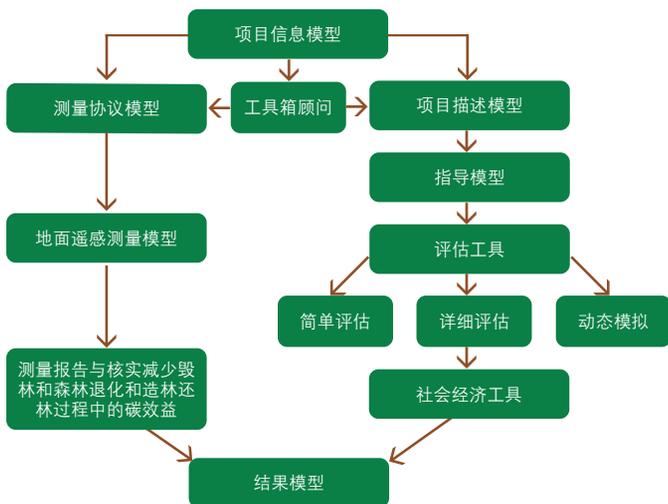


图5：市场价格对有效提升土壤碳管理措施效果的影响。资料来源：Smith 等（2007）。

为土地利用管理作出决策，以及协助土地管理者更好地进入碳交易市场（Smith 等 2007, Ravindranath 和 Ostwald 2008, Milne 等 2010, FAO 2011, Schmidt 等2011）。当适合的测量手段和激励机制都齐全，市场价格会在很大程度上影响土壤碳管理措施的有效性，以提高土壤碳含量（图5）。碳效益项目正在研发一种工具，旨在评估碳效益，同时监测土地管理干预的成效（专栏4）。



图六：在线碳效益项目工具概念图。资料来源：CBP（2012）

## 人类活动导致土壤碳储量的脆弱性

土壤碳存量极易受人类活动影响变得异常脆弱。由于土地覆盖和利用的变化(例如森林砍伐、城市开发和农耕地的增加)，土壤碳存量显著降低（通常很迅速），从而导致了农业和林业的不可持续发展。然而，通过植树造林和其他能够减少土壤有机质分解的过程（诸如：少耕，常年牧地，规划保护区），土壤有机碳含量有可能会增加（虽然速度较慢）。添加更多的土壤有机物质，诸如堆肥或施加粪肥，也许只改善了某一点的碳平衡，却削弱了其他点的碳平衡。预计气候变化对土壤碳的动态有显著影响（Schils 等 2008, Conant 等2011）。大气中的二氧化碳浓度不断上升，会导致更多的生物量生成，增加土壤有机质的投入。然而，温度的升高，会导致微生物的加速分解和土壤有机质的氧化，从而降低土壤有机碳的含量，尤其在冻土退融区。专家们担心，如果冻土退融，大量的碳或许会释放到空气中，加剧全球变暖（Schuur和Abbott, 2011）。虽然该影响的强度还难以确定，但最新评估指出冻土层的碳含量是非常巨大的。一些科学家证实，18 800 000平方公里的北部土壤中，约含有17 000亿吨的有机碳（Tarnocai 等2009）。

然而，关于土壤特性与气候条件是如何影响土壤碳存量和碳通量的，目前的科学知识尚且不足，并存在争议（Tuomi等 2008, Conant 等 2011, Falloon 等2011）。为确保能够更准



冻土的融化，可能将导致大量的碳排放 来自：Hans Joosten

确地预测气候变化对土壤、土壤碳、以及与地方管理和国家碳库存相关的生态系统服务所产生的影响，我们还需要进行更深入的研究。

目前，土壤有机碳的变化率，主要来自全球土地的集约型利用，以及用于粮食和纤维作物生产的新土地开发。现代工业化的农作物生产依附于高效经济作物的单一种植，而这通常会产负碳预算。同时，农作物残渣被用作饲料，燃料和工业用料，也会使土壤中碳返还量减少的趋势加剧。此外，农作物的种类也是一个因素。例如，最近广为流行的单一种植大豆，其结果却加速了土壤有机碳的流失。由于该类种植产生的农作物残渣较少，不足以保护土壤免受风和水的侵蚀，从而导致土壤有机碳极不稳定并迅速氧化成二氧化碳。不同于只消耗部分生物量的传统畜牧业，集约化的畜牧生产系统几乎利用所有的植物生物量，这减少了土壤有机碳的储

存。尽管全球大部分耕地的碳排放量还维持在较低水平，但大面积的集约化生产，将导致土壤中有机碳含量的减少。因此，从全球范围来说，可以认为实行集约化农业生产的土壤，是大气中二氧化碳和其他温室气体的主要来源（Janzen 2006, Powlson 等 2011）。

集约化土地利用也正在向土壤有机碳含量较少的土地和非农耕地地区扩张，例如半干旱热带草原，热带雨林和泥炭地，这些土地正在被快速地转变成耕地。经过60年的耕种，地处温带的湿润大草原土壤有机碳含量损失了大约30%（Tiessen 和 Stewart 1983），而在半干旱区域，若原生植被或牧场被转变为农田，那么，不到5年的时间，土壤碳含量将会减少30%（Zach 等 2006, Noellemeyer 等2008）。而在清除的亚马逊雨林上修建牧场，则每公顷土地将释放8至12吨的碳（Fearnside 和 Barbosa 1998, Cerri等 2007）。短短

#### 专栏5：湿地种植：泥炭地的可持续种植



波兰别布扎泥炭地生物量收割

湿地种植（Paludiculture, palus 是拉丁语沼泽湿地的意思），是指在湿润型泥炭地或回潮型泥炭地上进行的生物种植（Wichtmann 等 2010），它为传统泥炭地的农业和林业种植的替代提供了创新性选择。湿地种植对气候变化的减缓作用主要体现在两个方面：一方面，通过对干旱泥炭地的

回潮减少温室气体的排放；另一方面，通过使用可再生生物燃料减少化石燃料的使用。

由于退化严重的泥炭地将变成生态沙漠，因此，回潮泥炭地通常有利于生物多样性的保护。在干涸或回潮的泥炭地上进行有规律的生物生产，可以保持植被矮短，降低营养水平，使得竞争力较弱的本土物种重新生长。如水莺，一种只能在收割后的湿地上生存的沼泽重要物种（Tanneberger 等 2009）。

湿地种植为泥炭地变成种植地提供了可持续发展的前景。尽管需要特殊的湿地适应性生长机制，但是，来自德国东北部湿地种植的冬季收割型芦苇，足以和矿物土壤上生长的芒草或稻草媲美。



干旱泥炭地上的农业，如印度尼西亚加里曼丹中部，导致大量碳流失。来源：Hans Joosten

几年内，热带雨林的土壤耕种所造成的土壤有机碳流失超过60%(Brown 和 Lugo 1990)。

热带泥炭地转变为农田或者种植园是碳排放的又一个热点（表5）。在热带区域，由于商业生产体系的引入，导致每年每公顷泥炭土碳的持续损失量高达25吨(Jauhainen 等2011)，而在以北的农田泥炭地的碳排放量大约在每年每公顷7吨左右(Couwenberg 2011)。

## 土壤碳流失的后果和土壤碳获取的潜力

随着土壤碳氧化速度的加快，土壤碳流失不仅会导致大气中的二氧化碳含量增加，还致使土壤功能和土壤生物多样性丧失。土壤有机物的减少，导致土壤颗粒之间的内聚力降低，即增加了土壤受水蚀或风蚀的可能性，同时加速了土壤的大面积减少，并改变土壤养分和水循环系统。土壤结构的退化，降低了土壤的锁水量和土壤排水的渗透性。由此，会导致大面积的滑坡，进而加剧洪水泛滥，同时减少了降雨过程中的地下水的补给量。地下水补给量的减少则会加剧水资源短缺，使得旱情进一步恶化。土壤碳流失的另一个后果是土壤养分的流失，既包括土壤有机物中的营养元素，也包括诸如矿物表面的磷、钾等无机营养元素。由于土壤有机物在聚合物的形成中有着重要作用，所以土壤有机物的流失会降低土壤的内聚力，并导致这些聚合物分解

(Malamoud 等 2009)。通过土壤侵蚀，或者水渗透土壤剖面进行的胶体运输，从而增加了矿物粘土和其他矿物质流失的潜在可能性。

鉴于土壤碳的诸多好处，我们应当首先保持土壤中有机碳含量的稳定，并在可能的情况下，提高碳含量水平。土壤碳可以通过两种方式获取，一是运用管理策略（闲置土地，在经济和社会条件允许情况下）和技术，以减少现有土壤碳的损失（这对旱地土壤、天然草地和热带草原尤其重要）；二是通过实施可持续发展管理技术，提高土壤碳含量，尤其对于已退化了的耕种土壤。（表6）

通过减少土壤碳在土壤中的氧化和土壤迁移（比如将泥炭块移除用作燃料或园艺业，或因施工移土）可以降低土壤碳含量的损失。矿物土是大部分种植区内十分典型的土壤类型，在这种情况下，减少耕作可以将土壤碳的流失降至最小。此外，可以通过使用防护林带，等高种植和种植作物等方法来控制侵蚀程度，从而保护土壤表面的碳含量。对于碳密度本身就很高的泥炭土的保存，可以通过保持泥土湿润状态来实现，而不能为了适应林业或者种植业，比如油棕榈种植，而采取排干泥炭地的方式。在已经退化了的泥炭土中，采用截断排水的方法可以提高土壤含水量，从而防止土壤进一步氧化，同时也有助于维持和恢复碳含量(Tanneberger 和 Wichtmann 2011)。然而，我们应当注意不要浸没易分解的有机物，比如新鲜的作物废渣，因为该环境会导致厌氧分解，从而产生大量的甲烷，而甲烷则是另外一种导致温室效应的气体（Couwenberg 等 2011）。

另一方面，提高土壤碳含量，也可以通过向土壤施加碳的方式实现。在土壤管理过程中，借助增加和保留地面生物质的办法可以提高土壤含碳量。植物可以通过根的作用分配地下相当一部分的碳。这使得根区的土壤生物得以生存，由此，土壤生物又促进植物养分吸收，增加作物产量，也进一步增加土壤的碳含量。因此，旨在增加土壤碳含量的可持续土地管理建立基于以下几点：优化作物生产率（作物选择，适当的土壤养分管理，灌溉）、尽量减少土壤有机物流失（减少耕作，控制侵蚀，种植农作物）以及让更多的碳回归土壤（保留收割后的作物残渣或者加入诸如动物粪便、生物碳和生活及工业废渣有机物，在充分考虑使用这些物质的潜在威胁以后）。

## 专栏6：三个主要土地利用系统中保持和增加碳储量的策略

碳储量的增加可以通过确保土壤中的碳含量收大于支的方法实现。为了达到这一目标，我们需根据土地利用情况，土壤特性，气候条件和土地面积的情况采取不同的策略。

### 草原

草原上土壤碳含量的增加可能会减少8.1亿吨全球二氧化碳温室气体的排放（到2030年），几乎所有这些二氧化碳将固存于土壤中（Conant 等 2001, Ravindranath 和 Ostwald 2008）。过度放牧食草动物会导致草原的退化，加剧水土流失，在降低土壤碳含量的同时增加温室气体排放。因此，我们需要避免此类情况发生。提高草原土壤有机碳含量可以采取以下措施：

- 增加有机物质。添加粪肥和化肥对土壤有机碳水平有直接的影响；提高作物生产率和促进土壤多样性对其也有间接影响（比如利用蚯蚓帮助降解和混合有机物质）。但是肥料的使用会产生一氧化二氮。
- 植被修复，尤其是使用改良牧草和豆科植物来可以提高生产效率，产生更多的作物废渣和地下生物物质，这些都可以增加土壤碳储量。
- 灌溉和水资源管理以提高农作物生产力，也能增加土壤有机物含量。然而，农作物生产力和土壤有机物含量的提高不应该以增加温室气体排放为代价，应该防止土壤营养元素滤出影响水质，避免盐分沉积对土壤肥力产生不利影响。

### 耕地

农业部门增加土壤碳含量的技术包括（Altieri 1995）：

- 地面覆盖增加有机物。如果利用农作物废渣覆盖，则可以防止碳的流失。然而，在淹水土壤中，地面覆盖会导致甲烷排放量的增加。
- 减少或停止耕种可以避免有机物的加速分解，也可避免因

密集耕作（犁耕）而消耗土壤中的碳。减少耕作还可以防止保护碳含量的土壤块碎裂分解。

- 正确使用动物粪肥或者化学肥料可以提高农作物的生产力，然而过度增加营养元素也会导致土壤碳含量的减少，因为会有很多温室气体排放出来。所有的肥料添加，都将温室气体带来的后果考虑在内，也要将因农作物产量增加而产生的运输费用计算在内。这些代价和费用可能会与贫瘠土地的生产要求和将作物从农场运输到市场的运输要求相抵消。
- 经济作物和常年牧场的转换，以及（在一定气候条件和耕作系统下）使用种植作物和绿色肥料，增加生物物质的量，让这些生物物质回归土壤，从而增加土壤碳含量。
- 利用改善了的作物品种可以提高地下和地面的生产力，也可以增加作物残渣，从而增加土壤碳含量。
- 特定土地的农业管理可以减少作物欠收的风险，从而提高整个地区的生产力，提高碳含量。
- 在同一农田中种植多种作物可以同时提高土壤里的有机质，增强土壤多样性，使土壤更“健康”，也可以为自给自足的农民带来粮食的增产。

### 林地和树作物

森林在减少大气中温室气体的排放方面有相当的潜力，它们可以储存大量来自地下或地表的碳。实现这一潜能的措施有：

- 保护现有的森林可以使土壤碳储量维持现有水平。
- 退耕还林以及在退化的林地中植树造林可以提高生物质的密度，从而增加地表和地下的碳密度。
- 耕地的树木（农业林）和果园可以保存地表和地下的碳储量，如果这些可再生木材生长后用来燃烧，同时也可以减少矿物燃料的排放。



尼日尔的粟米地和粟米仓，来源：Curt Reynolds



美国北卡罗纳州：农耕地中，水文系统和植物群体的重建和修复可使净土壤碳封存。来源：J.L.Heitman

无论在什么情况下，增加土壤碳含量的举措能否成功都依赖于土壤的特性（如矿物成分，含泥量），当地土壤的形成条件（如气候，坡度），也有赖于土壤利用的性质和土地管理。要确保土壤碳含量净变化量的真实性，重点需放在对土壤碳含量和温室气体排放量的深度评估上。同时，在描绘不同土壤的碳含量蓄存能力方面也需要进行大量的研究，以便更好地致力于管理实务，即将当前作为基准的土壤碳储量和在管理之后发生潜在变化的碳储量做比较。

## 前进的道路：管理土壤碳的多重效益

**世**界上土地利用正在经历着前所未有的飞速变化，这是由人们为了生活而不断上涨的对食物，水，能源和空间的需求而带动的（Verburg 等2011）。从历史上看，通过把自然和半自然栖息地转变为农田以培育含有大量碳储量的肥沃土地，人们对于食物和纤维的需求已经得到满足。而未来，随着需求的增长，由于能够转换成农业地的土地越来越少，人民需增加种植密度（Bruinsma 2003）。由此可见，土地转化对土壤碳储量影响巨大（Smith 等 2010）。

如果目前的趋势继续持续下去，在今后的几年内，大量的土壤碳将面临迅速流失的风险，这不仅加剧气候变化，也加速了全球土壤的退化和重要生态系统的衰弱。土壤碳进一步流失所导致的后果可能要在几十年之后才体现出来，但到那个

时候，要解决这些问题会更加困难，代价也更大。

由于土地利用方式的变化和不可持续的管理模式，土壤碳流失迅速，然而，要重新补足碳储量的过程十分缓慢，并且需要大量的投入。目前，我们就应当积极采取行动，通过保护土壤碳储量和促进提高土壤碳含量的可持续性办法来避免土壤碳流失。综合考虑社会，经济和环境的成本与收益，有助于人们更好地理解当地乃至全球土地使用和管理方式的变化，掌握土壤碳含量的变化趋势。

世界各地都有提高土壤碳含量以及避免其损失的机遇。挑战在于，我们是否能够制定和实施计划、政策和激励机制，来平衡土壤因为这些措施与其他利益问题的冲突（如人们对粮食，纤维，燃料，气候调节，水，生物多样性保护，生存空间等的需求）而可能面临的压力。在一些地方，需要有效的机制来保护那些对土壤碳储量至关重要的土地，例如泥炭地和苔原地，这些土地可以作为替代地用来耕种或者进行林地扩张。然而，在许多情况下，经济，社会和环境效益也可以通过有效地土壤有机碳管理同时实现。

通过有效的土壤碳管理获得多重效益的例子在全世界有很多（UNEP-WCMC 2008, Marks等 2009, Kapos 等 2010, Reed 等 2010, Watson 2010）。例如，世界银行生物碳基金会向肯尼亚农业碳项目资助了35万美元，帮助小型农业主提高他们的农业活动，这样可以增强食品安全，并且提高碳固存（World Bank 2010）。与此相似，绿色长城计划是一项大规模的植树造林工程，旨在创建一个15公里宽的树木和植物带，该绿色带贯穿从塞内加尔到吉布提的非洲大陆7000公里（Bellefontaine 等 201）。该项目的目标包括碳固存，保持土壤稳定和土壤水分，为农业提供支持。在中国，类似的方法还在监测考证中，以评估是否能可持续地扭转干旱地区的土地退化局面（Bai 和 Dent 2009）。

经过证明的技术和管理方法可用于保护和提高土壤碳含量，但是是否能够得到广泛的应用则取决于政策和激励措施。目前，有关部门很少考虑土壤有机碳（以及所有土壤）的价



土壤政策的实施能够带来经济、社会和环境等多方面综合效益。

来源：Clean Seed Capital

值。土壤有机碳的利益只在特定土地用途的需求上反映出来，比如粮食生产的需求。世界一些地方已经制定出土地管理战略和政策用以平衡生产压力和其他社会目标，比如增强生物多样性和改善水质。

优化土壤管理能够实现多赢，有效提高生态系统的服务功能，然而目前却还没有一项政策是专门为此而设计的。例如，对农业生产推行有机肥的使用不仅能够增加土壤肥力，同时也能减少水土流失，实现土壤碳封存，增加农业系统的恢复力。

目前，我们正有一个绝佳的机会利用现有的机制，以单独或者联合的形式，积极鼓励土壤碳管理政策，从而扩大潜在的受益范围。然而，目前还没有适应这一机制的战略，因此现在正是一个制定新战略的绝好时机，可以把土壤碳管理的多重利益考虑进来。我们相信，全球通力合作，推动政策革新，通过土壤碳收益将收获更多的回报。（专栏7）。

这些全球性的协议和政策最终可以通过许多方式连接起来，以鼓励通过土壤碳来获得多重效益。2011年9月，联合国粮食和农业组织和联合国其他机构，包括联合国环境规划署，开始规划建立一个全球性土壤伙伴计划，来支持和共同促进全球应对粮食安全和适应及减缓气候变化而进行的土壤资源可持续管理的努力。关于现存土地的利用和退化土地的恢

### 专栏7：为获得土壤碳效益的全球性政策

- 为了降低全球气候变暖的强度，（如联合国气候变化公约）我们可以通过抑制苔原地有机土壤中有机碳的快速流失来间接减少土壤碳的流失，避免在气候条件不允许的地区进行密集型农业的扩张，比如山区；同时提高农业土壤中的有机碳含量。
- 为解决土地退化问题而采取的措施（比如根据联合国公约防治沙漠化）能够减少碳损失。这些措施包括：鼓励土壤保护，阻止水土流失；提高相关区域碳储量，以及采取措施加快土壤有机物的恢复等。
- 贸易政策（例如依靠世界贸易组织）可以从不断增加的土壤碳含量中获得市场效益（通过可持续的碳友好生产系统提供更有利的价格），同时还有助于打击将脆弱土地开垦加以利用或进行作物种植而导致土壤碳流失的不良现象（比如对来自干旱泥炭地或热带雨林转换地的市场产品的调控）。
- 全球协定能够将可交易的碳或其他有关土壤的项目（比如绿色水资源）作为土地资源管理机制纳入其中，以获取环境、社会和经济的共同利益(Tanneberger 和 Wichtmann 2011)。土壤有机碳管理策略的广泛采用，将会受到土壤有机碳的稳定性和市场价格的影响，也会受到金融机制和激励机制以及当地如土地所有权等问题的影响。碳信用额只有在土壤有机碳固存被充分监测和评估的前提下，在充分兼顾长期的社会环境影响和短期的经济效益的基础上才会有效。
- 保护政策的目的是为了阻止生物多样性的丧失，保护生态系统，同时也保护土壤有机碳储量（例如泥炭地回潮和地表植被恢复等）(Bain 等 2011)。生物多样性公约和国际湿地公约（拉姆塞尔公约）着重保护特定区域，世界遗产公约名下有一种用于保护世界土壤的国际机制，它的实施将加强对土壤资源，包括土壤碳的保护和管理。