

COMMENT 03 DECEMBER 2018

# Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges

パリ気候協定を達成するために土壌にもっと炭素を蓄えよう。

*Take these eight steps to make soils more resilient to drought, produce more food and store emissions, urge Cornelia Rumpel and colleagues.*

干ばつに対して土壌にもっと抵抗性を持たせ、食料をもっと生産し、音質効果ガスの発生を抑制するためにこれらの8つの手段をとろう。

*Cornelia Rumpel* とその共同研究者たちの提言

Cornelia Rumpel,  
Farshad Amiraslani,  
Lydie-Stella Koutika,  
Pete Smith,  
David Whitehead &  
Eva Wollenberg

Share on Twitter Share on Twitter

Soils are crucial to managing climate change. They contain two to three times more carbon than the atmosphere. Plants circulate carbon dioxide from the air to soils, and consume about one-third of the CO<sub>2</sub> that humans produce. Of that, about 10–15% ends up in the earth.

気候変動を管理するために土壌は決定的に重要である。土壌は大気中の2倍から3倍の炭素を含有している。植物は大気中か

ら二酸化炭素を循環させ土壌に返している。また人間が発生するCO<sub>2</sub>の3分の1を吸収している。そのうちの10-15%は土壌中に移行する。

Carbon is also essential for soil fertility and agriculture. Decomposing plants, bacteria, fungi and soil fauna, such as earthworms, release organic matter and nutrients for plant growth, including nitrogen and phosphorus. This gives structure to soil, making it resilient to erosion and able to hold water. Typically, organic matter accounts for a few per cent of the mass of soil near the surface.

炭素はまた土壌肥沃度および農業のために必須である。分解中の植物、バクテリア、糸状菌およびミミズなどの動物相は植物生育に必要な有機物と窒素とリン酸を含めた養分を放出する。炭素は土壌に構造をもたらし、土壌を侵食されにくくし、水分保持能を増大させる。有機物は地表付近の土壌の体積の数%を占めている。

Increasing the carbon content of the world's soils by just a few parts per thousand (0.4%) each year would remove an amount of CO<sub>2</sub> from the atmosphere equivalent to the fossil-fuel emissions of the European Union<sup>1</sup> (around 3–4 gigatonnes (Gt)). It would also boost soil health: in studies across Africa, Asia and Latin America, increasing soil carbon by 0.4% each year enhanced crop yields by 1.3% (ref. 2).

世界の土壌の炭素含有率を毎年0.4%増加させると、ヨーロッパユニオンにおける化石燃料からのCO<sub>2</sub>発生量（3-4 Gt）と同じ量を除去することができる。このことはまた土壌の健康を増進させる。アフリカ、アジア、ラテンアメリカを通じた研究によ

れば、毎年土壌炭素を0.4%増加させることによって作物の収量を1.3%増加させることができた。

Yet one-third of the world's soils are degraded<sup>3</sup>. Poor farming practices, industry and urbanization take their toll. Throughout human history, 133 Gt of carbon have been lost from soils, adding almost 500 Gt of CO<sub>2</sub> to the atmosphere<sup>4</sup>. As the amount of organic matter dwindles, soils face mounting damage from erosion, heatwaves and droughts — it is a vicious circle. In the worst cases, nothing can be grown. This is what happened in the 1930s 'dust bowl' in the central southern United States. Improving soil carbon is now high on the political agenda. In 2015 at the Paris climate summit, France launched the 4p1000 initiative — to promote research and actions globally to increase soil carbon stocks by 4 parts per 1,000 per year. We are members of the scientific and technical committee for this initiative.

しかし、世界の土壌の3分の1は劣化を受けている。適切でない農作業、工業および都市化にその原因がある。人間の歴史を通じて133 Gtの炭素が土壌から失われ、500 GtのCO<sub>2</sub>が待機中に増加した。土壌中の有機物の量が減少するに伴って、土壌は侵食、熱波、干害などの被害にますます直面する。これは悪循環である。最悪の場合には栽培できる作物がなくなる。このことは1930年代に合衆国中南部で実際に起こったことで、"dust bowl"（砂嵐）と呼ばれている。土壌の炭素に関わる状態を改善することは現在高度な政策的な要請である。2015年の気候サミットで、フランスは4p1000戦略を開始した。この戦略は地球規模で土壌炭素の貯蔵量を毎年1000分の4増加させるために

研究と行動を促進するというものである。我々はこの戦略を進めるための科学的および技術的委員会のメンバーである。

In November 2017 at the Bonn climate conference in Germany, delegates established the Koronivia Joint Work on Agriculture programme. Tasked with helping farmers to reduce emissions and maintain food security in a changing climate, it will hold its first workshop this week at the annual summit of the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) in Katowice, Poland. — COP24

2017年11月にドイツで開催されたボン気候会議において、代表委員は農業プログラムについてのKoronivia Joint Work を設立した。農民たちが温室効果ガスの発生を抑制し変動する気候の下で食料の安全性を維持することを助けることを目的として、この委員会は今週最初のワークショップをポーランドのKatowiceにおいて国連気候変動枠組条約会議の年次サミットの中で開催される。

We call on countries involved in the Koronivia process to establish a body to monitor soil carbon in farmland, map changes to it and reclaim degraded areas. All involved should focus on the eight steps set out below.

我々はKoronivia プロセスに参加する国々に農地の土壌炭素をモニターする体制を整え、そのための変革を計画し、劣化した地域を回復させることを呼びかける。これに関わる全ての国（人）は以下に掲げた8つのステップに集中しなくてはならない。

## **Eight steps**

### 8つのステップ

The following practices would increase the amount of carbon held globally in soil:

以下の行動は地球規模で土壌中に保持される炭素の量を増加させる。

#### **Stop carbon loss.**

炭素の損失を止める。

Protecting peatlands is the first priority for keeping existing carbon in the ground. These hold between 32% and 46% of all soil carbon (an estimated 500–700 Gt of approximately 1500 Gt) in an area about half the size of Brazil. Each year they take up about 1% of the global CO<sub>2</sub> emissions generated by humans<sup>5</sup>.

泥炭地を守ることは地上に存在する炭素を守る上でまず最初に優先して行われなくてはならない。泥炭地は全ての土壌炭素の32%から46%を（およそ1500Gtのうちの500 - 700 Gtの炭素を）ブラジルの面積の約半分の地域に保持している。毎年泥炭地は人間が発生する地球規模でのCO<sub>2</sub>の約1%を吸収する。

Yet 10–20% of peatlands have been drained or burned and converted to agriculture, particularly in tropical areas. For example, fires used to clear land in maritime southeast Asia blanketed much of Indonesia in a toxic yellow haze during September and October 2015, emitting more CO<sub>2</sub> per day than the whole of the European Union. Globally, such destruction is using up 1–2 Gt CO<sub>2</sub> per year of the remaining emissions budget necessary to stay within the Paris climate targets. To protect this resource, governments must ban burning of

peatlands, stop their use in agriculture, or plan and enforce practices that preserve peat through continuous wet conditions. しかし、特に熱帯地域においては、10-20%の泥炭地が排水され、あるいは焼却されて農地へと変換されてきた。例えば、沿岸地域の東南アジアで土地を開拓するために起こされた火災は2015年の9月から10月にかけてインドネシアの大部分を有毒な黄色い煙で覆い、全ヨーロッパユニオンで発生するCO<sub>2</sub>よりも多くのCO<sub>2</sub>を1日あたりに発生した。地球規模では、このような破壊的な行いは1年間にパリ気候会議の目標値の枠内に留まるために必要なCO<sub>2</sub>発生制限量のうちの1-2 Gt のCO<sub>2</sub>相当分を使い込むことになる。この資源を守るために、各国の政府は泥炭地の焼却を禁止し、農業への使用をとりやめ、連続的な湿潤状態を保つことによって泥炭を保全するための行いを計画し実行することが求められる。

Degraded mineral soils also need to be restored by controlling grazing, applying green manure or growing cover crops. Between 10 million and 60 million square kilometres of soils are degraded — up to 40% of the world's land area<sup>6</sup>. Restored, these could take up 9–19% of global CO<sub>2</sub> emissions for 25–50 years, at rates of 3–7 Gt of CO<sub>2</sub> per year.

劣化した鉱質土壌もまた、放牧を制限し、緑肥を採用し、地上被覆作物を栽培することによって回復させる必要がある。1000万から6000万平方キロメートルの土壌が劣化しており、これは世界の土地面積の40%にも相当する。これらの土地を回復させるならば、これらの土地は1年間に3-7 Gt のCO<sub>2</sub>を吸収し、今後25-50年の間に地球規模でのCO<sub>2</sub>発生量の9-19%を吸収してくれるだろう。

参考：世界の農耕地面積は1億7300万平方キロメートル(11.6%)。2005年統計。

非農耕地（荒地）：15億 5000万平方キロメートル(88.38%)。

One global effort is making a start. The Bonn Challenge aims to improve 1.5 million km<sup>2</sup> of degraded and deforested land by 2020 (and 3.5 million km<sup>2</sup> by 2030) through conservation, recovery and sustainable management of forests and other ecosystems. It is overseen by the Global Partnership on Forest and Landscape Restoration, and is run by the International Union for Conservation of Nature.

地球規模での努力の一つはまず開始することである。ボン会議での挑戦目標は150万平方キロメートルの劣化した土地および伐採された土地を2020年までに（350万km<sup>2</sup>の土地を2030年までに）保全的と回復および森林およびその他の生態系を持続的に管理することによって改善することである。この計画はGlobal Partnership on Forest and Landscape Restoration によって監視され、International Union for Conservation of Nature によって実施される。

### **Promote carbon uptake.**

炭素の吸収を促進する。

Researchers need to establish a set of best practices for getting more carbon into soil. Proven techniques include making sure the soil is planted all year round, adding crop residues such as mulch and straw or compost, and minimizing tillage practices such as ploughing. In areas at high risk of erosion, contour

farming and terracing should be implemented. Agroforestry systems, hedges and wetlands can increase biodiversity and soil carbon. Planting nitrogen-fixing plants such as beans, alfalfa and oilseed rape reduces the need for mineral fertilizers, which can release nitrous oxide, a greenhouse gas that is around 300 times more potent than CO<sub>2</sub> (ref. 7).

研究者は土壌中により多くの炭素を取り込むための最良の方法を確立しなくてはならない。すでに効果が証明されている技術としては、作物が1年間を通じて土壌の上に作物が栽培されていること、マルチやワラやコンポストなどの作物残渣を加えること、例えばプラウがけなどの耕す作業を最少にすることなどである。侵食の危険性が高いところでは、等高線栽培やテラス栽培を行う必要がある。アグロフォレストリーシステムや生垣や湿原は生物の多様性と土壌炭素を増大させる。豆類やアルファルファなどの窒素固定植物やナタネを栽培することにより無機肥料の必要量を減らすことができる。無機肥料はCO<sub>2</sub>の300倍も地球温暖化係数の高い一酸化窒素を放出する可能性がある。

Soils need regular inputs of organic matter. Competing demands for crop residues (also used as fodder) or dung (also used in cooking or heating) can limit what is available. Shortages of other soil nutrients might reduce the capacity of plants to produce enough organic matter to restore all soils.

土壌には定期的に有機物を加える必要がある。作物残渣は飼料にも使用され、家畜糞は料理や熱源としても用いられるため、その需要が競合することにより、利用可能な量が制限される。その他の土壌養分の欠乏も植物が全ての土壌を回復させるために必要な充分量の有機物を生産するための能力を減少させる。



Regional strategies for increasing soil carbon need to be developed, taking into account local soil types, climates, rates of climate change and socioeconomic contexts. These will favour particular plant species and restrict certain practices. For example, burning stubble or straw for land clearance should be prevented in Asia and South America. Similarly, slash and burn of tropical forests should be avoided in Africa. In Europe, reducing mineral fertilizers and implementing agroecological practices would be effective.

土壤炭素を増やすために、土壤型や気候や気候変動の速度および社会経済学的背景を考慮しつつ地域的戦略を開発する必要がある。これらの戦略には特定の植物種が適しており、ある種の行動を制限する。例えば土地の開拓のために切り株やワラを焼却することはアジアや南アメリカでは避けるべきである。同様にアフリカでは熱帯林における焼畑は避けるべきである。ヨーロッパでは無機質肥料を削減し農業生態学的な行いをとることが有効である。

### **Monitor, report and verify impacts.**

効果をモニターし、報告し、検証する。

Researchers and land managers need to track and evaluate interventions. Large-scale, long-term frequent monitoring is costly. It involves extensive field surveys that collect hundreds of samples per hectare, with laboratory analyses costing up to US\$10 per sample. And to yield sufficient georeferenced data to capture small changes in soil organic carbon over time, it must continue for at least 10 years. Obtaining access to private land is one challenge. Another is a lack of technical expertise and knowledge, especially in developing countries.

研究者および土地の管理者は処置を追跡し評価する必要がある。大規模で長期多頻度にわたるモニタリングは費用がかかる。そのモニタリングには広域にわたる圃場の調査とヘクタールあたり数百の土壌試料を採集し1試料あたり10ドルも必要な実験室での分析を行う必要がある。私有地への立ち入り許可を得ることも課題である。もう一つの課題は特に発展途上国での技能と専門知識の不足である。

The Global Soil Laboratory Network (GLOSOLAN) is working to improve matters by harmonizing protocols and standards and setting up global training programmes in soil analysis. GLOSOLAN is part of the Global Soil Partnership run by the Food and Agriculture Organization of the United Nations.

地球規模土壌実験室ネットワーク(GLOSOWAN)は分析の手法と基準を調和させることによってこの問題を改善し、土壌分析における地球規模のトレーニングプログラムを立ち上げている。GLOSOWANは国連のFAOによって運営されるGlobal Soil Partnershipの構成部分である。

### **Deploy technology.** 技術を展開させる。

Advanced instruments make soil measurements cheaper, faster and more accurate. Portable infrared spectrometers will soon be capable of tracking multiple chemical signatures in soil, including carbon, for less than \$1 per sample. Harmonized methodologies, verification standards and common guidelines will be needed for all these devices. Satellite imagery is also essential for scanning wide areas. Researchers should design automatic procedures and algorithms for assessing soil carbon

content from space, or for predicting it from the characteristics of vegetation. These techniques should work whether soils are wet or dry, and for surfaces that are rough or smooth. They will require rigorous, ground-based verification.

進歩した機器は土壌分析をより安く、速く、より正確にする。ポータブルな赤外分析計により、もうすぐ土壌中の炭素を含めた複数の化学的特性を1試料当たり1ドル以下で追跡できるようになる。調和された方法と検証のための標準試料と共通のガイドラインがこれらの機器のために必要である。衛星画像も広い範囲をスキャンするために不可欠である。研究者は宇宙から土壌炭素を評価し植生の特徴から土壌炭素を予測するための自動化された手法と計算法を開発しなくてはならない。これらの技術は土壌が湿っていても乾いていても、また地表に起伏があっても平滑でも有効でなくてはならない。そのためには厳密な地上での検証が必要である。

### **Test strategies.**

戦略を検証する。

Computer models and a network of field sites<sup>8</sup> need to be developed to test the effectiveness of, say, avoiding ploughing. Farms should report their actions, verified by spot checks, field surveys or remote sensing. Data on soil types and meteorological variables will also need to be collected. Some open research databases exist: the Integrated Carbon Observation System measures exchanges of greenhouse gases across 120 experimental sites in Europe, for instance. But soil data need to be more transparent and accessible.

例えば耕耘をさけることの効果を検証するために、圃場諸地点のコンピューターモデルとネットワークを開発する必要がある。農場はかれらの行動を、地点のチェックと圃場調査あるいはリモートセンシングによって評価しつつ報告しなくてはならない。土壌型や気象学的な測定値も集めなくてはならない。例えばヨーロッパの120地点の試験地を通じての温室効果ガスを測定しデータを相互交換しているIntegrated Carbon Observation Systemのように、アクセス可能な研究用のデータベースが既に存在している。しかし、土壌についてのデータがよりわかりやすくアクセス可能にならなくてはならない。

### **Involve communities.**

コミュニティーを関わらせよう。

The public should be made more aware of the importance of soil organic carbon and of their ability to improve it on farms, in private gardens and public areas. Citizen-science approaches to collecting data, which are widely used in urban planning, for example, should be extended to soils. A good example is the earthworm population survey conducted by farmers across 1,300 hectares in the United Kingdom, which helped to assess farmland biodiversity (see also [J. L. Stroud \*Nature\* 562, 344; 2018](#)).

公衆に土壌有機物の大切さと農場や個人の庭や公共の場所で土壌有機物をふやすことが可能なことにより気づいてもらう必要がある。例えば都市計画で広く用いられているような、データを集めるための市民科学的手法を土壌に対しても広げる必要がある。この良い例は、United Kingdom の1300ヘクタールにわたる圃場の農民によって行われているミミズ生息数の調査であり、

この調査は、農地の生物的多様性を評価するために役にたっている（J. L. Stroud , Nature 562, 344; 2018）。

A global, open, online platform to collect and share soil carbon data needs to be established. It could be based on GlobalSoilMap, which was set up by scientists in 2009. Basing it on a widely used technology, such as a geographic information system (GIS), would broaden its reach and reduce the need for training. Such open platforms will be important in developing countries, where access to resources is limited.

土壌炭素のデータを集めシェアするための地球規模のオープンなオンラインプラットフォームを構築する必要がある。このプラットフォームは2009年に科学者によってセットアップされたGlobalSoilMapを基盤とすることができる。既に広く用いられている技術、例えばGIS、の上に構築することにより、そのデータに到達しやすくなり、またトレーニングの必要性を減少させる。このようなオープンなプラットフォームは特に資源へのアクセスが制限されているような発展途上国において重要になるだろう。

### **Coordinate policies.**

政策を調和させよう。

Political frameworks covering soils and climate change should work together. These include parties involved in SDG15 — the UN Sustainable Development Goal that seeks to halt and reverse land degradation by 2030 — and the UN Convention to Combat Desertification, which has targets and funding for stopping land degradation and managing land sustainably. Scientists should help countries to integrate soil carbon goals in their pledged emissions cuts to the Paris agreement. And the Koronivia programme should develop complementary targets for storing soil carbon.

土壌と気候変動をカバーする政策的枠組みは一緒に機能する必要がある。これらはSDG15 — 2030年までに土地の劣化を止め回復させることをめざす国連の持続的発展目標 — および土地の劣化を止め土地の持続性を管理するための目標と資金援助を行うための砂漠化と戦う国連の会議などの当事者を含んでいる。科学者たちはそれぞれの国がパリ合意を守るための温室効果ガスの削減プログラムの中に土壌炭素の目標も組み込むように協力しなくてはならない。そしてKoronivia プログラムは土壌炭素を貯留するための補完的な目標を開発する必要がある。

Targets and policies will be needed to reform agricultural practices worldwide, which will take decades. Farmers will need incentives to change their methods. Financial compensation could be given to cover costs and risks, for example. Researchers need a better understanding of geographical priorities, such as hotspots that combine harsh climates and vulnerable populations.

農業の行い方を改革するための目標と政策が必要であり、そのためには数十年が必要であろう。農民には彼らの方法を変更させるための動機が必要である。例えば費用とリスクを補うための財政的な補償を与えることができる。研究者は例えば厳しい気候と影響を受けやすい生物種をくみあわせたホットスポットなどの地理的な優先性についてより良く理解することが必要である。

**Provide support.**  
支援を提供する。

Policymakers should include soil carbon in emissions-trading schemes and carbon taxes. This will be harder than schemes for CO<sub>2</sub> because soil carbon is transient, unevenly distributed and harder to measure. Crop insurance and other services can offer premiums to farmers who have improved soil carbon. Carbon credits or discounts could be given for lands that are at risk of soil-carbon loss<sup>9</sup>.

政策決定者は土壌炭素を温室効果ガス発生のトレードの枠組みと炭素税の中に組み込む必要がある。このことはCO<sub>2</sub>についての枠組みよりも困難なものになるであろう。なぜなら、土壌炭素は変動しやすく、不均一に分布しており、測定がより困難であるからである。作物の保険やその他のサービスが土壌炭素の増大に貢献した農民にとっての優遇策となる。土壌炭素の損失のリスクがある土地においては、炭素のクレジットあるいはディスカウントを与えることができる。

Some governments have begun to act. India has distributed soil-health cards to 100 million farmers. These explain how to test soil for nutrients and choose fertilizers. China has banned agricultural fires and subsidizes farmers who return residues to fields<sup>10</sup>. The United States compensates farmers who remove cropland from production and increase areas of carbon-rich grasslands.

いくつかの政府は行動を開始している。インドは土壌の健康カードを1億人の農民に配布した。このカードは養分状態を調べるためにどのように土壌を試験するか、そしてどのように肥料を選ぶべきかを説明している。中国は農地を燃やすことを禁止し圃場に作物残渣を還元する農民には資金援助を行っている。アメリカ合衆国は作物栽培様の土地での生産をやめ、炭素に富む草地の面積を増加させた農民には補償を行なっている。

Development banks and investors should create global investment funds to support practices that improve soil carbon. These could be similar to the Moringa fund, which targets agroforestry projects in Latin America and sub-Saharan Africa.

開発銀行や投資家は土壌炭素を増やすための行いを支援するための地球規模での投資ファンドを創設させるべきである。これはラテンアメリカおよびサブサハラアフリカにおけるアグロフォレストリー計画としてのモリンガファンドとよく似たものである。

## **What next?**

その次に行うことは何か？

First, researchers, policymakers and land managers need to recognize that increasing soil carbon stocks and protecting carbon-rich soils is crucial for achieving the Paris climate targets and SDGs. Policy-focused organizations should convene a joint forum to coordinate action. This could be hosted by the 4p1000 initiative. Neighbouring countries should exchange experiences, develop common management strategies and make joint decisions on climate-change mitigation, adaptation and land degradation.

まず第一に研究者、政策決定者、土地管理者は土壌炭素の貯留量を増やし、炭素に富んだ土を守ることがパリ気候目標およびSDGを達成するために不可欠であることを理解する必要がある。政策を執り行う組織は行動を調整するためのジョイントフォーラムを企画すべきである。これは4 p 1000 イニシアティブによって主催されることができる。隣接する国々は経験を交換し、共通する管理のための戦略を開発し、気候変動緩和、環



境適応、土地の劣化などに関する合同的な決定を行うべきである。

Second, international funding agencies should set up a pool of several million dollars to address urgent research gaps, such as those identified by the 4p1000 initiative. These include: estimating the potential for soil carbon storage; developing targets and management practices; designing monitoring, reporting and verification strategies; and understanding basic soil-plant processes.

第2に、国際的な資金援助組織は例えば4p1000イニシアティブによって確認されているような緊急に研究の遅れている分野に対して数百万ドルの資金を用意すべきである。これらの分野には、土壌炭素の貯留の可能性を推定すること、目標と管理のための行動を開発すること、計画、モニタリング、報告、検証の戦略を計画すること、そして基本的な土壌と植物のプロセスを理解することなどが含まれる。

As the Koronivia summit begins, governments must pledge funds to bring together soil experts, donors and policymakers to act on soil carbon storage.

Koronivia サミットが始まるに際して、各国の政府は、土壌の専門家と寄付者と政策決定者が共同して土壌炭素の貯留のために行動できるように、資金の提供を約束しなくてはならない。

*Nature* **564**, 32-34 (2018)  
doi: [10.1038/d41586-018-07587-4](https://doi.org/10.1038/d41586-018-07587-4)

## *Pick up*

To protect this resource, governments must ban burning of peatlands, stop their use in agriculture, or plan and enforce practices that preserve peat through continuous wet conditions. Degraded mineral soils also need to be restored by controlling grazing, applying green manure or growing cover crops.

Proven techniques include making sure the soil is planted all year round, adding crop residues such as mulch and straw or compost, and minimizing tillage practices such as ploughing. In areas at high risk of erosion, contour farming and terracing should be implemented. Agroforestry systems, hedges and wetlands can increase biodiversity and soil carbon. Planting nitrogen-fixing plants such as beans, alfalfa and oilseed rape reduces the need for mineral fertilizers, which can release nitrous oxide, a greenhouse gas that is around 300 times more potent than CO<sub>2</sub> (ref. 7).

Soils need regular inputs of organic matter.

For example, burning stubble or straw for land clearance should be prevented in Asia and South America. Similarly, slash and burn of tropical forests should be avoided in Africa. In Europe, reducing mineral fertilizers and implementing agroecological practices would be effective.

Increasing the carbon content of the world's soils by just a few parts per thousand (0.4%) each year would remove an amount of CO<sub>2</sub> from the atmosphere equivalent to the fossil-fuel emissions of the European Union<sup>1</sup> (around 3–4 gigatonnes (Gt)). It would also boost soil health: in studies across Africa, Asia and Latin America, increasing soil carbon by 0.4% each year enhanced crop yields by 1.3% (ref. 2).