토양 탄소 회복:

생물학은 효과가 있는가?

저자 Jack Kittredge,

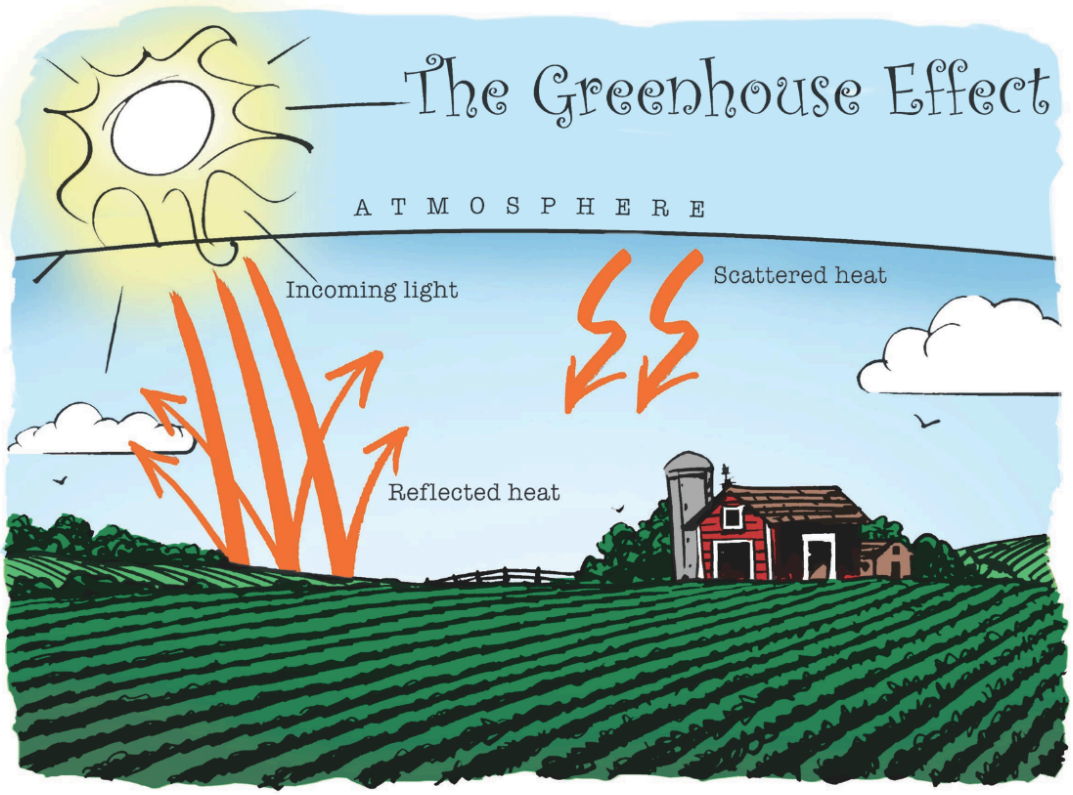
NOFA/Mass 정책 실장,

www.nofamass.org

Northeast Organic Farming Association/Massachusetts Chapter, Inc.

2015 년 8 월 4 일

번역 제공: Regeneration International
지구를 식히자. 세계에 식량을 공급하자.
더 자세한 정보는 다음 사이트를 방문해주십시오.
www.regenerationinternational.org/international-translations/



소개

최근 과학 및 정부 집단에서 온실가스 배출과 이로 인해 야기되는 극단적인 계절 현상을 어떻게 대처할 것인지에 대한 집중적인 토론이 이루어지고 있습니다. 많은 분석가들은 대기 중 탄소가 더 증가하지 않도록 우리가 화석 연료 사용을 반드시 중지해야 한다고 믿습니다. 또한, 우리가 더 많은 극단적인 계절 현상 및 이러한 현상이 가져오는 사회적 갈등, 경제적 단절과 연계된 인류의 비극을 줄이길 원한다면, 이미 공기 중에 존재하는 이산화탄소를 제거해야 한다고 주장합니다.

하지만, 공기에서 제거된 탄소를 어디에 둘 수 있을까요? 단 한 가지의 실용적인 접근이 있습니다. 탄소가 원래 속해있던 곳인 토양으로 돌려보내는 것입니다. 다행히도 이 방식에는 많은 비용이 수반되지 않지만 시작하기에 앞서 이 방식에 동의하는 많은 사람들이 필요합니다. 정당한 이유가 없다면 하고 있는 일에 변화를 가져오려는 사람은 거의 없습니다. 그렇기에 이 짧은 보고서를 작성하게 되었습니다. 이 보고서로 인해 이산화탄소 축적과 기후 변화의 문제점, 대기 중 탄소가 제거되는 방법 및 토양으로 되돌릴 수 있는 방법을 설명해드리고자 합니다. 또한, 탄소가 풍부한 토지 속에서 농부와 소비자들에게 돌아가는 장점에 대해서도 알려드리고 싶습니다.

기후 변화

기상 이변을 서류로 기록한다는 것은 매우 어렵습니다. 기록을 위해선 오랜 시간 축적된 좋은 데이터와 이변을 판단할 수 있도록 명확히 정립된 기준이 필요합니다. 하지만 최근, 보다 많은 사람들이 기상 이변에 관심을 가지면서 데이터와 기준이 지속적으로 발전해왔습니다. 기상 이변의 핵심 요인은 매우 높은 열, 강수량과 대기 습도입니다. 최근 연구에 의해 지난 50년~150년 동안 월 평균 온도, 이상 강우 현상 및 평균 대기 습도가 모두 상승되었음이 나타났습니다. (Coumou)

대부분의 과학자들은 예측하기 어려운 이변의 원인은 온실가스(GHC)가 인간 활동으로부터 유래된, 즉 “인위적으로” 대기에 축적되기 때문이라고 믿습니다. 기상 이변 현상에 대해 엄격한 표본 연구와 분석을 통해 인간으로부터 야기된 기후 변화가 많은 이상 현상에 기여하고 있다는 사실이 발견되었습니다. (Peterson) 미국 과학진흥협회는 "확실한 증거에 의하면 기후학자의 약 97%가 인간에 의해 초래된 기후 변화가 이미 발생하고 있다는 결론을 내렸다"고 밝혔습니다. (AAAS)

온실가스가 어떻게 기후 변화를 초래하는가

주요 성분인 이산화탄소 뿐 아니라 메탄, 오존과 이산화질소로 구성된 온실가스는 수백 년 동안 토양과 물에서 대기로 동물 호흡, 늪지대의 기체 방출 및 질소고정박테리아의 배출 등 자연적인 과정을 거쳐 대기로 내뿜어졌었습니다.(EPA) 이러한 가스는 자연적인 과정을 통해 원천지로 돌아갑니다. 균형을 유지할 수 있을 정도의 온실가스 양이 발생되어 원천지로 돌아가는 한, 온실가스로 인한 기후 변화는 발생하지 않습니다.

대기 중 일정한 수준의 온실가스가 필요합니다. 온실가스는 지구에서 태양 복사열을 우주로 덜 반사시키도록 태양 복사열을 흡수합니다. 이로 인해 높아진 온도는 날씨를 형성하는 행성의 힘을 촉진시킵니다. 이러한 가스가 없다면 지구는 1년 내내 얼어붙어 사람이 살 수 없을 정도로 매우 추운 날씨를 지니게 될 것입니다. 대기 중 가스의 수준은 “백만분율(ppm)”로 측정됩니다. 대기 주요 가스인 질소, 산소와 아르곤은 통합 999,000 ppm으로 측정될 수 있습니다. 인류 역사를 통틀어 이산화탄소의 대기 레벨은 약 280 ppm 또는 0.03% 이하로 유지되고 있습니다.

인간의 개입

하지만, 12,000년 전 농경이 막 시작되었을 때 인류는 벌채, 개간과 기경으로 많은 양의 이산화탄소를 생산했습니다. 매우 깊은 얼음 핵 분석 및 기술을 통해 과학자들은 실제

대기 중 이산화탄소와 메탄의 가장 먼저 급격하게 상승했던 시점이 수천 년 전 메소포타미아와 중국에 농경 산업이 확대된 시점과 상응된다는 점을 찾아냈습니다. (Amundson)

이보다 더 근대인 1750년경부터 화석 연료 연소 및 비교적 최근 농업의 공업화가 빠르게 진행되어 인적 요인으로 야기된 온실가스(GHC) 요인의 규모와 수가 급격하게 증가했습니다. 이제 되돌아가는 가스의 양보다 발생하는 가스의 양이 많아지며 대기 중 이산화탄소 레벨은 지속적으로 높아져 현재 400 ppm에 이르게 되었습니다.

문제 범위

(숫자를 좋아하시는 분들께 선사합니다!)

알림: 이 분야의 계산은 모두 미터법을 사용했습니다. 미터법으로 1톤은 1000kg 또는 2204.6lbs입니다. 1기가톤(Gt)은 10억톤이며 1 헥타르는 10,000㎡ 또는 2.47에이커입니다.

과학자들은 비극적인 기온 변화를 저지하기 위해선 대기 중 이산화탄소 레벨을 350ppm 정도까지 낮춰야 할 필요가 있다고 예측합니다. (NASA) (많은 연구원들은 더 안전한 수치는 산업화 전 레벨인 275~280ppm으로 추정하나 여러 대중 토론에서는 350 ppm으로 결정짓습니다.) 대기 중 1ppm의 이산화탄소는 7.8Gt의 이산화탄소와 동일합니다. 이산화탄소 분자는 대부분 산소로 구성되어 있으며 탄소는 분자에서 매우 작은 양인 1/4정도, 더 정확하게는 27.3%만을 차지합니다. 따라서 대기 중 이산화탄소 레벨 1ppm은 2.125Gt의 탄소를 지니고 있음을 알 수 있습니다(이해를 돕자면 이는 대략적으로 고체 흑연 1입방 킬로미터의 크기입니다).

따라서 우리는 350ppm 레벨 또는 그 이하의 이산화탄소와 공생해야 합니다. 하지만, 이미 레벨은 400ppm를 초과하고 있습니다. 우리는 무엇을 할 수 있을까요?

배출량을 감소시킬 수 있다고 가정해볼까요?

인류 전체가 과도한 온실가스 양의 배출을 멈춰야 한다는 것은 확실합니다. 배출량의 약 2/3가 화석 연료 연소에서 나온다고 추정됩니다. (Ontl) 우리는 화석 연료 의존도를 줄이고 대체 에너지를 개발할 필요가 있습니다. 이 사실은 정부도 익히 알고 있는 사실입니다. 국제단체들이 대체 에너지 개발을 위해 설립되고 있습니다. 아마 인류 역사상 가장 힘든 변화 중 하나일지도 모르지만 우리가 생존하기 위해선 에너지를 개발할 수 있는 정책과 메커니즘을 발견해야 합니다. 하지만 우리 문제는 이 뿐만이 아닙니다.

바로 내일 모든 가스 배출을 중단할 수 있다고 가정해볼까요? 이미 우리가 대기 중으로 내보낸 GHG가 수십 년 동안, 그리고 아마도 수세기 동안 지속적으로 지구에 열을 가할 것입니다. 그 열기는 얼음과 얼어붙은 토양을 녹이며 결과적으로 해수면이 상승하고 얼어붙은 많은 양의 온실가스가 방출시킬 것입니다.

예를 들면, 이는 북극에서 잠재적인 문제가 될 수 있습니다. GHG가 될 가능성을 지닌 많은 양의 얼어붙은 메탄은 녹아서 대기 중으로 배출될 수 있습니다. 또한, 대단히 많은 양의 탄소도 영구 동토층에 얼어있는 상태입니다. 환경의 기온이 올라가면 얼어붙은 탄소를 노출시킬 수 있으며 결국 노출된 탄소는 미생물에 의해 소화되고 이산화탄소로 내보내질 것입니다. 만약 이러한 소화 과정이 산소가 없는 늪지대나 습지에서 발생한다면, 다른 미생물로 인해 탄소는 메탄으로 방출됩니다. (NSIDC)

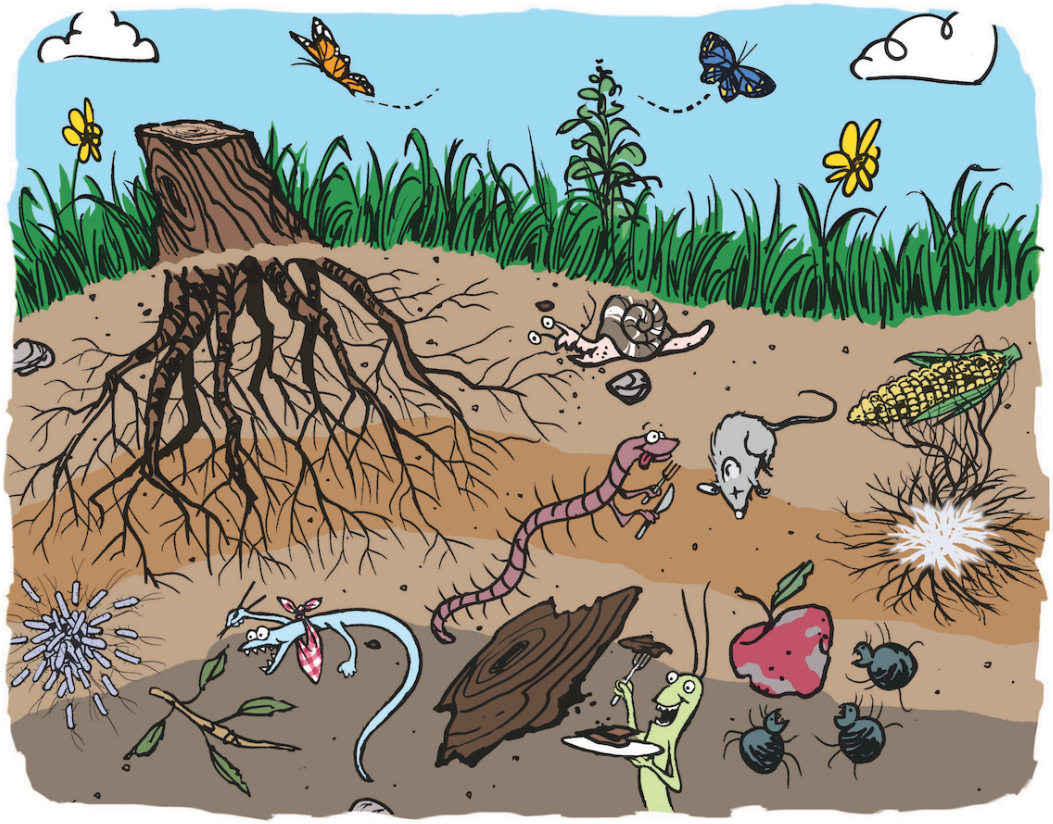
그렇기 때문에 배출량을 낮추는 것만으로는 충분하지 않습니다. 이와 동시에 지구 온도가 상승하는 것도 반드시 막아야만 합니다. 현재 대략적으로 400ppm의 이산화탄소가 있으며 가능한 빨리 수치를 350ppm으로 낮추기를 원한다면, 대기 중에서 탄소를 추출하여 어딘가에 묻어야 합니다. 106.25Gt와 동등한 양의 50ppm의 탄소를 장기간 수용할 수 있는 집을 찾아야만 합니다. 가능한 일일까요?

그 모든 탄소를 어디에 둘 수 있을까요?

대기 중 이산화탄소를 70%가 물로 덮인 행성에는 안전하게 보관할 수 없습니다. 이산화탄소는 물에 용해되며 탄산을 형성합니다. 우리는 수십 년 동안 점차적으로 증가한 탄소의 양이 바다에 미친 영향을 확인했습니다. 바다의 pH농도는 계속 하락해왔으며 산성화로 인해 많은 불가사리, 해초와 플랑크톤을 포함하여 여러 해양 생태계가 파괴되고 있습니다. (NOAA)

하지만, 탄소를 토양에 보관하는 것은 조금 다릅니다. 탄소의 원천지이며 탄소가 필요한 곳이 바로 토양이기 때문입니다. 산업혁명으로 이뤄진 농지 개간 및 농업을 위한 경작으로 전 세계의 토양으로부터 136Gt의 탄소가 배출되었습니다. (Lal 2004) 그렇다면 농지 개간 및 경작을 통해 토양은 우리가 되돌리려는 탄소의 양보다 더 많은 양을 잃은 셈입니다. 토양에 여전히 존재하는 탄소의 양은 얼마일까요? 정말 어마어마한 양이 있습니다. 과학자들은 지구 토양의 상위 30cm(약 1피트)에는 대략적으로 700 Gt의 탄소가 포함되어 있다고 추정합니다. 만약 상위 토양 전체(3피트 이상)를 측정한다면, 수치는 두 배 이상인 약 1500Gt가 될 것입니다. (Powlson) 명확하게 얘기하면, 이러한 탄소를 모두 보유했던 토양은 탄소를 물론 다시 저장할 수도 있습니다.

하지만 토양에 106.24Gt의 탄소를 보관하는데 수반되는 질문들에 답하기 전, 토양에 대해 조금 더 알아보도록 합시다.



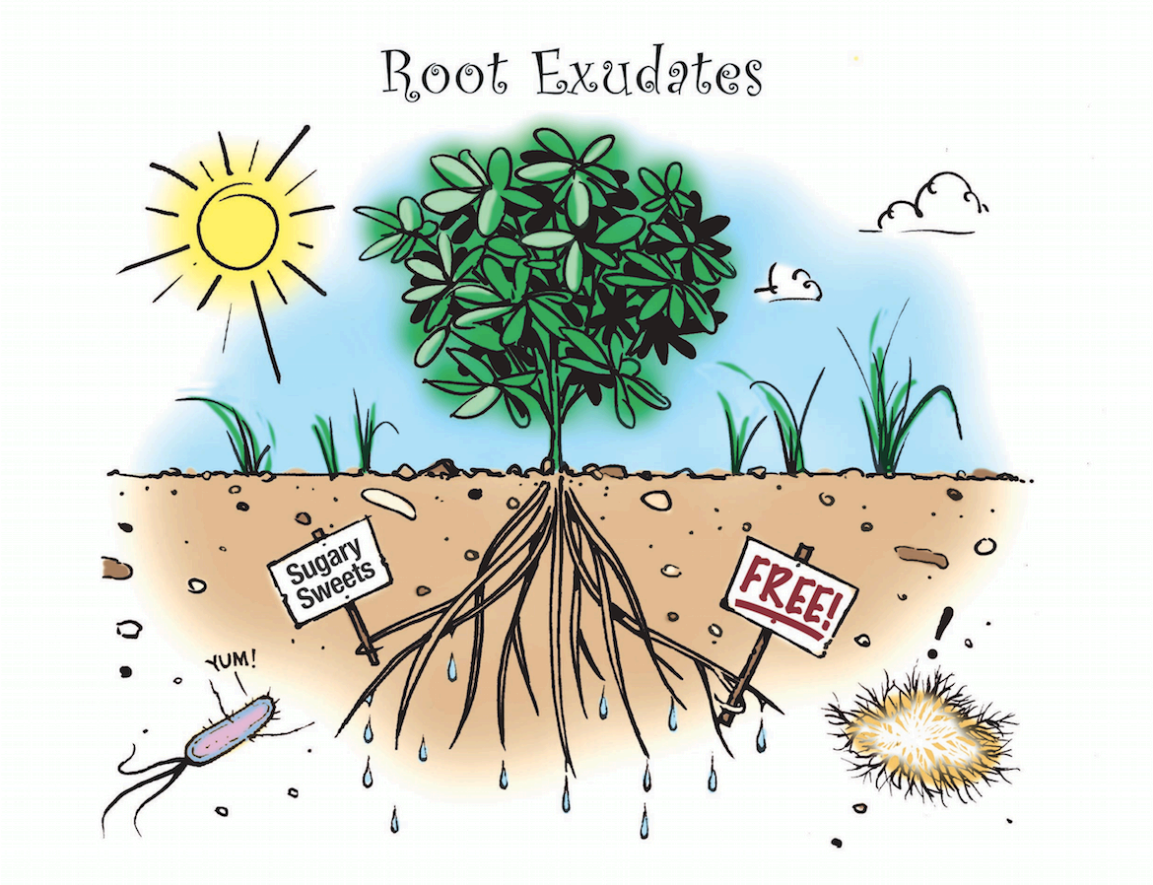
토양의 탄소 부족

토양은 말 그대로 살아있는 존재입니다. 토양에는 박테리아, 균계, 조류, 원생동물, 선충류 등 다양한 생물들이 가득합니다. 건강한 흙 한 티스푼에는 지구상에 존재하는 사람들보다도 더 많은 미생물이 있습니다. (Hoorman) 물론, 탄소를 기반으로 하는 생명체의 형식으로써 이 바글바글한 커뮤니티는 살아남기 위해 지속적인 유기물의 공급을 필요로 합니다. 약 58%가 탄소인 유기물은 자신들의 삼출물인 살아있는 유기체의 형식으로 나타나게 됩니다. 단당 및 그들의 잔여물, 또는 셀룰로오스와 같은 탄수화물처럼 말이죠. 이러한 화합물들은 에너지가 풍부하고 쉽게 유기체에 접근하여 토양 미생물들에 의해 빠르게 흡수됩니다. 예를 들어 단당은 소비되기 전 인생의 반을 토양 표면에서 보내게 되며 이는 1시간이 채 걸리지 않습니다. (Dungait)

토양 생물들이 지닌 엄청난 탄소 식욕은 건강한 토양이라면 이용 가능한 유기물을 빠르게 소비한다는 것을 의미합니다. 물질은 토양의 몸체로 흡수되거나 에너지로 소비되고 이산화탄소가 발생됩니다. 아이오와 옥수수 1에이커에 존재하는 미생물이 배출하는 이산화탄소의 양은 건장한 25명의 남성이 일할 때 내뿜는 이산화탄소의 양보다 훨씬 많습니다. (Albrecht) 이러한 미생물이 죽게 되면, 그들의 몸에 있던 탄소는

다른 유기체에 의해 분해되고 배출됩니다.

이러한 토양 생물들의 활동은 주기별 및 계절별로 이루어집니다. 모든 토양 생물들이 동시에 활동하지는 않습니다. 어느 순간이든 한 시점에서 대부분은 거의 활동하지 않거나 심지어 휴면기에 들어갑니다. 이용할 수 있는 음식은 토양 생물들의 수와 활동 수준에 영향을 미치는 매우 중요한 요소입니다. (FAO)



광합성

하지만 탄소가 토양으로 매우 빠르게 소비 된다면, 왜 탄소는 신속하게 사라지지는 않을까요?

이에 대한 답은 식물들은 지속적으로 공급을 재생하기 때문입니다. 35억 년 전에 진화를 시작한 이래로 식물들은 공기 중에서 탄소를 빼내어 유기물에 흡수될 수 있도록 그들의 놀라운 힘을 사용하여 생존해왔습니다. 물론 이 과정은 광합성으로 불리며 대부분 학교에서 아이들이 학습하는 내용입니다.

광합성의 자세한 과정은 다음과 같습니다. 식물 잎의 클로로필 분자가 식물의 잎이

빛에서 에너지를 흡수하고 흡수된 에너지를 물 분자 (H_20)를 수소 원자와 산소 원자로 분리하는데 사용하도록 돕습니다. 그 후 식물은 산소 원자를 산소 분자(두 개의 산소 원자의 결합 - O_2)로써 대기 중으로 방출하고 일시적으로 수소 원자를 저장합니다. 광합성의 두 번째 단계에서는 수소 원자가 수소 원자가 이산화탄소 분자(CO_2)에 둘러싸여 포도당($C_6H_{12}O_6$)과 같은 단순 탄수화물을 생산합니다.

모든 화학 반응처럼 이 과정은 구성 요소들의 이용 가능성에 의해 결정됩니다. 이산화탄소가 대기 중 매우 낮은 농도(현재 0.04%)로 존재하기 때문에, 이 과정에서 종종 제한 요인으로 작용합니다. (RSC) 기체의 농도가 더 높은 상태라면, 이용 가능한 빛으로부터 더 많은 에너지가 발생합니다. 또한, 식물은 탄수화물 생산을 증가시킬 수 있도록 더 많은 수분을 흡수합니다. (Ontl) 밤 또는 가뭄과 같은 다른 상황에서는 빛과 수분이 제한 요인이 됩니다.

이 과정의 규모 자체는 매우 인상적입니다. 1에이커 대지에 심어진 밀은 1년에 8,900파운드의 탄소를 이산화탄소의 형태로 흡수할 수 있습니다. 또한, 탄소를 물과 결합시키거나 당으로 변화시킬 수도 있습니다. 그 결과로 생긴 당의 무게는 2,2000파운드입니다. 이 과정은 매우 활발하게 이루어지며 대략 전 세계 대기 중 존재하는 이산화탄소의 15%는 매년 광합성을 통해 이동합니다. (SAPS)

뿌리 분비물

물론 광합성은 식물 및 남조류처럼 광합성을 하는 다른 유기체들에게 삶에 있어 특별한 역할을 부여합니다. 모든 생명체들은 탄소를 기반으로 이루어져 있으며 살아남기 위해서 탄소를 소비해야만 합니다. 만약 여러분이 식물들처럼 공기 중에서 탄소를 빼낼 수 있다면, 여러분은 매우 유리한 이점을 지니게 됩니다. 하지만 탄소화합물을 생성해낼 수 없을지라도, 우리는 반드시 탄소화합물을 보유하고 있어야 합니다.

도대체 어떻게 토양 미생물들이 탄소를 얻을 수 있을까요? 그들은 탄소를 "일하여 벌 수" 있습니다!

토양학자에 의한 식물과 토양 생물들의 연구 중 주목할 만한 것 중 하나는 그들이 서로 유익한 관계를 유지하며 함께 발달해오고 있는 것처럼 보인다는 것입니다.

식물들이 광합성을 하고 엽록체 속에서 탄수화물을 생성할 때, 그들은 이 화합물 중 일부를 그들 자신의 세포와 구조를 위해 사용하고 일부는 생명 에너지를 얻기 위해 연소시킵니다. 하지만 그들은 화합물의 많은 양을 토양으로 "액체 탄산"으로 "유출" 또는 흘려보냅니다. (Jones SOS) 다양한 예측이 있으나 식물이 광합성을 통해 고정하는

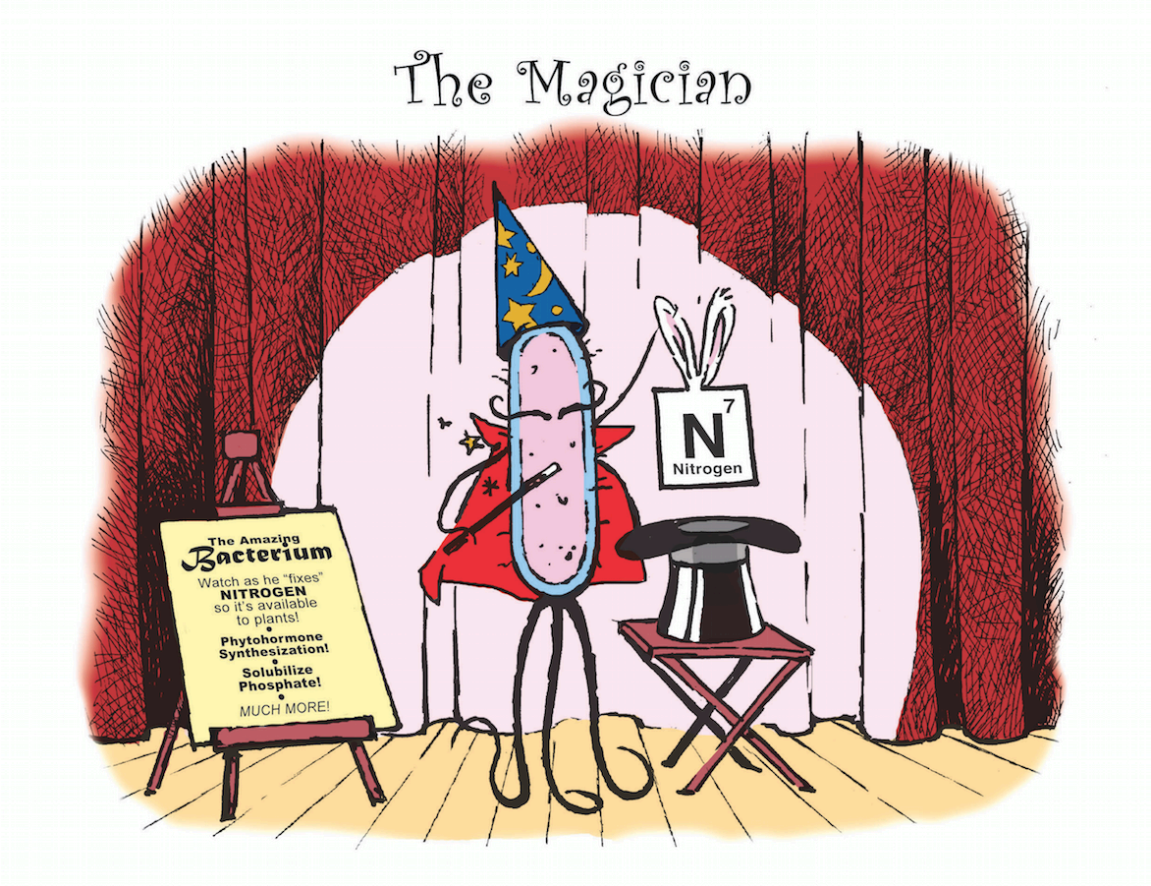
탄소의 20%~40%가 근권(뿌리를 바로 둘러싸고 있는 토양 부분)으로 전달됩니다. (Walker)

도대체 왜 식물은 당이 들은 수액을 땅으로 흘려보낼까요?

바로 미끼이기 때문입니다.

배고픈 박테리아, 균계와 다른 토양 생물들이 탄소를 포함한 맛좋은 뿌리 분비물을 먹어치우기 위해 신속하게 나타납니다. 하지만 곧 그들은 더 많은 양을 원하게 되며 이러한 목표를 달성할 수 있는 가장 최고의 방법은 식물이 더 많은 화합물을 만들 수 있도록 돕는 것입니다. 식물이 건강하고 튼튼하다면, 광합성에 더 많은 재료를 투자하여 더 많은 탄소를 배출합니다. 따라서 미생물은 여러 가지 방법으로 식물을 도와 식물이 더 건강하게 성장하여 많은 양의 액체 탄소를 생성하도록 보조합니다.

토양생화학에 대해 더 자세히 연구하며 우리는 뿌리 분비물을 통해 식물들이 그들 주위의 환경을 조절할 수 있는 능력을 있음을 밝혀냈습니다. 식물들은 주위 토양 미생물 군집을 규제하고 초식 동물의 포식에 대처합니다. 원거리 영양분의 수송을 “구입”하며 주위 토양의 화학적 및 물리적 성질을 변화시키고 경쟁 식물을 성장을 억제합니다.



미생물 공생

다음 다뤄지는 내용은 여전히 연구가 진행되고 있음을 알려드립니다. 토양은 아직 많은 것들이 밝혀지지 않은 경계라 할 수 있습니다. 미생물 군집은 극단적으로 다양합니다. 미생물 종류의 90%~99% 가 현재 기술로써는 연구실에서 배양조차 되지 않습니다. (Jastrow)

토양 미생물 군집의 90% 이상은 질량상 박테리아와 균계로 구성되어 있습니다. 이 두 유기체의 정확한 비율은 다양합니다. 초원이나 숲을 포함한 원상토는 실과 같은 균사가 파괴되지 않은 균계로부터 혜택을 얻습니다. 하지만 경작 또는 인조 질소 비료는 균계의 수를 감소시킵니다.

미생물 성공의 가장 중요한 요인은 미생물이 거주하는 물리적인 환경의 미생물 보호여부입니다. 진흙에 의해서 보호가 이루어질 수 있습니다. 과학자들이 생각하는 진흙에 의한 보호는 적정한 pH 유지, 유해한 대사물질 흡수 및/또는 건조 예방이 포함됩니다. 또한, 지역 기질에서 “은신”을 위해 생겨난 작은 기공들은 원생동물과 같은 더 큰 유기체로부터 더 작은 유기체 포식을 보호해주는 것으로도 여겨질 수 있습니다. (Six) 매일 사라지는 비율은 보호된 유기체일 경우 그 수치는 1% 미만인 반면, 보호받지 못한 유기체일 경우 해당 수치는 70%입니다.

박테리아

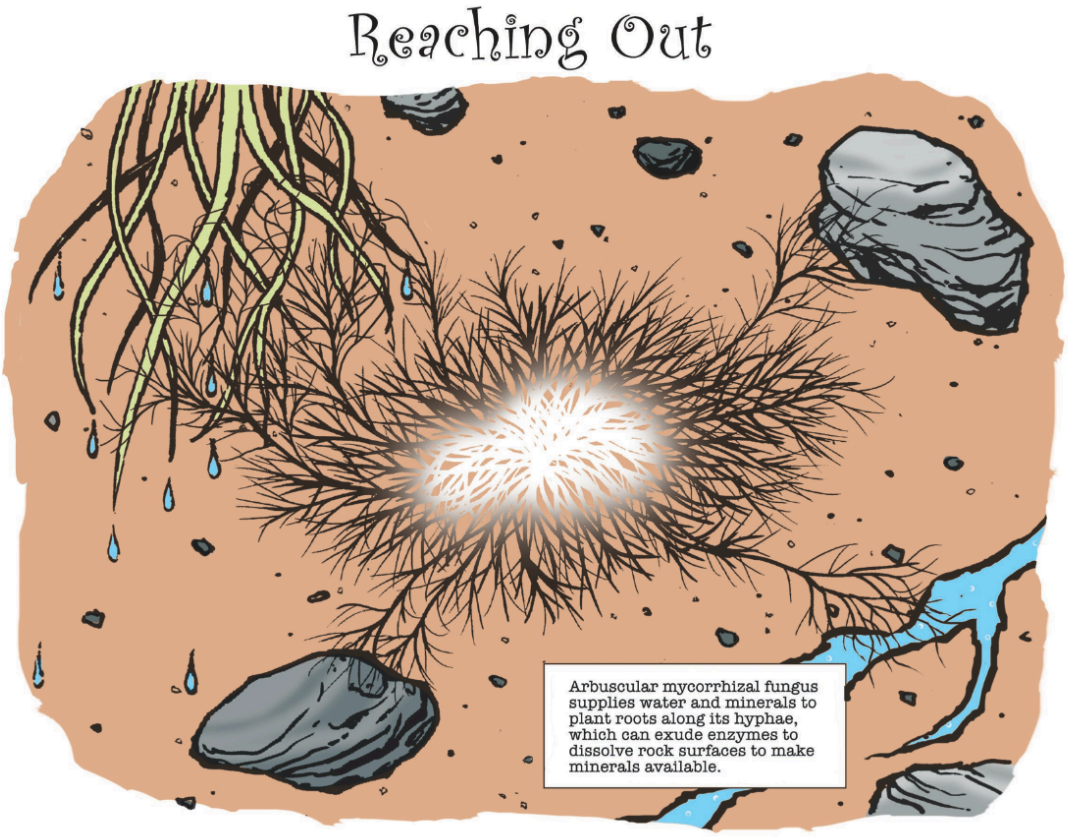
박테리아는 환상적인 화학자입니다. 박테리아 조직은 식물생육촉진근권세균(PGPR)이라 불리며 수많은 생화학적인 통로를 통해 식물을 보조하기 위해 노력하고 있습니다. 일부는 대기 중 질소를 “고정”하여 식물이 이용할 수 있는 형태로 변화시키거나 식물 호르몬을 합성하여 식물 성장의 단계를 촉진시킬 수 있습니다. 또 다른 박테리아는 상대적으로 불용성 필수 영양소인 인산염의 용해도를 높여 식물 성장에 사용될 수 있도록 합니다. 또는, 식물의 진균성 질병에 대한 저항을 보조하기 위해 자연 살진균제를 생산할 수도 있습니다. (Velivelli) 한 식물생육촉진근권세균은 밀, 흰토끼풀과 마늘을 포함한 여러 흔한 식물로부터 배척당해 왔습니다. 하지만 실제로 이 박테리아들은 병원균과 대항하며 식물이 질병을 저항할 수 있도록 돕는 다른 항생물질을 생산할 수 있습니다. (Timmusk)

균계

미생물 공생의 또 다른 예는 균근 곰팡이에서 찾을 수 있습니다. 이 공생 관계에서 균계는 숙주의 뿌리와 주변 토양을 균계의 긴 균사로 연결시키며 총 두 개의 다른

환경에 서식하게 됩니다. 이는 숙주가 균사를 따라 전해진 수분과 무기 영양소를 더 잘 흡수할 수 있도록 돕습니다. 이 관계는 인, 질소, 아연과 구리를 포함하여 많은 무기물을 연결시키는 것으로 기록됩니다. (Jansa) 일부 예측에 의하면 육생 식물의 90%가 균근 곰팡이와의 연합을 환영하는 것으로 알려져 있습니다. (Cairney)

식물로 공급될 수 있는 다른 방법이 없기에 뿌리 분비물은 무기질 또는 미량 원소 교환의 대가로 미생물 에너지를 제공합니다. 일부 과학자들은 이를 통해 발생하는 탄소 교환으로부터 식물이 요구하는 양분의 85%~90%가 얻어진다고 측정합니다. (Jones SOS)
이 관계는 어떠한 비용 없이 두 무리에게 혜택을 줍니다. 요구되는 추가 에너지는 햇볕에 의해 공급됩니다. 이로 보다 건강해진 식물이 미생물을 활성화하고 지지하도록 더 많은 화합물을 생산할 수 있습니다.



토양 입단

이 보고서의 하나의 중요한 관점은 “입단”으로 불리는 토양 구조입니다. 건강한 토양 한 줌을 손에 쥐고 다시 흘려보낸다면, 토양은 한 다발의 콩과 같은 모양을 지닐 것입니다. 바로 토양 입단입니다. 만약 토양이 단단한 덩어리 상태로 남아있다면, 입단이 원활하게 이루어지지 않습니다. 입단은 바람과 물의 침식을 견딜 만큼 안정적이지만 공기, 물과

뿌리가 토양을 지나갈 수 있는 다공적인 성질을 보입니다.

입단은 토양 기능의 기본적인 단위로 보호되는 공간을 생성하며 콩과 식물의 근류와 비슷한 역할을 수행합니다. (Jones SOS) 균근 곰팡이의 균사는 토양 입자를 포함하고 끌어당기는 "끈끈한 줄로 이루어진 가방"을 만들어 입단의 형성을 돕습니다. (Jastrow) 식물 뿌리로부터 배출되는 액체 탄소 분비물과 균근이 입단 벽이 만들어질 수 있도록 접착제와 고무질을 생산합니다. (Jones SOS)

입단 벽 내에는 많은 생물학적 활동이 발생하며 탄소 분비물에서 연료를 공급받습니다. 대부분의 입단은 식물 뿌리와 연계되어 있으나 종종 아주 미세한 잔뿌리 또는 너무 작아서 보이지 않는 균근 곰팡이의 네트워크와 연결되어 있습니다. 입단 내 수분 함유량은 외부 수치보다 높으며 내부의 산소압은 더 낮습니다. 질소 고정과 생화학적인 활동을 발생하도록 하는 중요한 요소들도 존재합니다. (Jones SOS)

입단을 함께 고정시키는 중요한 접착제 중 하나는 "글로말린"이라 불리는 당단백입니다. 당단백과 토양 입단 안정성은 긴밀하게 연결된 것처럼 보입니다. (Nichols) 1996년에서야 발견된 글로말린은 현재 일부 과학자들에 의해 토양 탄소의 27%를 차지하고 조건에 따라 40년 이상 지속되는 것으로 믿어집니다. 글로말린은 식물에서 배출된 액체 탄소를 사용한 수지상체 균근 곰팡이에 의해 생산되는 것으로 여겨집니다. 이는 아마도 곰팡이 균사를 뿌리와 토양 입자에 고정시키고 대기 공간으로 다리를 형성하는 것을 도울 지도 모릅니다. (Comis)

토양을 조금 더 자세히 알아보았습니다. 그러면 미생물과 공생 관계를 유지하기 위해 어떻게 탄소가 식물에 의해 토양으로 주입되는가에 대해 다시 질문을 던져볼 수 있습니다.

이상 기온을 조절하기 위해 우리는 얼마나 빠르게 충분한 양의 탄소를 토양으로 돌려보낼 수 있는가

위에서 보았듯이 대기 중 이산화탄소 100만분의 1에는 2.125Gt의 탄소가 포함되어 있습니다. 그리고 현재 400 ppm을 350ppm로 줄여야 하며 50ppm 또는 탄소 106.25Gt을 토양으로 돌려보내야 합니다.

탄소가 토양으로부터 생겨났기에 토양에 저장될 수 있다는 사실을 모두 인지하고 있습니다. 산업 시대부터 농지 개간 및 농업을 위한 경작으로 토양으로부터 136Gt의 탄소를 불러냈습니다.

하지만, 우리는 얼마나 빠르게 탄소를 되돌려 보낼 수 있을까요? 지난 20년 동안 사람들이 토양에 탄소를 다시 저장하는 것을 고민한 이래로 농경 광합성이 토양 탄소를 축적할 수 있는 비율을 측정하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔습니다. 우리는 지난 10년 정도 다섯 개의 대륙의 다양한 토양과 여러 종류의 농경을 포함하여 이러한 다양한 연구를 살펴보았습니다. 연구들은 각자 다른 방법을 사용했으며 물론 제각기 다른 결과를 도출해냈습니다. 하지만 이러한 연구를 확인해보면 확실한 몇 가지를 발견할 수 있습니다.

• 다년생 성장 시스템은 다른 농경 방법보다 더 많은 탄소를 돌려보낼 수 있습니다. 시험을 바탕으로 한 모든 초원은 매해 예외적으로 많은 탄소의 양을 기록했습니다. 이는 에이커당 1.9톤~3.2톤의 탄소로 평균 탄소양은 2.6톤입니다. (Machmuller, Rodale, IFOAM) 우리는 많은 양의 토양 탄소를 축적하는 다년생 작물 시스템에 관한 연구는 거의 발견할 수 없었습니다. 하지만 다년생 임산물이 많은 양의 토양 탄소를 축적시킬 수 있다는 몇 가지의 증거를 발견할 수 있었습니다. 한 연구에 의하면 노후한 광산 토양은 아카시아 나무가 심어지고 짧은 순환기 속 바이오매스 농작물로 가지를 치며 관리된다면 매년 에이커당 2.8톤의 탄소를 얻을 수 있다고 합니다. (Quinkenstein) 물론 우리가 다년생 임산물 또는 초질 수확물이 토양 탄소를 돌려보낼 수 있다고 완벽하게 평가하기 전 더 많은 연구들이 여전히 필요합니다.

• 특히 질소와 인을 포함한 인공 화학 비료의 사용은 토양 탄소의 축적을 심각하게 줄이거나 심지어 제거할 수 있습니다. 하지만 적정한 양의 퇴비 및 비료의 사용은 토양 탄소 증가에 방해가 되지는 않는 것으로 보입니다. (Jones SOS, Rodale)

• 줄뿌림 작물에 대한 연구는 심지어 작물이 인공 화학물질 없이 키워졌을 때 얻어지는 탄소의 양을 측정하였으며 에이커당 0.23톤~1.66톤 사이, 평균 0.55톤으로 초원 연구에서 나타난 수치보다 더 적은 수치를 보였습니다. (Khorramdel, IFOAM)

• 연구된 농사법의 질은 매우 다양했으며 특히 줄뿌림 작물에 있어서는 더 다양한 모습을 보였습니다. 실질상 매우 많은 탄소를 얻은 모든 줄뿌림 작물 연구는 화학적 비료가 아닌 퇴비 또는 비료를 사용했습니다. 하지만 여러 종류의 피복 작물을 사용하고 경운을 최소화하여 항상 토양을 작물로 덮어 유지하는 것처럼, 탄소 축적에 대해 사용된 여러 원리에 대한 범위는 명확하지 않습니다. 그렇지만 옥수수 에이커당 1.66톤의 탄소를 돌려보내며 줄뿌림 작물에서 가장 높은 탄소 보존도를 지닌 것으로 보고된 경우는 유기농 무경운 농법을 사용했을 때라는 것은 주목할 필요가 있습니다. (Khorramdel)

이러한 시험 평균을 고려하여 토양으로 106.25Gt의 탄소를 되돌려 보낼 수 있는 농경의

가능성 대략적으로 계산해보겠습니다.

FAO는 지구 상 83억 에이커 규모의 초원과 38억 에이커 규모의 농경지가 있다고 언급했습니다. 만약 모두가 매년 그 큰 초원에 탄소 축적 방식을 사용하고자 한다면, 에이커당 평균 2.6톤으로 초원은 21.6Gt의 탄소를, 농경지는 에이커당 평균 0.55톤으로 2.1Gt의 탄소를 되찾을 수 있습니다. 이는 매년 총합 23.7Gt이라는 수치가 됩니다. 우리는 106.25Gt의 탄소를 돌려보내는 것에 관심이 있습니다. 즉, 총 5년 이내로 이 모든 것이 가능하다는 것을 의미합니다!

안정적인 탄소

우리가 많은 양의 탄소를 토양으로 돌려보내고 싶다면, 미생물이 소비할 수 없는 방식이 채택되어야 합니다. 그렇지 않을 경우 결국 미생물이 탄소를 태워 대기 중으로 이산화탄소의 형태로 다시 배출하게 될 것입니다. 많은 연구들이 토양 유기물을 이용한 치료법이 탄소를 저장할 수 있는지 분석해오고 있습니다. 10년 동안 진행된 한 연구는 유기물의 잔여물을 하나의 토지에 포함한 것과 유기물의 잔여물을 비슷한 토지에서 제거한 것을 비교했습니다. 31년 동안 지속된 한 연구는 토양으로 되돌려지는 탄소의 양을 최대 50%까지 변화를 주며 다양한 순환과 거름주기를 서로 다른 토지에서 비교했습니다. 세 번째 연구는 작물 잔여물이 수년 간 태워진 토지와 잔여물이 토양으로 포함된 토지를 비교했습니다. 각 연구의 마지막에 연구가들은 토양 유기물을 측정하였으며 그 결과 서로 다르게 관리했지만 정작 토지 간 큰 차이가 없음을 밝혀냈습니다. (Kirkby)

만약 미생물이 단순하게 복제되어 존재하는 탄소를 소비한다면, 우리는 토양 내 탄소 비율을 더 높게 축적시킬 수 없습니다. 그리고 역사적으로 6%~10%의 토양 생물 레벨이 흔한 것으로 여겨졌으며 장소에 따라 수치는 20%까지 측정되기도 했습니다. (LaSalle) 무엇이 토양 생물들이 과거 토양의 유기물을 분해하지 못하도록 막은 것은 무엇일까요?

수 년, 심지어 수세기 동안 안정적으로 머무르는 것처럼 보이는 탄소의 한 형태는 부엽토입니다. 이는 탄소를 포함한 복합 분자로 구성되나 토양 생태계에 의해 쉽게 분리됩니다. 과학자들 사이에 어떻게 부엽토가 형성되었는지 또는 어떻게 분해를 막을 수 있는 지에 대한 의견은 분분합니다. 일부는 부엽토가 뿌리와 뿌리 식물의 미생물 분해로 의해 형성된 매우 높은 저항성을 지닌 탄소의 형태라고 믿습니다. (Ontl)

다른 과학자들은 토양 탄소의 물질적 보존을 가능하게 하는 메커니즘은 미네랄로 “흡수”되어 미생물 효소의 공격을 저항하는 그 자체의 능력 또는 토양 입단 내의 보호에서 발견할 수 있다고 믿습니다. 전자는 진흙 입자나 토양 교질로의 화학적 결합은

효소를 위협하여 공격에 견딜 수 있을 만큼 충분히 강력하다는 것을 암시합니다. 후자는 토양 입단으로부터 분해되는 물질 또는 산소를 유지하여 분자를 효소의 공격으로부터 보호할 수도 있음을 나타냅니다. (Dungait)

견해는 과학자들 사이에서 계속 발전해오고 있습니다. 하지만 안정적인 탄소는 토양 유기물의 잔여물이 아닌 액체 탄소 자체에서 형성됩니다. 이 관점은 부엽토를 분해되는 유기물의 산물이 아닌 토양 생물에 의해 만들어진 창조물로 여깁니다. (Meléndrez, Jones letter)

이 견해를 지지하는 연구는 부엽토는 약 60%의 탄소와 6%~8%의 질소로 구성되었으며 더불어 인, 황, 철과 알루미늄 등 토양 미네랄과 화학적으로 연결된 유기무기복합물로 간주합니다. 심지어 부엽토의 구성 물질은 부엽토의 주요 물질인 탄소와 질소 사이 및 탄소와 황 사이에 특정한 비율을 기반으로 한다는 다른 증거도 존재합니다. (Kirkby) 한 연구가는 부엽토는 단지 질소가 활발하게 고정되며 인과 황이 용해되는 토양 입단처럼 특별화된 토양 마이크로사이트에서만 형성될 수 있다고 주장합니다. (Jones letter)

토양 탄소를 어떻게 돌려보내고 안정화시킬 수 있을까?

토양학자들이 부엽토를 구성하는 요소와 미생물 공정을 더 연구할수록 우리는 부엽토 형성을 보조할 수 있는 더 잘 이해할 수 있게 됩니다. 하지만 토양 유기물을 축적하는 것은 토양에 단순히 유기물을 첨가하는 것만은 아니라고 시사하는 증거가 있습니다. 유기물 축적은 건강하게 자라는 미생물 군집을 창출하고 농작물이 더 번창할 수 있도록 돕습니다. 하지만 탄소를 장기적으로 축적하기 위해선 우리는 더 많은 것이 필요합니다.

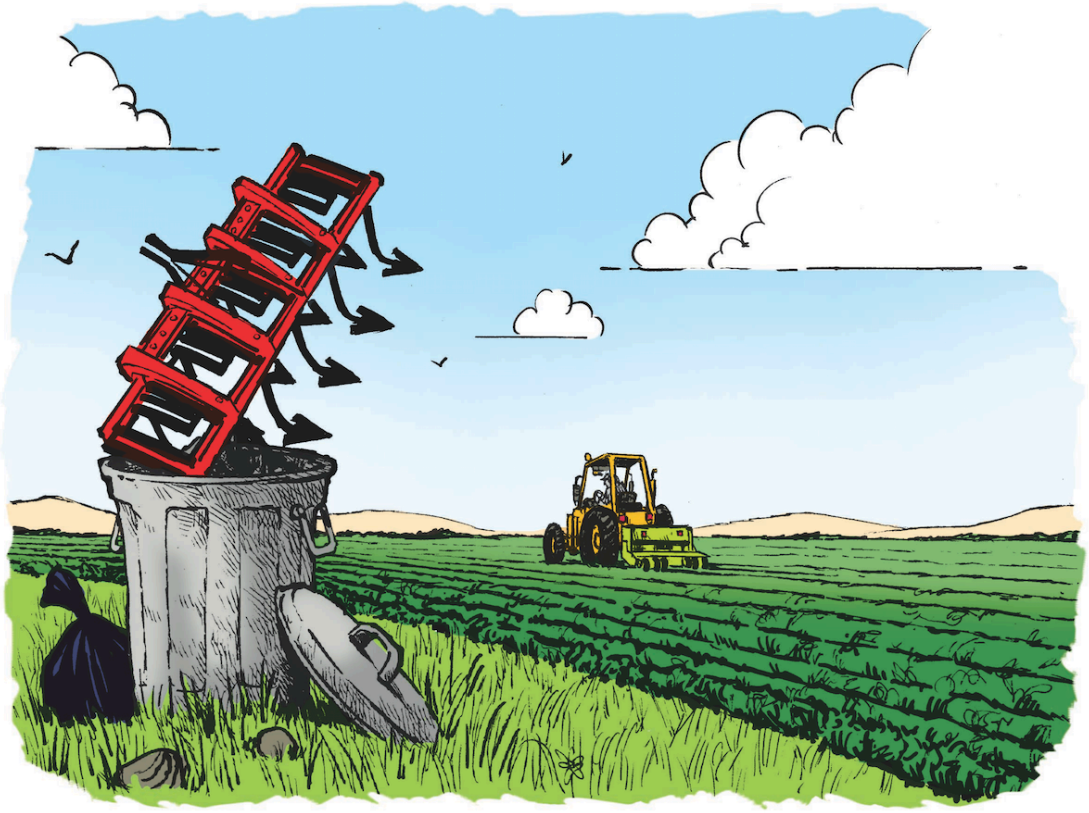
우리가 알 필요가 있는 것은 다음과 같습니다. 토양에 토양 탄소를 축적하고 유지시키려면 어떠한 기법이 필요한가?

토양에 작물을 심고 지속적으로 유지하자

아마도 가장 중요한 하나의 교훈은 텅 빈 토지는 탄소를 산화시키는 반면 식물은 그 산화를 막는 작용을 한다는 것입니다. 녹색 식물은 공기와 토양 사이 방어막을 형성하며 미생물에 의한 탄소 배출 과정을 느리게 만듭니다. 바람과 물에 의한 침식도 토양 탄소의 주요한 적입니다. 따라서 침식에 대항하는 가장 좋은 방법은 식물을 키우는 것입니다. 마지막으로 식물은 토양 탄소를 보호할 뿐 아니라 광합성의 위력을 통해 토양 탄소를 증가시킵니다. 간단히 설명하자면, 토양이 농작물 열 사이에 위치하거나

위치하지 않더라도 밭을 기경하거나 농작물을 수확하고 땅을 묵히기 위해 남겨두어 노출된 상태로 남은 토양의 모든 1평방 피트마다 탄소 저장량을 감소시킵니다.

콩과 식물이나 피복 작물로 파종 후 토양을 덮는 겨울 식생과 같은 농법은 작물이 수확된 후 생산적인 덮개를 남기는 관습은 매우 중요합니다. 이를 통해 토양의 탄소를 증가시키고 침식으로부터의 보호할 수 있습니다. 또한, 토양 생물들에 먹이를 공급하며, 토양의 입단을 촉진하게 됩니다. (Azeez)



기경을 최소화하자

유기농 재배자들이 채택하기 가장 어려운 복탄법 중 하나는 기경의 최소화입니다. 유기농 재배자들은 제초제를 사용하지 않기에 토지의 기경은 잡초로부터 대항할 수 있는 주요한 무기입니다. 하지만 기경은 여러 해로운 점들도 지니고 있습니다. 우선 기경은 땅을 골라 공기 중으로 노출시킵니다. 이 과정에서 노출된 토양의 탄소가 산화되기 시작합니다. 둘째는 기경이 균근 곰팡이의 균사, 초세 및 액체 탄소의 증가된 분비에 매우 중요한 공생의 많은 부분을 담당하는 미생물을 찢고 파괴합니다. 균사는 연약한 독립형 네트워크로 땅을 침투하여 수분과 영양분을 식물 뿌리로 공급합니다. 여러 연구들은 기경이 감소된 모든 부분에서 균계의 생물량이 증가했다고 발표했습니다. (Six) 셋째, 질소 고정과 탄소 안정화와 같은 중요한 화학 변화를 보호하기 위해 미생물의 분비물로 구축된 복잡한 토양 입단이 기경에 의해 파괴될 수 있습니다. 넷째,

기경은 공기와 수분을 가두어 미생물의 생명력을 높이는 토지의 기공을 파괴하는 경향이 있습니다. 마지막으로 기경 자체는 작동 중 온실가스를 내뿜는 화석 연료에 의해 운영되는 장비를 종종 포함합니다.

연구들은 높은 수준의 복탄법을 지닌 유기농 작물 시스템은 기경을 없애고 소의 거름과 같은 유기물을 충분하게 토양으로 더하는 농사 기법이라고 밝혔습니다. (Khorramdel) 기경 비평가들은 수년 후 단 한 번만의 기경으로도 기경 전 기간 동안 축적된 탄소의 대부분이 손실된다고 설명했습니다. (Lal 2007)

무경운으로 얻어지는 토양 탄소는 토양 단면으로 깊게 분포되지 않으며 토양 겉 표면에 나타난다는 연구가 있습니다. 해당 연구에 따르면 이는 문제가 될 수 있습니다. 부엽토 형성과 장기간 탄소 안정화를 위해 가장 좋은 기회는 산성화 저항을 위해 토양으로 더 깊게 들어가고 탄소가 결합하는 미네랄과 진흙에 더 가까이 다가갈수록 생겨나는 것처럼 보이기 때문입니다. 또한, 토양 생명이 무경운 관리를 통해 형성해낼 수 있는 토양의 종류는 표면 주위에 자리한 토양의 모래 입자/토양 입자에만 포함되며 최종적인 방해가 있을 때 쉽게 산화된다는 논쟁이 있습니다. (Azeez)

하지만, 일부 연구에서는 무경운 아래 축적된 유기물의 겉 표면은 아마도 더 큰 토양 유기체에 의해서 줄어든 유기물 분해와 장기 토양 혼합으로 인하여 10년~15년에 걸쳐 토양 유기물로 천천히 침투된다고 언급합니다. (Powlson)

현재 유기농 재배자들이 기경을 줄일 수 있도록 여러 시스템과 장치가 고안되고 있습니다. 재배자들은 씨앗이나 묘목을 심을 수 있을 만큼의 땅만 개방 후, 작업이 끝나면 바로 닫을 수 있습니다. 롤러 크림퍼는 개화하기 전 긴 줄기를 가진 피복 작물을 롤러로 쓰러트리고 절단하여 땅에 영향을 끼치지 않은 채 죽이게 됩니다. 그 후 시장 작물이 그 표면의 그루터기로 곧바로 심어집니다. 유기농 재배자들이 기경 없이도 잡초를 억제할 수 있도록 분명히 다른 많은 발상들이 지속적으로 개발될 것입니다. 일선에서는 이에 대한 더 발전이 분명히 더 필요합니다.

잡초를 억제할 수 있는 다른 방법에는 멀칭 필름을 이용하여 햇볕이 잡초로 도달하지 못하도록 방지하는 방법이 있습니다. 적용할 수 있는 가장 간단한 멀칭 필름은 플라스틱 덮개입니다. 하지만 플라스틱 덮개를 생산하는데 종종 화석 연료가 소요되며 덮개 제거 자체도 어렵고 시간이 소요될 수 있습니다. 건초 또는 절단된 작물 잔해 등 유기농 제품을 사용한 멀칭 필름은 부패된 유기물을 토양으로 추가하며 탄소를 축적합니다. 하지만 생물학적으로는 활발한 토양은 지속적인 물질 추가를 요구하기 때문에 시간과 가격이 들 수 있습니다. 하지만 멀칭의 근본적인 결점은 다른 살아있는 식물들처럼 대기

중에서 탄소를 취득하거나 광합성을 통해 토양으로 탄소를 고정하지 않는다는 점에 있습니다.

피복 작물

유기농 전략에 있어 피복 작물은 경작을 줄이거나 제거하고, 잡초를 제어하며 토양 탄소를 구축하기 위해서 매우 필수적인 항목입니다. 피복 작물의 이상적인 후보는 서리, 벌초나 파쇄 등으로 인해 꽃을 피우기 전에 사라질 수 있는 위험 때문에 씨앗을 생산하지 않는 대신 잡초 자체로 변합니다. 이 잡초들이 살아있는 동안에는 광합성을 통해 토양 탄소에 매우 중요한 원료를 제공하며 죽은 후에는 그들의 생물량도 이용할 수 있게 됩니다. 영양분을 땅 깊은 곳까지 투여하고 질소와 탄소를 더 낮은 레벨의 토양에 추가하는 연간 독보리 또는 곡물 호밀과 같은 뿌리 식물처럼 콩과 식물도 피복 작물 혼합에 매우 중요합니다.

토양 탄소량의 증가 외에도, 피복 작물은 질소 용탈을 줄이고 바람과 물에 의한 침식을 막습니다. 이 작물들은 토양 구조를 향상시키고 수분의 침투를 증가시키며 증발을 억제합니다. 이들은 또한 경작된 많은 작물보다도 더 높은 레벨의 리그닌을 공급하여 토양 입자의 결합을 촉진시키는 글로말린과 같은 곰팡이류와 균근 곰팡이의 성장을 보조합니다. (Rodale, Azeez)

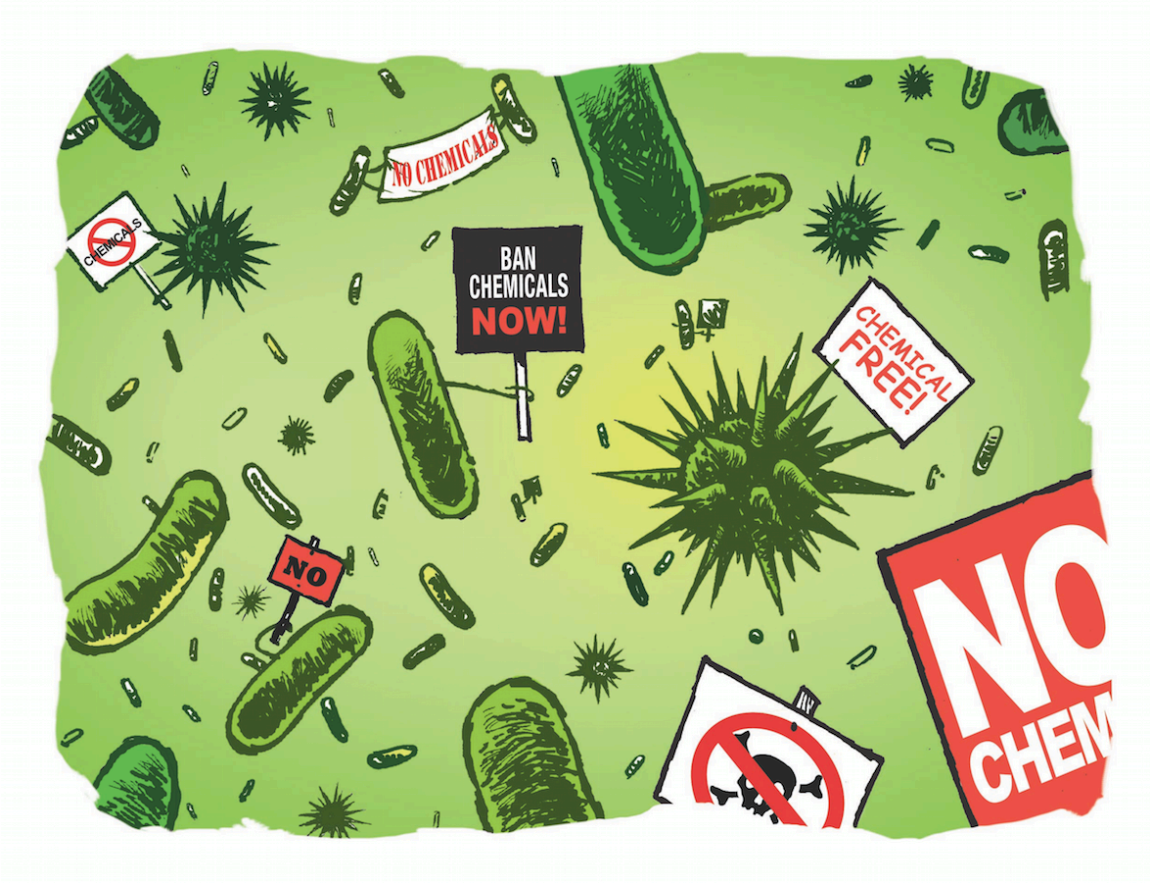
다양성과 윤작

토양에 있는 미생물의 삶을 지원하는 열쇠 중 하나는 다양성을 장려하는 것입니다. 자연의 한 가지 법칙은 자연 체계 속 다양성이 더 많을수록 더 자연이 더 건강하고 회복력을 지니게 되는 것처럼 보입니다. 또한, 토양 탄소 구축에 있어 이 법칙이 사실인 것을 알 수 있습니다. (Lal 2004) 땅 밑에서 생물의 다양성은 모든 미생물이 먹이 사슬의 틈새 부분을 채우도록 합니다. 균계, 조류, 박테리아, 지렁이류, 흰개미, 개미, 딱정벌레, 쇠똥구리 등이 포함됩니다. 땅 위에서는 단일 경작이 해충과 질병을 끌어당기지만 작물의 다양성이 해충의 침입이 성장하거나 더 퍼지지 않도록 방지하는 역할을 합니다. 이는 활엽과 풀, 콩과 식물과 비 콩과 식물, 춥거나 따뜻한 날씨, 습하거나 건조한 기후 등 다양한 종류의 식물을 보유해야만 하는 작물과 간작 모두에게 적용됩니다. 조건이 어떠하든 일부 작물들은 살아남아 광합성을 할 수 있어야만 합니다. "피복 작물 혼합"은 다양한 종류의 피복 작물 씨앗을 합한 것으로 생물 다양성을 보장하기 위해 현재 구입할 수 있습니다.

윤작은 생물 다양성에 이익을 도모할 수 있습니다. 지속적인 피복 작물로 회전이 이루어지면 땅의 비옥도를 회복시키는 휴경 기간의 필요성을 없애고 토양 효소의

활동량을 키울 수 있습니다. 또한, 회전에 콩과 식물이 포함된다면 미생물 생체량은 더 커지게 됩니다. (Six)

풀을 뜯는 반추 동물도 유기적 농장이 토양 유기물 레벨을 더 키울 수 있는 흔한 방식입니다. 풀을 뜯는 행위 자체는 풀 뿌리의 성장을 촉진시키며 필요 없는 부분을 버릴 수 있게 됩니다. 이로써 배고픈 토양 미생물들의 먹이가 될 수 있는 탄소가 공급됩니다. 적정하게 관리된다면, 초원과 다년생 시스템에서 유기물은 급격한 성장할 것입니다. 가축물의 퇴비는 소규모 혼합 농장에서 가장 가치 있는 산물 중 하나로 탄소와 살아있는 미생물이 풍부하여 생물의 다양성을 토양으로 불어넣을 수 있습니다.



화학물질 사용을 중지하자

인위적인 농약의 사용은 토양 탄소를 파괴할 수 있습니다. 살충제와 같은 독성 물질은 식물의 생명력과 광합성을 강화하는데 중요한 역할을 하는 토양 유기물에게 매우 치명적입니다. 비료 역시 토양 유기물을 대폭 감소시키는 것으로 드러났습니다. Rodale 연구소의 퇴비이용 시험에서는 10년 간 윤작에 혼합된 거름을 사용하였으며 결과적으로 연간 에이커당 최대 1톤의 탄소를 얻을 수 있었습니다. 하지만 윤작 없이 인위적인 비료를 사용할 경우에는 연간 에이커당 1.5톤의 탄소가 손실되었습니다. (LaSalle)

일리노이 대학교의 다음 밭(Morrow Plots)은 역사상 가장 오래 운영된 통제된 농장 중 한곳입니다. 연구가들은 지난 50년 동안 에이커당 총 90톤~124톤의 탄소 잔여물 뿐 아니라 인위적인 질소 비료가 더해진 밭들로부터 추출한 데이터를 분석했습니다. 이러한 밭들은 시험 기간 동안 에이커당 거의 5톤의 토양 유기물을 손실했습니다. (Khan)

토양 탄소에 뿌려지는 인공 비료의 부정적인 영향 중 시사된 이유 하나는 콩과 식물, 미네랄 또는 다른 자연 원료들이 영양분을 토양 전체에 퍼트리는 것과 달리 인공 비료가 토양 표면의 매우 얕은 층에 침투하여 식물 뿌리의 크기와 깊이를 줄이는 경향이 있다는 사실입니다. (Azeez) 다른 이유는 토양을 산성화하는 수소 이온으로 방출시키는 암모늄 이온을 흡수하는 식물에 가해지는 영향을 들 수 있습니다. (Hepperly) 세 번째, 유리 질소의 이용성은 미생물로부터 질소를 얻기 위해 식물이 더 적은 양의 액체 탄소를 배출하도록 합니다. 만약 인공 질소 비료를 사용하고 있지만 사용을 멈추고 싶다면, 질소 고정 박테리아가 토양에 축적될 수 있는 시간을 확보할 수 있도록 3년~4년에 걸쳐 서서히 사용을 중단하는 것이 현명합니다. 너무 급작스럽게 사용을 멈춘다면 첫 해 수확물은 기대 이하일 수 있습니다. (Jones SOS)

초원

이전에 적당한 방목은 토양 탄소를 돌려보내는데 매우 효과적인 농업 기술임을 확인했습니다. 줄뿌림 작물 경작에서 집중적인 방목으로 전환한 대지에 대한 최근 연구는 연간 에이커당 3.24톤의 탄소를 축적시키며 매우 괄목할만한 성과를 보여줬습니다. 이는 연간 에이커당 2.87톤의 비율을 달성한 남아메리카의 사바나에 심어진 뿌리 깊은 아프리카 식물의 범위 내에 위치하게 됩니다. (Machmuller) 탄소 고정에 있어 방목의 효율성의 일부는 아마도 여러 풀이 더 일반적인 C_3 경로에서 분리되어 독립적으로 진화된 C_4 광합성 화학 경로를 채택하고 있다는 사실과 연관되어 있을 지도 모릅니다. 특히 물이 적고 빛이 많으며 온도가 높은 환경에 적응한 C_4 광합성은 3%만이 현화 식물에 의해 사용됨에도 불구하고 대지의 모든 탄소 고정의 25%~30%를 책임지고 있습니다. (Muller)

몇몇 사람들은 수많은 반추 동물을 늘리는 것에 우려의 목소리를 내고 있습니다. 반추 동물들은 제1위의 반추 내용물에 그들이 내쉴 때 나오는 온실가스, 바로 메탄을 내뿜는 박테리아를 사용하여 소화 과정을 진행하기 때문입니다. 여러 서식지에 거주하는 메탄영양세균은 메탄만을 먹이로 취하며 빠르게 대사 활동하기 때문에 생태학적 관점에서는 문제가 되지 않습니다. 실제 멕시코만의 딥워터 호라이즌 기름 유출 사고 후 표면에 220,000 톤의 메탄 거품이 일어났으나 메탄영양세균의 폭발적인 수로 인해 신속하게 소비되었습니다. 반추 동물이 가축 사육장이나 인공 화학 물질이 과도하게

뿌려진 토양과 같은 생물학적으로 활발한 토양이나 물에서 멀어질 때에만 그들이 내뿜는 메탄이 우려될 수 있습니다. (Jones SOS)

숲

노후화된 토양을 산림 이용으로 전환하는 것이 토양 탄소를 강화시키는 방법으로 제안되었습니다. 다른 식물들처럼 숲의 토양 탄소 회복 비율은 기후, 토양형, 종과 영양 관리에 달려있습니다. 숲의 토양 탄소와 관련해 발견한 한 연구는 토양 탄소 양의 지속적인 원만한 증가 또는 경우에 따라 순 손실 양을 보여줬습니다. (Lal 2004) 하지만 목본의 적정한 관리를 통해 상당한 양의 토양 탄소를 얻을 수 있음을 시사한 연구도 있었습니다. (Quinkenstein) 또한, 다른 면에서 보면 다시 숲을 가꾸는 작업은 기후 조절과 물의 순환 회복으로 이어질 수 있습니다.

바이오 숯

토양으로 탄소를 돌려보내며 토양의 비옥도를 높이기 위해 숯 잔여물을 사용할 수 있는 가능성이 최근 들어 많은 관심을 받고 있습니다. 800년 전 이상 숯이 더해지며 인류 발생적으로 생겨난 아주 어두운 땅인 아마존의 *테라 프레타* 토양에 대해 지지자들은 심지어 오늘날까지도 이 토양이 매우 높은 비옥도를 지니고 있다고 언급합니다. 숯을 포함한 다른 토양인 몰리솔은 초생지로부터 비롯되어 북아메리카, 우크라이나, 러시아, 아르헨티나와 우루과이에서 넓게 분포하며 세계 곡물 생산량의 대단히 많은 부분을 차지합니다. 이 토양에 자리한 숯은 오래 전 발생한 들불에 기여하고 있습니다. 이 숯 잔여물들의 실제 화학적 성질은 최근에서야 조사가 되었습니다. 이에 의하면 숯 잔여물들의 안정성과 비옥한 성질은 미생물을 위해 그들 내부 공간에서 제공하는 보호 서식지 또는 거대한 양이온 교환 용량(식물 영양을 위해 미네랄의 이온을 흡착하는 능력)을 생성하는 숯의 분자 구조와 관련이 있을 지도 모른다고 발표되었습니다. (Mao)

비록 바이오 숯이 널리 연구되지는 않았을 지라도, 연구가들은 바이오 숯으로 전환된 생물량 탄소는 오랜 기간 동안 토양 탄소양의 약 50%를 격리시키기에 숯으로 전환되지 않은 탄소를 직접적으로 토지에 적용시킬 때보다 더 안정적이고 오래 지속되는 토양 탄소로 연계될 수 있다고 주장합니다. (Dungait)

물론 탄소에서 바이오 숯으로 변화되는 모든 전환 과정에는 탄소의 근원, 탄소의 토지 이용 결과 및 탄소를 처리하고 적용하는 에너지와 관련된 전 과정 평가를 반드시 포함해야만 합니다. 하지만 바이오 숯은 불안정하거나 쉽게 분해될 수 있는 토양 생명으로 추가적인 안정성을 부여하는데 훌륭한 방식이라는 징조가 있습니다. (Powlson)

탄소를 토양으로 돌리며 얻는 혜택

토양에 유기물을 축적하며 얻을 수 있는 이점은 대기 중에서 이산화탄소를 제거하는 것에만 제한되지는 않습니다.

물

토양 탄소의 증가는 입단을 축적시키며 결과적으로 토양이 수분 저장을 위한 스펀지 역할을 하도록 돕습니다. 이를 통해 강수량이 낮을 땐 식물 뿌리로 저장된 물을 공급하며 강수량이 높을 땐 흡수한 양을 흘려보낼 수 있습니다. 물을 보유하는 능력은 침식의 위험을 줄이며 향상된 농작물의 질 및 산출량을 야기합니다. 일부 재배자들은 공영 식물이나 피복 작물이 이용 가능한 모든 물이나 영양분을 사용할 것이라고 믿습니다. 이와는 대조적으로 다양한 종류의 식물로 토양 미생물을 보조하면 실제로 작물의 영양분 흡수와 수분 보유 능력을 키울 수 있습니다. (Jones SOS)

흥미롭게도 1930년부터 미시시피 강의 평균 최고 및 최소 수위는 지속적으로 극단적인 현상을 보여 오고 있습니다. 홍수 수위가 더 높아지고 강의 낮은 높이 수위는 계속 낮아지고 있습니다. 이는 물이 토양에 당연히 침투해야 하지만 이 과정이 불가능하기 때문에 발생합니다. 훌륭한 침투를 통해 일부 물은 식물 성장에 공급되고 다른 일부는 천천히 토양으로 스며들어 샘과 개울을 도와 강 시스템으로 오래 지속될 수 있는 기저유량을 제공하게 됩니다. 하지만 만약 지표 식물이 훌륭하지 않다면, 토양 입단이 감소되어 물이 제대로 침투될 수 없습니다. 따라서 홍수가 발생하면 물은 표면을 흐르고 가뭄이 발생하면 식물 또는 샘과 개울의 흐름을 위해 토양이 보유할 수 있는 공급이 없게 됩니다. (Jones SOS)

균계의 우월성

과학자들은 토양에 있어 박테리아에 대한 균계의 높은 비율은 식물 생산에 매우 중요합니다. 신선한 한 줌의 흙을 쥐었을 때 그 흙이 산성이 아닌 버섯과 비슷하다면 이러한 균계의 비율을 발견할 수 있습니다. 물과 영양분을 찾아 식물 뿌리에 필요한 만큼 공급하는 것이 바로 균계입니다. 안타깝게도 대부분 우리의 농경지는 균계가 아닌 박테리아로 뒤덮여 있습니다. 메마른 토양을 피하며 경운 작업을 하지 않고 다양한 피복 작물을 사용하는 농사법으로 토양에서 균계가 우위를 차지하게 만들 수 있습니다. 또한, 고밀도를 유지하되 짧은 기간 동안 방목하고 긴 휴지기를 지니는 것도 좋은 방법이 될 수 있습니다.

더 우수한 작물

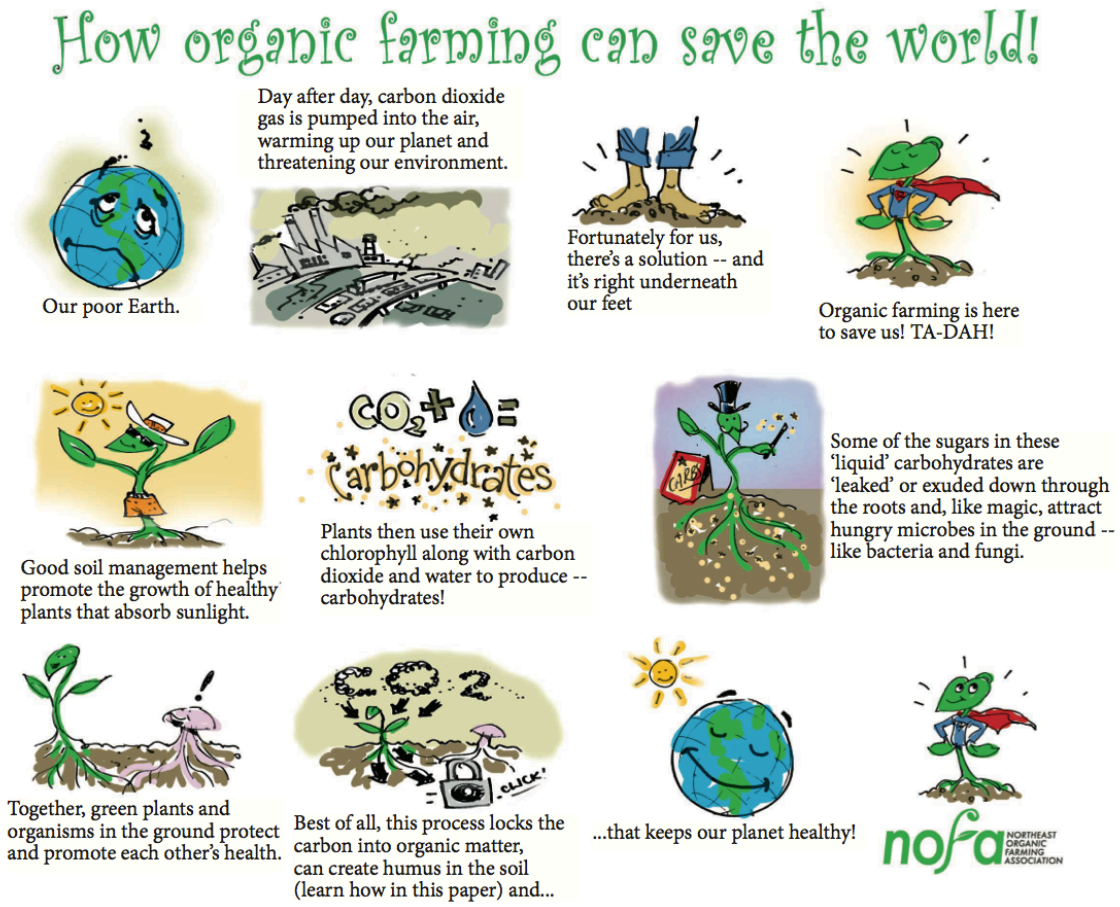
동물들과 마찬가지로 식물들은 적에 대항할 수 있도록 복잡한 방어 체계들을 진화시켜오고 있습니다. 그들의 메커니즘은 다양하며 영리합니다. 일부는 다른 식물을 흉내를 내거나 다른 식물로 변장하는 등 시각적인 방어를 채택하여 발견되지 않도록 합니다. 다른 일부는 두꺼운 세포 벽, 왁스 층 및 단단한 나무껍질과 같은 갑옷을 둘러 공격이 어렵도록 만듭니다. 뿔, 가시나 끈적끈적하고 껌과 같은 분비물을 사용하여 포식자를 막는 식물도 있습니다. 많은 식물은 이차대사산물을 합성하여 화학적으로 공격을 피합니다. 독약, 방충제, 자극물 및 심지어 휘발성 유기 화합물로 식물 포식자의 적을 끌어당기기도 합니다. (찡긋) 식물들은 또한 현지 병원균을 저해하고 공격으로부터 식물을 보호할 수 있도록 박테리아와 공생 관계로 연계되어 있습니다.

동물들의 면역 체계처럼 식물들의 이러한 기능들은 식물이 건강할 때 가장 강해집니다. 충분한 햇빛, 영양분, 물, 산소와 이산화탄소가 완벽하게 충족되었을 때 식물은 최적의 건강 상태를 지닙니다. 물론, 건강한 식물은 높은 탄소 함량과 다양하고 많은 종류의 미생물을 포함한 토양에서 가장 잘 나타납니다. 이러한 조건들은 작물이 영양소 밀도, 병충해에 대한 저항력, 더 많은 산화 방지제 및 선반에서 더 오래 보존될 수 있는 생명을 지니도록 도와줄 수 있습니다. (Gosling, Wink, Reganold)

질병이나 포식에 의해 방해되지 않고 자신들의 필요 영양소가 충족된 식물들은 살아남아 풍부한 농작물을 선사합니다. 또한, 건강한 식물은 농작물의 맛과 향을 생산하는 더 많은 휘발성 분자와 보다 높은 대사산물을 생합성합니다. 따라서 토양에 탄소를 돌려보내는 것은 모두에게 이득이 됩니다. 농부들은 더 많은 수확량을, 원예사들은 더 좋은 맛과 향을 지닌 농작물을, 그리고 소비자들은 더 건강한 음식을 얻을 수 있습니다.

결론

토양으로 유기물을 돌려보내고 안정화시키기 위해 생물학을 이용하는 것은 대지와 농작물을 관리하는 사람들에게 매우 유익할 뿐 아니라 사회의 입장에서도 매우 필수적입니다. 우리는 토양으로부터 너무 많은 탄소를 제거하여 태웠으며 이산화탄소로써 대기 중으로 보내왔습니다. 심지어 우리가 당장 내일 화석연료의 연소를 중지하더라도, 배출된 온실가스는 계속해서 지구 온도를 높이고 미래 많은 해 동안 해로운 기체를 내보낼 것입니다.

우리가 살아남기를 원한다면, 반드시 탄소가 토양으로 돌려보내져야 합니다. 수백 년 동안 효과가 있었던 방법을 사용하는 생물학을 통해 이 문제가 해결될 수 있다는 사실에 기대가 됩니다. 농부, 원예사, 주택 소유자 및 조경사 등 땅을 가지고 있는 누구든지

간단한 원리를 준수한다면 토양이 탄소를 되찾고 만물을 위해 음식, 아름다움과 건강을 공급하는 동안 대기가 재생되도록 자연이 마련해놓은 놀라운 시스템을 재건시킬 수 있습니다.