径是---还归本处，它该属的地方，土壤。幸运的是，这个方法并不昂贵。但是它需要大量人力同意参与。没有好的理由，极少数人会改变他们的行为方式，所以我们撰写了这篇短文。我们希望可以很好地解释二氧化碳的累积和气候变化，如何将大气中的碳移出并重建于土壤，以及渐增的富碳土壤对农民和消费者的益处。

气候变化

众所周知，异常天气是难以证明的。要证明需历时长的可靠数据，以及清晰的标准去衡量何为异常。但是，最近越来越多的人对这个话题感兴趣，所以这方面的数据和标准有了进展。极端天气的关键因素是过热，降水和空气湿度。研究表明，在最近的 50 到 150 年间，月平均气温，极端降水，平均空气湿度皆上升或增加（邹谋）。

大多数科学家认为如此不可预测的极端天气的起因是人为的（源自人类活动的）温室气体（GHG）在大气中的累积。缜密的极端天气事件的模式研究和分析发现，人为造成的气候变化是许多这样极端天气的成因之一。（彼得森）根据美国科学促进会，“基于确凿的证据，约 97% 的气候学家认为人为造成的气候变化正在发生中。”（美国科学促进会）

温室气体如何引起气候变化

温室气体，主要是二氧化碳，也包括甲烷、臭氧、一氧化二氮，百万年以来通过自然途径从土壤和水排放到大气中，比如动物呼吸，沼泽排气，固氮细菌释放。（美国环境保护署）同时，这些气体通过自然途径分解并且以连续循环的方式回归到它们的源头。只要温室气体的排放量和回到源头的量保持平衡，就不会发生气候变化。

在大气中我们需要一定水平的温室气体。它们捕获太阳辐射，以便减少地球反射回宇宙的能量。这增加了行星的热量，并形成天气。如果没有这些气体，地球将终年处于冰冻之中，太过寒冷不适合人类生活。在大气中某一种气体的水平以 ppm（百万分之）为单位进行测量。氮气，氧气，氩气，这些我们大气层中的主要气体，总共占 999,000 ppm。贯穿整个人类历史，大气中的二氧化碳水平大约维持在 280 ppm，或者说少于 0.03%。

碳循环的人为干扰

自 12000 年前农业诞生以来，人类毁林开荒，耕种作物排放了过多的二氧化碳。通过深冰核心分析和技术，科学家探测到早期大气中二氧化碳和甲烷的剧增与数千年前美索不达米亚地区和中国的农业扩张相契合。（阿蒙森）

更近一些的，自 1750 年以来，随着化石燃料燃烧的迅速增加和农业工业化的快速扩大，人为造成的温室气体的规模和数量迅猛增加。越来越多的碳从土壤中流失，而回归土壤的碳却愈少，大气中的二氧化碳水平不断升高，现在已到达 400 ppm。

问题的范畴

（给数字爱好者们！）

注：这个领域的计算皆使用公制。1 吨，即 1 公吨，相当于 1000 千克或 2204.6 磅。1 Gt 相当于 10 亿公吨。1 公顷，相当于 10,000 平方米或 2.47 英亩。

科学家们预估为了避免灾难性的气候变化我们需要将大气中的二氧化碳水平约降至 350 ppm。（美国国家航空航天局）（许多研究者认为更安全的目标水平是工业化前的水平，估算在 275-280 ppm,但是大多数公众讨论都决定用 350 ppm 这个数值。）大气中 1 ppm 的二氧化碳等同于 7.8 Gt 的二氧化碳。二氧化碳分子大部分是氧，碳仅占四分之一多一点（精确来说，占 27.3%）。这样大气中 1 ppm 的二氧化碳包含 2.125 Gt 的碳（为了说明，这大约是一立方公里的固态石墨的大小）

因此我们需要在或者低于 350 ppm 的二氧化碳水平生活，但是现在二氧化碳水平已至 400 ppm 而且还在增长。我们能做些什么？

假使我们减少排放？

毫无疑问的是，人类作为一个整体需停止排放过量的温室气体。据估计，三分之二的温室气体排放源自化石燃料的燃烧。（昂托）我们需要停止对化石燃料的依赖，发展替代能源。这点政府是众所周知的。曾建立国际团体以推动这个目标。这可能是人类历史上最难的变化之一，但如果我们想要生存，就需要找到使这个变化发生的政策和机制。然而，这不是我们唯一需要面对的问题。

假如我们明日的的话就能停止所有的排放？那些我们已经排放到大气中的温室气体将会继续加热全球长达数十载甚至可能几个世纪。这会导致冰川和冻土融化，海平面上升和那些处于冰冻状态大量温室气体的释放。

举个例子，北极地区就存在一个潜在的问题。在北极，大量处于冰冻状态的甲烷，一种强有力的温室气体，会经由融化而释放到大气中。巨大数量的碳也被冰封在冻土层。不断变暖的环境可能将之暴露于微生物分解中，以二氧化碳的形式被释放。如果微生物降解发生在没有氧气的情况下，比如说沼泽或湿地，那么碳将被其它微生物以甲烷的形式释放。（美国国家冰雪数据中心）

因此，仅降低排放是不够的。我们必须同时阻止全球气温的升高。如果现在二氧化碳的水平大概在 400 ppm 而我们想让其快速降回 350 ppm，我们需要将大气中的碳移出并置于他处。我们需要为这 50 ppm 的二氧化碳，即 106.25 Gt 的碳找一个长期的家。这可以做到吗？

何处安置这些碳？

在一个 70% 的表面被水覆盖的星球，我们无法安全贮存大气中的碳。二氧化碳溶于水形成碳酸。几十年来我们看到海洋中日趋增加的碳酸带来的影响。海洋 pH 在持续下降，酸化导致多种形式的海洋生物死亡，如贝类，珊瑚虫，浮游生物。（美国国家海洋和大气管理局）

但是，贮存碳于土壤中，则是另外一回事。土壤是碳原来的地方，也是需要碳的地方。科学家们预估自工业革命以来开荒耕田从全世界的土壤中释放了 136 Gt 的碳。（拉尔 2004）所以由于我们的开荒耕田，相比我们需要放回去的碳，土壤失去了更多。土壤还

存有多少的碳呢？极多。再者，科学家预估在全球土壤最表层的 30 厘米内（大约一英尺），大约有 700 Gt 的碳。如果你计算整整一米的土壤最表层，碳储量则翻了一番，大约 1500 Gt。（帕沃森）显然，土壤曾可容纳这么多的碳，它可以再次做到。

但是，在我们回答将 106.25 Gt 的碳还给土壤的问题之前，我们先对土壤进行一些更好的了解。

土壤的碳饥荒

土壤是有生命的。它富含各种细菌，真菌，藻类，原生动物，线虫类，以及许多其它生物。事实上，在一茶匙的健康土壤里，有比地球上人口数量都多的微生物。（胡尔曼）当然，作为碳基生命，这个丰富的群体需要持续不断有机质的供给来生存。这有机质（大约 58%是碳）是以生命有机体分泌物的形式，通常是单糖类，或者是它们的残基，通常是碳水化合物之类的比如说纤维素。这些化合物富含能量，有机体容易获得，而且能被土壤微生物快速吸收。举例来说，土壤表层的单糖，在它们被消耗之前，半衰期可能少于一小时。（邓盖特）

土壤中有机生命体对碳的巨大需求意味着在健康的土壤里这些有机生命体可迅速消化可获得的有机质。它们将碳吸收入体内，转化为能量，释放出二氧化碳。事实上一英亩的爱荷华玉米地的微生物类释放的二氧化碳比 25 名工作中的健康人还多。（阿尔布雷克特）一旦这些微生物死亡，它们体内的碳被其它生命体分解并排出。

土壤有机生命体的活动遵循四季和日夜的规律。并非所有有机生命体都在同一时间活动。在任何时候大多数几乎都是不活跃或者甚至是休眠的。食物的可得性是影响土壤有机生命体数量和活跃水平的重要因素。（联合国粮食与农业组织）

光合作用

然而，如果碳在土壤中的消耗如此之快，那么为什么它没有在土壤迅速消失呢？

答案是植物在持续不断地更新补给。自 35 亿年前植物进化起始，植物繁荣兴盛，利用其自身卓越的能力，利用大气中的碳来合成有机质。当然，这个过程，就是大多数学校教孩子的所谓光合作用。

它的作用机理是这样的：植物叶片中的叶绿素吸收光能，并利用其将水分解为氢原子和氧原子。然后植物将这些氧原子以氧气的形式释放到大气中（两个氧原子结合在一起，

形成一个 O₂ 分子），并暂时储存这些氢原子。在光合作用的第二阶段，这些氢原子和二氧化碳分子相结合生成简单的碳水化合物如葡萄糖（C₆H₁₂O₆）。

这个过程，就像所有的化学反应一样，受制于成分的可获得性。因为在大气中二氧化碳的浓度如此之低（现在 0.04%），这通常成为光合作用的限制因素。（英国皇家化学学会）在较高的气体浓度，植物可吸收更多的光能，汲取更多的水以增加碳水化合物的产量。（昂托）在其它情况下，比如说在夜晚或早期，光或者水也会成为限制因素。

这个过程的规模也是客观的。一英亩的小麦每年可以二氧化碳的形式吸收 8,900 磅的碳，将其与水结合，生成葡萄糖。由此生成的糖可达 22,000 磅。这个过程如此活跃，估计每年全世界大气中 15% 的二氧化碳会通过光合生物移至它处。（SAPS）

根系分泌物

当然，光合作用使植物和其它光合生物（比如蓝绿藻）在生命中扮演一个特殊的角色。所有活着的生命体都是碳基的，需要通过消耗碳维持生存。如果你能像植物一样从稀薄的空气中吸取碳，那么你便拥有极强的优势。但是，即使你不能自身生成碳化合物，你也必须拥有它。

土壤微生物还可以通过什么方式获取碳呢？它们会“赚取”碳。

土壤学家正在了解的关于植物和土壤生命体的不同寻常的一方面是它们似乎能以互惠互利的方式共同进化。

当植物在叶绿体中进行光合作用，生成碳水化合物时，它们为了其自身的细胞和结构消耗了一些化合物，有一些转化为生物能为其所用。但是，它们“泄露”或分泌了相当大数量的化合物“液态碳”进入土壤。（琼斯 SOS）估计 20% 到 40% 由植物光合作用固定的碳被转移到根圈（紧密环绕着植物根系的土壤范围）。(沃克)

为什么植物要渗露甜汁给土壤呢？

作为诱饵。

饥饿的细菌，真菌及其它土壤微生物会迅速出现消灭这可口的含碳根系分泌物。但是很快它们想要更多---最好的获得方式就是去协助植物去生成更多。如果植物健康强壮，它就能为光合作用提供更多的资源，渗出更多的碳。这样微生物以多样的方式帮助植物繁茂并生产更多的液态碳。

关于土壤生化，我们已有了更多的了解，我们发现，通过根系分泌物，植物有能力去很大程度上控制它们的本地环境---调节本地土壤微生物群落，应对食草动物的掠食，“购买”远处营养物送货上门，改变附近土壤的化学和物理特性，抑制竞争类植物的生长。

微生物共生

事先声明以下所述大多仍在研究中。土壤是一个诸多仍待学习研究的领域。微生物群落极富多样性---其中90%到99%的种类甚至以目前的技术无法在实验室培养。(贾斯特罗)

细菌和真菌，按质量计，在土壤微生物群落中占据超过90%的比例。细菌和真菌两者之间的确切比例各不相同。未受干扰的土壤比如草地和森林更受益于那些菌丝未被破坏的真菌。而耕作或使用合成氮肥会减少真菌的数量。

微生物成功的主要因素在于它们是否得到临近物理环境的保护。黏土可以提供保护，科学家认为黏土可以维持最佳pH，吸收有害代谢产物，和/或防干燥。底层的小孔（用于“躲藏”），也可以阻止较大生物体，如原生动物，对较小生物体的掠食。（陆）据报道，受保护的生物体一天死亡率低于1%，然而未受保护的一天死亡率则高达70%。

细菌

细菌是神奇的化学家。一组叫做根圈促生细菌（PGPR）的细菌，变魔术般地帮助植物完成一系列的生化通路。有的可从大气中“固”氮，以一种植物可以利用的形式。有的可以合成植物激素以改良植物生长。有的可以使磷酸盐溶解，使之成为植物生长所利用，而磷酸盐是一种相对难溶的必需营养物，或者，生成天然的杀真菌剂，协助植物抵御真菌疾病。（韦利维里）曾从许多常见植物包括小麦、白花苜蓿和大蒜中分离出来一种根圈促生细菌。实际上这种细菌生产不同的抗生素，即抗病原的物质，帮助植物抵御疾病。（提姆斯克）

真菌

另一个微生物共生的例子为丛枝菌根真菌。在这种共生中，真菌大批繁殖于两处不同的环境，寄主的根部和周围的土壤，并用长长的菌丝连接根和土壤。这使寄主植物借由菌丝的传导更好地汲取水分和矿物养分。这种共生关系被证明与多种矿物质有关，包括磷、氮、锌和铜。（简萨）据某些估计超过90%的陆生植物喜欢与丛枝菌根真菌的这种联系。（加里）

一些科学家估计 85%到 90%的植物所需养分是从碳交换中获得的，根系分泌物以微生物的能量来换取用其它方式无法获得的矿物质或微量元素。（琼斯 SOS）这样的关系不需任何代价便能互惠互利。唯一额外需要的能量由日光提供，日光使更加强壮的植物可以生产更多的化合物去活跃和滋养微生物。

土壤团聚体

一个重要的方面是一种名为团聚体的土壤结构。如果你挤压一把健康的土壤然后再放开，它应该看上去像一把豌豆。这就是团聚体。如果土壤仍维持硬块状，则说明它没有很好的团聚。团聚体既有足够的稳定性去抵御风和水的侵蚀，又有良好的孔隙性让空气、水和根茎通过。

团聚体是土壤结构的基础单位，与豆科植物的根瘤作用相仿，即创造一个保护的空间。（琼斯 SOS）菌根真菌的菌丝帮助形成团聚体，菌丝形成一个“粘丝囊”包裹缠绕土壤颗粒。（贾斯特 Jastrow）植物根系的液碳分泌物和真菌生成胶结物质，构成团聚体的壁。（琼斯 SOS）

在团聚体内进行着很多生物活动，也是由碳分泌物提供能量的。大多数团聚体与植物根系相连，通常是纤细的营养根，或与太小不足以被看到的菌根真菌网络相连。团聚体内湿度比外面大，氧气压比外面低。这些重要特性使固氮和其它生化活动成为可能。（琼斯 SOS）

其中一种将团聚体粘在一起的重要胶结物质是一种叫做“球囊霉素”的糖蛋白。球囊霉素和土壤团聚体的稳定性紧密相连。（尼科尔斯）球囊霉素仅在 1996 年发现，但现在一些科学家认为它占土壤碳储的 27%，且在土壤中的周转时间可长达超过 40 年，根据不同情况而定。球囊霉素由丛枝菌根真菌利用植物分泌的液碳所生成。球囊霉素帮助真菌菌丝与根系和土壤颗粒结合，且作为空隙间的桥梁。（考密斯）

既然我们已经进一步地了解了土壤，以及植物如何将碳泵入土壤以促进它与微生物的共生，我们可以再次提出这个问题：

如何迅速在土壤重建足够的碳以缓和极端天气

前文提到大气中 1 ppm 的二氧化碳包含 2.125 Gt 的碳。如果是这样的话，现在大气中二氧化碳水平为 400 ppm 而需要降至 350 ppm，我们需要在土壤中重建 50 ppm，即 106.25 Gt 的碳。

我们知道这些碳适合置于土壤因为这是它来自的地方。自工业时代以来我们就用开荒耕田的方式将 136 Gt 的碳从土壤中带走。

但是我们能以多快的速度将碳放回？在过去的 20 年里，人们不断思考重建土壤中的碳，因而有很多研究测量了农业光合作用积累土壤碳的速率。我们参考了过去十年的一系列研究，覆盖五大洲不同种类的土壤以及不同类型的农业。这些研究使用不同的方法论，结果当然也各异。但是从这些研究来看，有几点是很明显的。

- 多年生生长系统可比大多其它农业方法储存更多的碳。所有以草场为基础的试验显示了极好的碳重建，每年每英亩 1.9 到 3.2 公吨的碳，平均 2.6 吨。（麦科姆勒，罗代尔，国际有机农业运动联盟）几乎很少发现关于多年生作物系统积累大量土壤碳的报道，但是有证据发现多年生木本可以做到。一份研究发现，当种植黑角豆树并利用其作为短期轮作系统的一种矮林生物质，退化的已开采土壤每年每英亩获得 2.8 公吨的碳。（奎因斯丹）我们需要更多的研究来全面评估多年生木本或草本作物对重建土壤碳的贡献。

- 使用合成化肥，特别是氮肥和磷肥，严重减少甚至在许多情况下消除了土壤碳的积累。然而，适当的使用粪肥和堆肥，似乎并未阻碍土壤碳的增加。（琼斯，SOS，罗代尔）

- 研究发现中耕作物，即使没有使用合成的化学物，获得的碳也比草场的少，每英亩 0.23 到 1.66 吨，平均 0.55 吨。（高冉德尔，国际有机农业运动联盟）

- 不同农耕方法质量也各异，特别是中耕作物的试验。实际上所有中耕作物研究表示以粪肥和堆肥代替化肥的，土壤获得大量的碳。但是其它积累碳的方法的使用程度并不清楚，比如让土壤一直保持植被覆盖，使用多种类混合覆盖作物，将耕作减至最低程度。但是，值得注意的是，在获得最多碳的中耕作物试验中，每英亩玉米重建 1.66 吨的碳，采用了有机免耕。（高冉德尔）

鉴于这些试验的平均，我们来快速大略地计算一下农业将 106.25 Gt 的碳重建于土壤的潜能。

联合国粮食及农业组织说全球有 83 亿英亩的草地和 38 亿英亩的农田。如果在这些地上每个人都愿使用积累碳的方法，平均每英亩 2.6 吨的草地每年可以重建 21.6 Gt 的碳，平均每英亩 0.55 吨的农田可以重建 2.1 Gt 的碳。这样每年总共就有 23.7 Gt。我们的目标是重建 106.25 Gt，这意味着 5 年之内我们就可以做到！

稳定的碳

当然如果我们希望在土壤重建大量的碳，我们不能让微生物将碳消耗。否则最终它们只是将这些碳消耗，并以二氧化碳的形式再次释放到大气中。许多研究分析了处理土壤有机质是否能帮助保存碳。一个 10 年的研究比较了将有机质混合入样地与将有机质从相似的样地移除。另一个历时 31 年的研究比较了不同的轮作方式和施肥方法，回到土壤的碳的数量差异达 50%。第三个研究比较了多年来在样地上将作物焚烧和将作物还田。在每个研究结束时，研究者们测量土壤有机质，尽管使用不同的管理方法，不同样地之间并无明显差异。（科克拜）

如果无论碳以何种形式存在微生物都能繁殖并将其消耗，我们永不可能在土壤中积累更多的碳。但是，历史上，土壤中 6%-10%的有机质水平是常见的，而且有的地方高达 20%。（拉萨里）在过去是什么阻止了土壤微生物分解有机质？

一种能够保持稳定长达数年甚至几个世纪形式的碳，是腐殖质。它由复杂的含碳分子组成，但是不易被土壤生物降解。科学家对于腐殖质如何形成，以及如何抵御分解的意见并不完全一致。有的认为腐殖质是由微生物分解根系和根系产物形成的一种极度难分解形式的碳。（昂托）

其他科学家认为物理保存土壤碳的机制或与它通过吸附到矿物质上以抵御微生物酶的进攻有关，或者与土壤团聚体的保护有关。前者表明与粘土颗粒或土壤胶质的化学结合足够强大，可以抵御危险的酶的攻击。后者将氧气或其他分解要素挡在团聚体外以保护分子免受酶的攻击。此外，还有一个理论提到因为它在土壤中的深度让微生物不易获得土壤碳。（邓盖特）

但是，在某些科学家那里一个想法逐渐形成，稳定的碳并不是来自土壤有机质的残留而是来自于液碳自身。这个想法里，腐殖质是土壤微生物积累的杰作，而不是有机质分解的产物。（梅伦觉兹，琼斯信件）

支持这个观点的研究表明腐殖质是一种有机物-矿物复合体，包含 60%的碳，6%-8%的氮，并与土壤中的矿物质磷、硫、铁、铝有化学偶联。甚至有些证据表明腐殖质的组成建立在它的主要组分特殊比例的基础上，不仅仅是碳氮比，还有碳硫比。（科克拜）一位研究者坚持认为腐殖质仅能在特殊的土壤微小部分如团聚体形成，在那里存在活跃的固氮和磷硫的固化。（琼斯信件）

我们如何重建碳并使之稳定？

当土壤学家更多地了解腐殖质的组分及其形成中微生物的过程，我们可以更好地意识到如何协助腐殖质的形成。但是，有证据表明积累土壤有机质不仅仅是一项将有机质加到土壤的工作。它会带来微生物群体的兴盛，并带来作物蓬勃生长。但如果需要积累长期碳，你需要做更多。

我们需要知道的是：我们需要什么方法去积累和保持土壤中的碳？

土壤植被保持

可能最重要的一课就是光秃秃的土壤造成碳的氧化，而有植被的土壤受保护。绿色植物形成了空气和土壤之间的一道屏障，减慢了微生物释放碳的进程。风和水的侵蚀也是土壤碳的一个主要敌人，生长中的植物是抵御侵蚀的最佳保护。最后，植物不仅可保护土壤中的碳还能够通过它们光合作用的能力为土壤添加碳。简单地讲，任何一平方英尺暴露着的土壤，---无论是在两行作物之间，因为你在耕地，或是因为你刚刚收割一种作物，土地休耕---都会减少你的碳储。

实践方法，比如种下冬季的蔬菜覆盖土壤或在下面播种豆科和覆盖作物，是很重要的，这样当作物收割以后，依旧有植被覆盖增加土壤碳，保护土壤不被侵蚀，喂食土壤有机体和增加团聚体。（阿兹）

最小限度的耕作

对于有机种植者来说最难采用的碳重建的方法之一就是减少耕作。因为有机种植者不用除草剂，所以耕田是它们对付杂草最主要的武器。但是耕作有几点害处。第一，它搅起了土壤，让它暴露于空气，氧化了暴露在土壤中的碳。第二，耕作撕碎毁坏了菌根真菌的菌丝，菌根真菌是一种与植物共生的，对植物强健很重要的微生物，并且能够增加液碳的分泌。它们的菌丝形成纤细的网络，穿过土壤，给植物根部运送水和养分。研究表明所有减少耕作的地方真菌生物量皆有所增长。（陆）第三，由微生物分泌液积累的复合土壤团聚体，会被耕作破坏，这些团聚体可以保护重要的化学转换比如固氮和稳定碳。第四，耕作会摧毁土壤孔隙，土壤孔隙对保持土壤水和空气至关重要，为微生物的活力提供了条件。最后，耕作本身涉及到使用化石燃料的机械，在运转过程中释放更多的温室气体。

研究表明那些有着最高碳重建水平的有机作物系统是那些免耕并添加大量有机质如牛粪到土壤中的做法。（高冉德尔）耕作的批评者说到数年后的一次耕作可以造成这段时间类积累的大多数碳的丢失。（拉尔 2007）

一些研究报道免耕获得的土壤碳并没有分布在土壤深层，而大多发生在接近土壤表层的
地方。他们认为这是一个问题，因为最适合腐殖质形成和长期碳稳固的是在土壤较深
的地方，接近粘土和矿物，碳与它们结合来抗氧化。同时他们认为免耕管理产生的土壤有
机质仅仅在沙质/土壤浅表，一旦受扰非常容易氧化。（阿兹）

但是有些报道指出免耕积累的有机质在浅层，同时又提出在免耕系统 10-15 年后，这些
土壤有机质会慢慢进入深层，可能是因为有机质分解的减少和较大土壤生物体长期混合
土壤的结果。（帕沃森）

现在我们正为有机种植者设计出一些系统和设备来减少耕作。少耕播种机打开仅供种子
大小的土，或是播种后随即回土覆盖。滚压卷缩机可以滚压卷曲茎干较长的覆盖作物，
在开花之前杀灭它们，但是不打扰土壤。然后经济作物可以播种于覆盖作物的残茬间。
无疑地，将来会发展出很多其它的为有机种植者设计的抵抗杂草同时不扰土壤的好方
法。在这个前沿方面势必需要更多的进展。

控制杂草的另一个备选方法是使用覆盖物阻止阳光照射杂草。最简单的覆盖物就是塑料
膜。但是，塑料膜的生产通常需要化石燃料而且清除它是困难和历时漫长的。有机材质
如甘草或碾碎的作物残留作为覆盖物，可为土壤添加分解的有机质，积累碳，但是生物
活跃的土壤需要持续不断的额外材料，可能耗费大量的金钱和时间。但是，覆盖物的主
要缺点是它并不可以像活的植物一样通过光合作用将大气中的碳移除并将之固定于土
壤中。

覆盖作物

在任何减少或消除性耕作，控制杂草和积累土壤碳的有机方法里，覆盖植物是必不可
少的。理想的覆盖作物是那些能在开花前可被（霜降，割，碾压）杀死的，这样他们就
不会产出种子自身也变成杂草。在它们活着的时候，它们的光合作用是土壤碳的一个重
要来源，而且它们死后他们的生物质也可用。在混合的覆盖作物里，豆科植物是重要
的，它们是深根植物，比如一年生黑麦草和黑麦，将养分送至土壤深层同时将氮和碳添
加到较浅层。

除了增加土壤碳储，覆盖作物减少氮的淋溶和风与水的侵蚀。它们改良土壤结构，增
加水的渗透，减少蒸发。相比大多数种植的作物而言，它们提供高水平的木质素，支
持菌根真菌的生长和真菌产物球囊霉素的生成，球囊霉素可促进土壤颗粒的结合。（罗
代尔，阿兹）

多样性和作物轮作

支持土壤微生物生存的关键之一就是促进其多样性。大自然的一个原则就是：一个系统越具有生物多样性，其就越健康和富有弹性。这条也适用于土壤碳的积累。（拉尔 2004）在地面下，生物多样性在食物网给每一个微生物---真菌，藻类，细菌，蚯蚓，白蚁，蚂蚁，线虫，粪甲虫等都安排了合适的位置。在地面上，单一种植会招来虫病害，而作物多样性会保护作物免收虫害的繁衍和传播。这对作物和覆盖植物都适用，包括许多不同种类的植物---阔叶的和草，豆科的和非豆科的，凉爽天气的和温暖天气的，湿润的和干燥的。无论何种条件，总有一些可以茁壮成长和进行光合作用。“覆盖作物混合物”，即多种覆盖作物种子的混合，现在已供购买来保证生物多样性。

作物轮作有利于生物的多样性。不间断的覆盖作物轮作减少了休耕期翻新土壤和增加土壤酶活性的需求。当轮作中使用豆科植物时微生物量就较大一些。（陆）

放养反刍动物是有机农场改善土壤有机质水平的常用方法。放养本身会促进草类生长而后草根又被除去，给饥饿的土壤微生物提供碳。放牧和多年生系统，如果管理适当，可以迅速增加有机质。动物粪便是小型混合农场最具价值的产品之一，富含碳和多种微生物，给土壤注入生物多样性。

不使用化学品

使用合成农业化学品会对土壤碳造成毁灭性破坏。毒物如杀虫剂对土壤生物体的影响是致命的，而土壤生物体在提高植物活力和增强光合作用上起着重要作用。据发现化肥可耗尽土壤的有机质。在罗代尔研究所的堆肥效用试验，使用堆肥和作物轮作长达十年可获得高达每年每英亩 1.0 吨的碳。但是，如果使用合成肥料，也不轮作，每年每英亩损失 0.15 吨的碳。（拉萨里）

伊利诺斯大学的莫罗样田是历史上历时最久的进行农田试验的地方。研究者分析了样田数据，50 年间每英亩共添加 90 到 124 吨的碳残留，但同时使用合成氮肥。而实际上这些样田在试验期间每英亩几乎损失了 5 吨的土壤有机质。（可涵）

化肥对土壤碳的负面效用的一个可能原因是，化肥使植物的根茎变小，扎根变浅，因为化肥主要集中在土壤浅表层，而不是像豆科、矿物或其它自然资源在土壤深层传送养分。（阿兹）另一个原因可能是植物吸收铵离子，这导致植物释放氢离子，引起了土壤的酸化。（赫珀力）第三种可能性就是通过化肥可免费获取氮，造成植物减少分泌液碳，因分泌液碳是为了获得微生物的氮。但是如果您一直在使用合成氮肥，比较明智的办法是用三到四年慢慢减少氮肥的使用，让固氮细菌在您的土壤中渐渐积累。骤然停止氮肥在第一年可能会收成不佳。（琼斯 SOS）

放牧

先前我们提到适当的放牧是重建土壤碳的一个非常有效的农用方法。最近一份研究表明，中耕作物土地转变为集约合理管理放牧，每年每英亩可积累可观的 3.24 吨的碳。这在南美无树平原种植深根系非洲草每年每英亩积累 2.87 吨的范围内。（麦科姆勒）

牧场固碳的效率部分可能来自于一些草使用 C₄ 光合化学通路，C₄ 通路比更常见的 C₃ 通路进化而来。特别地是 C₄ 通路对少水强光高温的适应性，使得 C₄ 光合作用虽然只被 3% 的开花植物使用，却负责陆地上大约 25% 到 30% 的碳的固定。（穆勒）

一些人对饲养大量的反刍动物产生顾虑，因它们在消化过程中反刍使用的细菌会释放温室气体甲烷，然后通过动物呼出。在一个生态设定里，这是没有问题的，因为甲烷氧化菌，广泛存在于不同的栖息地，且只食用甲烷，会迅速代谢甲烷。事实上，在墨西哥湾深水地平线钻井平台漏油事件以后，大约 220,000 吨的甲烷起泡冒至表面，却被爆发式大数量的甲烷氧化菌迅速消耗。只有当反刍动物远离有生物活性的土壤或水，比如说在饲养场或使用了大量化学品的土壤，动物所排放的甲烷才需要担忧。（琼斯 SOS）

森林

将退化土壤还林，也是一种提高土壤碳的方法。和其它植物一样，森林重建土壤碳的速率随气候，土壤类型，种类和营养环境而定。研究发现一般情况下森林积累碳量处于适中，或在有些情况下，丢失碳。（拉尔 2004）但是，有些研究表明合理管理木本植物带来相当大的碳储。（奎因斯丹）再者，重新造林可以从其它途径缓和气候和重建水循环。

生物碳

近来生物碳残留的利用潜能引来诸多关注，利用生物碳在重建土壤碳的同时可增加土壤肥力。提到亚马逊黑土，即人为产生的富含生物碳的黑土，其生物碳可追溯至 800 多年前，支持者指出直到今天这些土壤仍有着很高的肥力。其它包含生物碳的土如软土，由草甸土衍生形成的，广泛分布于北美，乌克兰，俄罗斯，阿根廷和乌克兰，这些国家和地区的粮食产出在全球谷物产量中占重要比例。这些土壤中生物碳的形成可能是源于古时草甸上发生的大火。直到最近才开始研究这些生物碳残留的实际化学成分。它们的稳定性和肥效可能因它们以内部空间为微生物提供保护的栖息地，抑或是与生物碳的分子结构有关，生物碳拥有大阳离子的交换能力（保存植物营养所需的矿物离子）。（毛）

虽然生物碳并没有被广泛研究，但是研究者表示碳转换为生物碳的生物质可在土壤中长期固定初始 50%的碳，相比较一般的没有转换成生物碳的碳，是一种更稳定更持久的土壤碳。（邓盖特）

当然任何碳到生物碳的转换都须牵涉到一个生命周期的评估，关于碳的来源，土地使用的意义，能源的加工和应用。有一些指征，但是，与不稳定的、易分解的土壤中的有机质相比，生物碳有着额外的稳定性。（帕沃森 Powlson）

土壤碳重建的益处

在土壤中积累有机质的益处不仅限于移除大气中的二氧化碳这一项。

水

土壤碳储的增加会积累更多的团聚体，团聚体转而像海绵一样辅助土壤保持住水分，当降雨量低的时候为植物根部提供水分，而在降雨量过多的时候，吸收多余的水分。这种保持水分的能力降低了侵蚀的风险，改善作物质量和产量。有些种植者认为伴生植物或覆盖植物会耗尽所有可获得的水分或养分。相反地，事实上，支持土壤微生物之植物多样性改善了作物对养分的获取和对水分的保留。（琼斯 SOS）

有趣的是，自二十世纪三十年代以来，密西西比河最高水位的平均值和最低水位的平均值都变得更加极端---更高的洪水水位和更低的低水位。这种情况是因为水不能在土壤中渗透而导致的。如有好的渗透性，一些水会供应植物生长，一些则慢慢通过土壤流入泉水和小溪，给河流系统带来长期的基流。但是如果地被植物薄弱，土壤团聚体减少，水不能够很好地渗透。这样在洪期，水沿表面冲刷侵蚀土壤，在旱期，没有储存的水分来供给植物或维持泉水和溪流。（琼斯 SOS）

真菌优势

科学家们发现土壤中真菌与细菌的比例高对植物的产出很重要。如果有这样的高比例，你可以从一把土壤的气味得知---是否它是蘑菇味而不是酸味的。是真菌去寻找水和养分并应供给植物根部。不幸的是，大多数农业土壤都是细菌占主导地位而非真菌。但是如果避免让土壤暴露，免耕，使用多种覆盖作物，在重要休整期鼓励高密度短期放牧，土壤会逐渐变成真菌占优势的土质。

更好的作物

植物，和动物一样，进化出复杂的防御体系。它们的机理多样且聪明。有的采用视觉防御以避免被发现，比如模仿其它植物或伪装自己。有的穿上盔甲使敌人难以进攻，比如厚厚的细胞壁，蜡状外皮，或硬树皮。有的利用棘，刺或胶状分泌物来阻止掠食。很多合成二级代谢物从化学角度防御（毒物，驱虫剂，刺激物，或甚至易挥发的有机化合物来吸引植物掠食者的天敌）。(文可)植物与可抑制当地病原体的细菌形成共生关系，以此来抵御攻击。

这样的能力，和动物的免疫系统一样，在植物健康时是最强大的。当植物对阳光、养分、水、氧气、二氧化碳的需求得到充满满足时，植物的健康处于最佳状态。当然，这样的情况最佳发生在高碳储，有着多样和大量微生物的健康土壤。这些使作物有着高营养密度，抗病虫害，富含抗氧化剂和较长的保存期限。(高斯林，文可，瑞格诺德)

免受疾病和掠食的植物，养分又充足，便会茁壮成长且高产。另外，健康的植物会生物合成更多易挥发的分子与更多的代谢物使粮食作物产生香味和香气。因此，恢复土壤碳对各方皆有益处：农民获得高产，菜农收获口感更好的作物，消费者得到更健康的食品。

结论

使用生物学方法让土壤恢复有机质并保持稳定，这不仅仅利于土地和作物的管理者，对我们的社会也至关重要。我们从土壤中取走了太多的碳，燃烧它，然后把它以二氧化碳的形式释放到大气中。即使我们停止燃烧化石燃料，但已经释放了的温室气体仍会让全球气温保持上升的状态，且未来的很多年会释放更多的有害气体。

想要生存，我们别无选择，必须恢复土壤碳。令人兴奋的是，这个已经使用了百万年的方法可通过生物学实现。农民，菜农，私房屋主，庭园设计者---任何拥有或管理土地的人---都可以采用这些简单的方法，不仅仅可恢复土壤碳储，还可以帮助重建大自然赋予的此不可思议的系统以更新我们的大气，同时为所有的生命提供食物、美丽与健康。