

## 可持续土壤管理：土壤学服务社会发展的挑战

潘根兴<sup>1,2</sup>, 程 琨<sup>2</sup>, 陆海飞<sup>2</sup>, 李恋卿<sup>2</sup>, 刘晓雨<sup>2</sup>, 卞荣军<sup>2</sup>, 张旭辉<sup>2</sup>, 郑聚峰<sup>2</sup>, 郑金伟<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>浙江农林大学环境资源学院, 浙江临安 311350; <sup>2</sup>南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

**摘要:** 国际土壤年唤醒了全社会对土壤变化的关注。地球环境与生命发育历史赋予了土壤自然资源资产价值, 提供了生命和生态系统发育的多种服务, 从而惠及全人类, 支撑了社会的可持续性发展。全球土壤的这种支撑能力建立在“体-质-量”统一的土壤属性基础上。然而, 在人类快速发展的驱动下, 全球土壤已经或正在发生十分普遍和严重的土壤退化, 土壤连续体遭到破坏, 土壤功能严重削弱, 且地表土壤覆盖被大面积固封。因此, 必须充分认识土壤变化对于人类长远发展的潜在风险, 着力构建可持续土壤管理体系, 致力于保持土壤自然资源资产价值、平衡和最大化土壤的生态系统服务、优化兼顾农业安全(粮食安全-环境安全-生态安全)的土壤利用与保护。保持土壤自然资源、保持土壤的生态系统服务和保持土壤对全人类的惠利应该纳入生态文明的土壤观。而管控土壤变化势必成为可持续土壤管理的核心任务。这需要在政策上, 推行生态补偿机制来处理利用者与受益者的利益关系; 在行动上, 实施区域土壤可持续管理工程, 应对土壤变化; 而在技术上, 创新兼效多赢的管理实践措施, 特别是有利于自然养育或恢复的土壤保护和培育技术。推进土壤可持续管理研究, 探索可持续土壤管理途径, 对于中国社会经济的可持续发展具有至关重要的意义。

**关键词:** 土壤资源; 生态系统服务; 人类惠利; 可持续管理; 土壤变化

## Sustainable Soil Management: An Emerging Soil Science Challenge for Global Development

PAN Gen-xing<sup>1,2</sup>, CHENG Kun<sup>2</sup>, LU Hai-fei<sup>2</sup>, LI Lian-qing<sup>2</sup>, LIU Xiao-yu<sup>2</sup>, BIAN Rong-jun<sup>2</sup>, ZHANG Xu-hui<sup>2</sup>, ZHENG Ju-feng<sup>2</sup>, ZHENG Jin-wei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Lin'an 311350, Zhejiang; <sup>2</sup> Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

**Abstract:** Critical concerns have been raised with the recognition of 2015 as an International Year of Soil. Global soil, as an end product of earth development over the geological epochs, conserves a natural capital from the natural resources, provided services for life well-being through its ecosystem functioning and delivers benefits for all people on the globe, thus sustaining the human society. However, these values of soil can only be viable with undestroyed soil pedon, soil quality and soil land cover in a global soil system. Yet, soil continuum is destroyed, soil functions are declined and soil land cover is sealed increasingly with the fast accelerating global soil degradation, driven by the rapid economic development. An integrated sustainable soil management (SSM) deserves to develop while public awareness of the great potential risks from these unprecedented soil changes is reached. Such an SSM will help to conserve natural capital, ecosystem functioning and human benefits, balancing soil value for agricultural production, environment protection and ecosystem conservation. Thus, conserving natural capital, ecosystem functioning and multiple benefits should be conceived as a new soil civilization, within particularly the framework of the eco-civilization proposed for China. Furthermore, a central foci of SSM will be to engineer soil changes. A national SSM will treat the interests trade between the land/soil users and beneficiaries through a policy mechanism of eco-subsidy, implement national and regional SSM projects

收稿日期: 2015-10-22; 接受日期: 2015-11-03

基金项目: 联合国生物质炭可持续土壤管理全球示范项目 (B4SS, GEF 2014)

联系方式: 潘根兴, E-mail: panggenxing@aliyun.com

proactively and develop technically innovative and multiple beneficial practices to recover degraded soil or conserve soil resilience, finally, researches to explore potential SSM approaches and technologies will be vital for social and economic sustainable development of China, facing very sharply soil changes and land cover changes.

**Key words:** natural capital; ecosystem services; human benefits; sustainable management; soil change

2015年是联合国第378届大会批准设立的首次国际土壤年,也是期待中达成气候变化国际新机制的关键一年,更是世界各国根据联合国千年发展目标规划各自可持续发展蓝图的关键性一年。联合国环境署和粮农组织召集了全球35位权威科学家专门评估世界土壤资源态势,将以专门的咨询报告提交联合国。该报告梳理了国际社会关注的大趋势特征,提出了土壤学应对全球土壤变化的科学挑战,呼吁全球关注土壤的可持续管理<sup>[1-2]</sup>。中国人口众多、资源短缺、环境污染、生态退化,在环境与人类可持续发展上面临巨大挑战。尽管随着技术进步和投入的不断增加,农业产量不断提高,食物生产和供应得到基本保障,但是土壤退化、生物多样性降低、土壤污染及水资源短缺,加上气候变化的影响等,威胁着中国农业的可持续性。当前,基于生态系统服务的资源环境管理已经成为中国生态文明建设的重要科学基础和国家战略需求<sup>[3]</sup>。因此,土壤的可持续性及其管理不但是保障农业可持续性,而且是支撑中国生态文明建设的重要科学问题及长远战略任务。

结合笔者参与的世界土壤资源态势报告的工作,本文主要阐述土壤可持续管理的科学基础,讨论世界和中国土壤资源变化,并由此提出中国可持续土壤(资源)管理的战略对策和途径,期望为深入推进中国生态文明建设和农业可持续发展提供参考。

## 1 土壤可持续管理:维持土壤的自然资源价值

### 1.1 土壤是人类最重要和宝贵的自然资源

在长期的地球地质演化中,通过岩石风化形成了土壤,从沙漠到冰原冻土,从蛇纹岩迹地到数百米厚的黄土高原,不同厚度和不同结构的土壤覆盖了地球表面,其丰富的生命物质、活跃的生物地球化学过程和极大的生物多样性使土壤成为区别于岩石圈、大气圈、水圈和生物圈的地球特殊圈层——地球土壤圈,提供了地球生命和生态系统发育的重要物质基础和支撑条件。全球土壤保持着与地球上人类活动有关的巨

大的碳氮水和生物库。其中,在土壤孔隙中保持的土壤水(soil moisture)估计达 $16.5 \times 10^3$ 亿吨(占地球总水量的0.001%,约占地球淡水资源的0.05%)<sup>[4]</sup>。通过全球观测系统观察,随着近20年来气候变化导致的土壤干旱化<sup>[5]</sup>,最近土壤水明显减少,但仍占全部淡水资源的0.02%。全球土壤碳库十分巨大,占陆地生态系统碳库的3/4,其中,以土壤中碳酸盐新生体存在于土壤剖面的无机碳库高达 $2 \times 10^4$ 亿吨,以各种有机质的土壤有机碳库达到 $1.5 \times 10^4$ 亿吨以上<sup>[6]</sup>。尤其是占陆地面积不到5%的北极和高海拔地区泥炭土,有机碳密度高达 $1450 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[7]</sup>,储存总有机碳库约5500亿吨<sup>[8]</sup>。在化学工业以前,维持植物生长的营养全部来自土壤元素的循环,土壤中保持的(有机态)氮素约1400亿吨<sup>[6]</sup>。全球土壤表土(0—30 cm)深度保持的总氮库达650亿吨,其中,微生物体氮素估计达26亿吨<sup>[8]</sup>。土壤有机氮资源储库差不多是全球氮肥总消费量(每年约1.08亿吨)的25倍<sup>[9]</sup>。

### 1.2 土壤是地球最后的生物资源库

除了碳氮水资源外,土壤还是地球上最后一个还未充分认知的生物物种资源库,蕴藏着地球上最大的生物多样性。全球土壤微生物生物量约占有机碳的1%,达到146亿吨生物量碳<sup>[10]</sup>,在0—100 cm土壤体,土壤微生物碳总计可达236亿吨<sup>[8]</sup>。可以认为,地球上最多的生物栖居于土壤,从生物体个数来说,1 g土的微生物数量达到10亿个水平,甚至可能多于地球上总人口,而从生物种群水平来说,全球土壤动物和微生物种群总数可能超过8万个,多于动物种和植物种。因此,土壤生物多样性是最后有待认识的土壤自然资产<sup>[11]</sup>。尽管土壤微生物是地球上生物的多数派(the unseen majority),但巨大的土壤生物库还是看不到、摸不清,而对于土壤微生物参与过程的认识还很浅薄<sup>[12]</sup>。

### 1.3 土壤自然体的自然价值属性

当然,土壤的自然价值是以这些物质的储库为基础的,但这些物质储库不是孤立的,它们都依附于或结合于土壤实体——土壤矿质基质及质地、土壤团聚体、土壤结构体与土壤孔隙系统、土层及其构成的土

壤剖面 and 土壤景观。因此，由土壤剖面-土壤景观-土壤覆被所代表的地球土壤自然体代表了土壤自然资本的空间属性。科学界将土壤自然资源划分为器质性资源属性（inherent properties）和机能性资源属性（dynamic property）<sup>[13]</sup>。前者是以固定的形态为特点，相对稳定，主要是以生物物理形态存在的土壤体系（矿物质、质地、结构和孔隙系统，土壤剖面 and 土壤景观系统）。后者是活跃的，随着管理和利用相对快速变化的资源属性。作为人类社会赖以生存和繁衍的自然资源，土壤是宝贵的、但又是易受干扰的自然资源，更是不可再生的自然资源<sup>[14]</sup>。因此，可持续管理土壤，就是将土壤的自然资源价值置于国家最高自然资本的高度，保持土壤的自然价值，不但是保持土壤的各种与人类活动和发展有关的自然资源库，而且更关注保持地表土壤覆被及其结构。土壤可持续管理的目的，是保持、增进和持续利用土壤的自然储库和所包含的自然价值<sup>[15]</sup>。衡量土地利用的可持续性，关键是衡量和评估土地利用方式是否克服了限制性因子，而保持和增进了土壤的自然资源资本价值<sup>[16-17]</sup>。

## 2 土壤可持续管理：保持和提升土壤功能与生态系统服务

### 2.1 土壤是人类获得生态系统服务与受益的基础

土壤可持续管理的科学基础还在于对土壤的过程、功能、服务及其支撑人类社会作用作用的全面认识。需要保持和提升土壤的各种功能，维持地球系统的运行和生态系统的运行，保持和提升土壤的生态系统的服务和人类从生态系统服务中获取的各种收益，使人类社会在可持续利用土壤中推进社会发展和人类福祉。地球上各类生态系统是生物量生产、气候调节、环境庇护和净化以及自然景观的形成和维持，是人类生存和发展的自然环境和环境屏障。人与生态系统是地球表层的最普遍关系，同时也是当前人类发展与自然的普遍矛盾。地球表层的各种生态系统提供着支撑、供给、调节及文化等多方面对人类的服务，这些服务共同构成了维持生物生产、生物健康与人类福祉的自然基础。同时，人类一方面从生态系统服务中得到收益，但另一方面又直接与间接地干扰生态系统而使生态系统服务受损。

理解土壤对人类的服务，首先在于土壤的重要性事关全球食物生产，至今为止人类食物来源 95% 直接来源于土壤。特别显得不可或缺的是，土壤作为环境

和气候的关键调节者对于地球生态系统的服务。例如，当前人为源总温室气体排放的 30% 来自土地利用的土壤温室气体排放<sup>[18]</sup>，而因土壤生物呼吸而分解土壤有机碳，全球每年向大气排放 500—750 亿吨 CO<sub>2</sub>-C，维持着地球系统的碳循环<sup>[19]</sup>。又如，全球农业温室气体减排潜力约占全球生物物理（biophysical）自然减排潜力的 20%，其 90% 可由土壤固碳潜力所贡献<sup>[20]</sup>，而中国人类源温室气体减排的 20% 可以通过土壤固碳来实现<sup>[21]</sup>。因此，通过合理土地利用和管理，可以增进土壤对全球社会可持续发展的服务，保证人类对自然资源利用与环境的和谐。

### 2.2 土壤生态系统服务的多样性与普遍价值

土壤更是地球上各种生态系统的自然基础，是各种生态系统存在、维持和演进的天然条件和生物屏障。土壤的过程及功能直接驱动或间接调节着地球上各类生态系统对于人类的服务<sup>[22]</sup>。地球上土壤通过其发育的特定空间结构（团聚体、土层、土壤剖面以及不同土壤组合形成的土壤景观），表现出支撑生物量生产，固存和转化养分、水分和污染物，保护生境、庇护生物和维持生物多样性，保持自然和文化景观以及人类遗产，产出天然矿物和有机材料，维持和稳定碳库（还包括水和氮等库）等 6 大功能<sup>[15]</sup>。这些土壤功能支撑了水分和养分涵养与蓄持，污染物钝化与废弃物降解，酸度、温度和热量的缓冲调节，碳的积累与固定以及生物多样性的保持等生态系统服务。但是，土壤的自然禀赋还在于，地球上不同族群、不同区域或不同世代的人类可以直接或间接地享受到这些土壤的生态系统服务的其中一种或几种受益。例如，在田间尺度上，土壤主要表现为对作物生产的作用，体现农业利用价值，而直接服务于农民和农业；但在流域和区域尺度上，土壤还表现为对水、污染物和生物的作用和对风景的作用，体现环境、景观和文化价值，保障了区域内不同族群提供得到生态系统的健康和享受服务；进一步在全球尺度上，土壤又主要表现为对碳库的固持和对气候变化的调节与控制，是对地球上所以族群的全人类、甚至不同利益集团的公共服务，即上升到全球土壤的普遍价值（图 1）。

这些不同的服务不是孤立或者可以割裂的，在不同的时间和空间是偶联或交集的。短期的或局地的土壤质量提升，往往有利于增进生态系统服务的长期和全局受益。例如，施用有机肥作为培育土壤肥力而增产的农田措施，提高农业生产能力且增加农民收益的同时，增加了土壤碳库，减少 N<sub>2</sub>O 等温室气体排放，

促进了土壤生物丰度<sup>[23-24]</sup>；反过来说，某些为了全局和公共利益的举措，在得到生态系统公共服务的同时，也提供了对当地农民和当前世代人类的生态系统直接服务。例如，秸秆改田间焚烧为炭化还田，消除了空气污染，减少了排放，但用于农田后大幅度提高了土壤肥力，且增进土壤生物健康，减少对生产资源的消耗，减少土壤的直接温室气体排放，减肥减药增碳增收，无疑有利于提高农民收入及其生活福祉<sup>[25]</sup>。反之，土壤管理可直接服务于全人类的生存及其福祉。亦即通过农业管理、环境管理、流域管理和产业及国际合作与协调，实现不同尺度的受益和服务的平衡，最终为全人类福祉服务（图 1）。

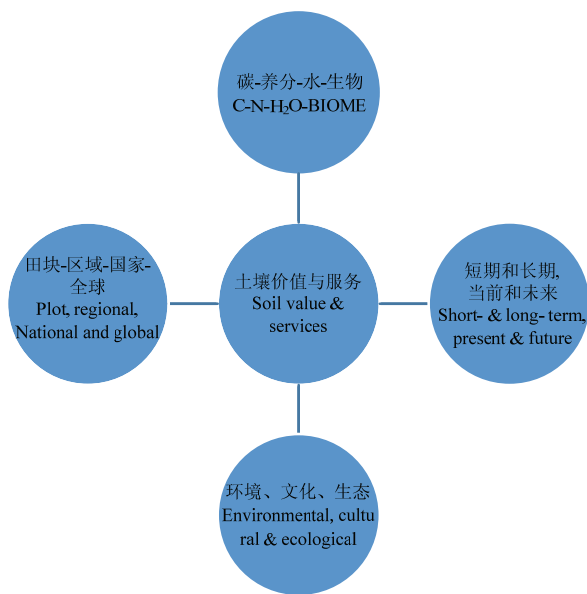


Fig. 1 Natural capita and ecosystem services at different temporal, spatial and ethic scopes

### 2.3 土壤利用可持续性: 提升生态系统的整体服务和全局受益

正是通过上述不同属性和不同时空的生态系统功能和服务，土壤不但发挥了其自然资产价值（例如碳氮水的储库和矿物材料供应），体现出经济价值（土壤肥力与作物产量），凸显了其生态价值（生物多样性和气候变化减缓），以及某种程度上的文化价值<sup>[7]</sup>。因此，保持良好生态系统服务的土壤功能及其变化，已成为土壤学和地学研究服务于社会可持续发展的新

热点<sup>[17]</sup>。一个好的土壤，既具有丰富的养分和水分而保障生物量生产，同时又具有调节气候、养育生物多样性以及人类良好的自然享受。从生态系统服务的角度，土壤的可持续性利用，应该是持续而平衡地提供各种生态系统功能和服务的能力及对全社会的福祉，这无论是时间尺度上还是空间尺度上（图 1）。应该清楚地认识到，许多土地利用，在获得短期的收益的同时，造成了对全球环境的负向反馈。例如，热带泥炭沼泽排水，开垦种植生物能作物（种植棕榈制取棕榈油），获得了良好的经济效益，但是成为土壤有机质分解而释放 CO<sub>2</sub> 的巨大排放源，在全球意义上可能得不偿失<sup>[26-27]</sup>。因此，作为良好的土壤管理，不但是维持现有的生态系统服务和土壤价值，而且应该是增进和提升总体土壤生态系统服务和价值的行为。

## 3 土壤可持续管理: 管控日益严峻的土壤退化趋势

### 3.1 农业和人类利用对地球土壤覆被的改造和干扰

土壤是农业的基石<sup>[7,28]</sup>，更是社会可持续发展的关键自然资源<sup>[22,29]</sup>。纵观人类历史，人类与土壤的关系一直贯穿着农业发展与食物供应，影响着人类文明进程。地球环境-农业生产-人类生存的紧密关系凸显了土壤作为农业基石的基础地位<sup>[7]</sup>。土壤和水资源的利用深刻地改变了农业社会人类文明的发育、延续、衰退和重生<sup>[30-31]</sup>。历史来看，全球农业相对是较近的人类文明革新，发生在距今 10—12 世纪<sup>[32]</sup>。人类完成首次农业革命，用了不到 200 年的时间，这在人类历史长河中仅占 0.3% 的进程。过去千年以来，从农业社会分化出了高度复杂的城镇文明<sup>[33]</sup>。在这个进程中，通过人类智慧及其创造的技术的不断进步，高强度地利用了土壤和水资源从而维持了农业和牧业，尽管它们只是少数几个物种的生物生产。不过，农业塑造和维持了人们的社会和生活，但也造成了对土壤和水资源的破坏。认识、评估和管理农业对土壤自然资源的损失和生态系统服务功能的受损，即对土壤、环境和气候的足迹是探索可持续农业的科学任务，也是人类社会可持续发展的要求<sup>[7]</sup>。

各类生态系统覆盖着 62% 的地球陆地面积。直至今日，农业及其他人类活动已经遍及 7 000 多万 hm<sup>2</sup> 的地球陆地，也就是说冰雪覆盖以外地球陆地面积的一多半已经为农业利用或与农业有一定关联的产业所利用<sup>[30]</sup>。耕作土壤而生产粮食的土壤面积已占地表面

积的 24%，加上饲养牲口的管理草地已经占了地表的 40%，与目前的森林面积相比，相当于约占陆地面积的 13%，而森林和草灌覆盖占陆地面积的 37.5%。相比之下，城镇化占地已达全球陆地面积的 1%<sup>[31]</sup>。与伴随农业发展的城镇化和工业化，固封了占全球 1% 陆地面积的土壤，同时也改变了地球土被的结构，改变了土壤与生态系统的依存关系，进一步加大了耕地的生产压力，集约化的土壤利用更强烈地改变了土壤的功能与生态系统服务。

### 3.2 全球土壤退化总体趋势

在人类活动和农业的强烈开发和强度利用下，世界范围内广泛发生着各种类型的土壤退化，最主要和普遍的是森林和湿地（包括泥炭地）土壤退化、土壤酸化、土壤盐碱化、土壤旱化、土壤薄层化和土壤紧实化以及土壤生物退化（例如连作障碍）等，不但改变甚至破坏了土壤的基本结构及物质基础，极大地削弱了土壤的碳氮水库和生物的自然资源库，而且使生态系统服务功能严重受损，全球土壤生产力和环境容量的可持续压力和风险与日俱增，关系到未来 90 亿人口的地球是否能可持续发展<sup>[1]</sup>。

现代农业技术的进步，高产农业的普及往往导致土壤的退化。迄今为止，农业耕垦造成了强烈的土壤侵蚀，全球已经丧失了约 500 万  $\text{hm}^2$  的耕地。全球土壤退化面积约占利用面积的 20%，即全球存在着  $1.5 \times 10^7 \text{hm}^2$  的土壤面积已经处于不同程度的退化。据最新估计<sup>[1]</sup>，在全球退化土壤面积中，一半以上（57%）发生在农业土壤（约 1/3 的退化面积分布在耕地和 1/4 左右的退化面积分布于草地）。相对地，植被覆盖面积远多于农业利用面积，但退化森林土壤只占全球退化面积的 42%。加上 20 世纪以来快速的城市化对土壤的占用和固封，已经深刻地改变了地球土壤的覆被结构，严重削弱了全球土壤的价值和功能。

土壤退化制约了土壤的生态系统服务功能和价值。农业的投入物、农业的废弃物、农业的机械和灌溉等活动都对环境和生物系统造成了破坏。过量使用的化肥，尤其是氮肥，是农业面源污染和水体富营养化的主要来源。在太湖地区，种植业和养殖业占营养盐面源污染曾高达 60%（2010 年调查估计）；农药和兽药的不合理及过量使用，使这些有机残留成为风险性化合物，迁移于人类的环境中，特别是抗生素等成为新型污染物残留于土壤并进入水体。农业机械耕作管理导致土壤紧实、封闭，土壤持水力及透水性、入渗能力降低，而农业灌溉导致了稻田大量甲烷的排放，等等。未来几十年内，全球人口的急剧增加和日益严峻的气候变化，无疑将大大加剧土壤退化的威胁，导致生态系统服务严重衰退，进一步影响全球生物地球化学循环及气候变化<sup>[2]</sup>，对全球社会可持续发展产生深刻影响。毋庸置疑，土壤保护和功能恢复不但是应对气候变化，而且是应对社会可持续发展风险的全球挑战<sup>[34-35]</sup>，这是可持续土壤管理必须应对的严峻挑战。

### 3.3 中国土壤退化特点及其风险问题

包括草地畜牧业和耕地在内的中国农业利用土壤面积已经占到陆地国土的一半以上（表 1），除了沙漠以外，几乎全部的陆地已经利用。与全球土壤利用结构相比，中国森林土壤和湿地土壤与农田面积的比例是 2 : 1，全球森林和草被覆盖土壤面积与农田面积的比例为 3 : 1；中国城镇化建成区土壤占用国土面积的比例高达 3.6%，而全球平均仅 1%。显然，中国土壤利用结构削弱了土壤的生态系统功能及其对国家的生态服务，特别是农业活动覆盖了广大的生态脆弱区，因而导致了严重而普遍的土壤退化，构成了十分严峻的生态安全和环境安全态势（表 2）。这种土壤利用结构的突出特点应该在中国生态文明的区域推进中予以充分考虑。

表 1 中国土壤利用构成

Table 1 Basic soil cover pattern of China

土壤利用 Soil utilization	面积 Area (Mhm <sup>2</sup> )	占利用土壤 Fraction to total utilized soil area (%)	参考文献 Reference
森林 Forest	208	25.0	[36]
草原 Grassland	398	47.9	[37]
湿地 Wetland	53.6	6.45	[38]
农田（耕地） Farmland (farmland)	135	16.2	[39]
建设用地 Construction land	36.9	4.44	

耕地中，水田面积 24.5 Mhm<sup>2</sup>；果园 13.2 Mhm<sup>2</sup>；设施大棚 3.86 Mhm<sup>2</sup>

In farmland, paddy field area is 24.5 Mhm<sup>2</sup>, 13.2 Mhm<sup>2</sup> in orchard, 3.86 Mhm<sup>2</sup> in greenhouse

表 2 中国土壤退化态势

Table 2 Current status of soil degradation of China

土壤退化类型 Soil degradation type	现有面积 Existing area (Mhm <sup>2</sup> )	趋势 Trend	参考文献 Reference
水土流失面积 Soil erosion area	356	年流失 50 亿吨土壤 Loss of 50×10 <sup>8</sup> tons of soil per year	[40]
耕地毁损 Farmland damage	7.5	年约 50 万 hm <sup>2</sup> Around 50×10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> per year	
土壤沙化 Soil desertification	173	年减少 12.9 万 hm <sup>2</sup> 12.9×10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> recovered per year	[41]
土壤酸化 Soil acidification	20.4	近 30 年农田 pH 平均下降 0.8 单位 pH decline by 0.8 units over the past 3 decades	[42]
土壤污染 Soil pollution	10 (重度和中度污染占 1/3 1/3 being severe and moderate polluted)	1/5 耕地重金属污染, 总体点位超标率 16% 20% of farmlands contaminated with metals at probability of 16% over the guideline values	[43]
次生盐碱化 Secondary salinization	670		

中国快速发展的城镇化还诱发了对土壤利用的更深层次改变。高度集中的动物养殖业成为依托和服务于城镇的集中产业, 脱离了与农田的养分循环耦合关系; 与此同时, 污染的河流和湖泊不再是水产业的主要来源, 代之以越来越多的人工池塘养殖, 肥沃的稻田被改造为鱼池蟹塘, 稻田日益丧失环境净化、气候调控的功能; 一年数季生产、一亩数吨产量的蔬菜大棚, 亩施化肥和有机肥数吨—数十吨, 使土壤不再能自然休养生息, 盐碱化、酸化、硝酸盐、重金属、农药和激素残留大量积累于土壤, 土壤连作障碍频生, 土壤生物活性顿失, 是农业高投入和高产出情况下损害土壤功能与可持续性的极端事例<sup>[44]</sup>。同时, 农业种植越来越高强度和集约化, 为维持农田高生产力, 环境足迹日益高攀, 环境损益日增。例如, 中国农田土地利用的碳足迹由 1993 年的 2.53 t CO<sub>2</sub>-e·hm<sup>-2</sup> 递增至 2007 年的 3.15 t CO<sub>2</sub>-e·hm<sup>-2</sup> <sup>[45]</sup>。1992—2011 年的 20 年间, 中国氮肥使用量由 17.56 Mt 增加到 23.81 Mt, 氮肥的偏生产力降低到每千克氮肥不到 20 kg 收获产量, 氮肥引起的温室气体排放占农田碳足迹的 60%—90%, 导致全国农田氮肥温室气体排放高达 181 Mt CO<sub>2</sub>-e (平均 2 t CO<sub>2</sub>-e·hm<sup>-2</sup>) <sup>[46]</sup>, 巨大的氮肥施用引起的氮素活化及其对全球环境的负面影响已经成为中国农业的诟病<sup>[47]</sup>。

当前, 地球已经踏入人类活动强烈改变地球和生命的人类纪, 全球环境系统处于强烈的变化中, 这些普遍和深刻的变化主要表现为地球人口巨大且快速增长, 暖干化为特征的全球气候变化、生物多样性的丧失、氮磷活化与水体富营养化、水资源短缺、海洋酸化、环境污染、臭氧层变薄、过度渔业及森林砍伐<sup>[48]</sup>。这些问题多数与全球土壤利用导致的变化

密切相关<sup>[49]</sup>, 且可能通过交互作用进一步驱动更大空间更长尺度的变化 (图 2)。例如, 农田的重金属污染, 在削弱农田生产力的同时, 抑制土壤生物活性, 降低土壤生物多样性, 且可能严重削弱土壤的碳化功能, 进而影响气候变化<sup>[50]</sup>。不当的土壤开发导致的土壤退化, 将严重削弱生态系统服务, 进而削弱了对人类社会的支撑能力, 影响人类的福祉。如中国西南岩溶地区, 土壤侵蚀退化导致广泛的石漠化, 那里分布着全国最多的贫困人口。因此, 面对十分严峻的土壤退化及其潜在的生态和环境安全风险, 国家层面的可持续土壤管理应运而生。其宗旨就是管理和处置土壤变化, 保证某种土地利用避免过度削弱土壤的功能, 避免环境效益严重亏损, 避免与其他生态系统服务和人类收益相冲突。因此, 管控土壤退化 (engineering soil changes) 成为时下可持续土壤利用和管理的核心任务。

#### 4 可持续土壤管理: 科学需求与政策及措施

在人类对于自然的干扰日趋普遍和强烈, 土壤退化日益蔓延, 土壤利用的环境损益日益显现, 环境安全、生态安全日趋恶化, 人类社会可持续发展奉献日益增加的当前, 土壤可持续利用已经不仅是农业的挑战, 更是国土资源永续利用的长远挑战。建立在保持土壤资源的自然价值、提升土壤的生态系统服务与维持土壤对全人类福祉的基础上的土壤可持续利用, 不仅是处理当前资源环境与社会发展关系的重大需求, 更是处理区域发展与全局发展、当代发展与后代发展关系的重大和关键需求。探索和保障土壤可持续利用

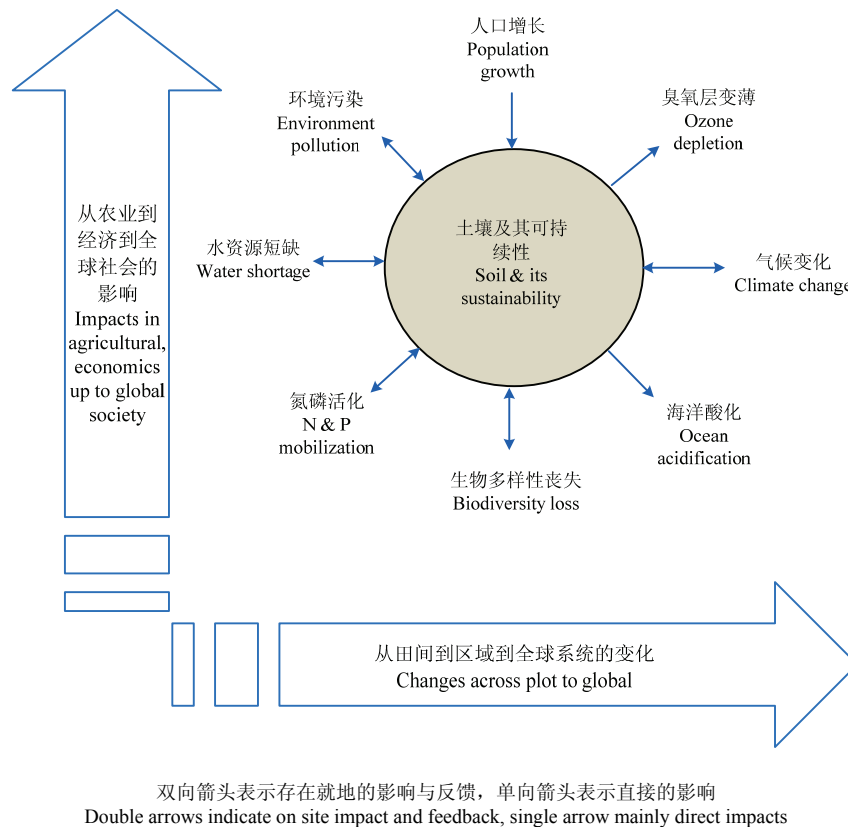


图2 土壤变化与全球环境变化的联系及反馈

Fig. 2 The potential links between soil changes and global environmental changes

迫在眉睫。迫切需要一个系统的、整合的和长远的国家土壤可持续土壤管理体系。

#### 4.1 土壤可持续利用与生态文明观

全社会必须充分认识土壤的自然资源价值、土壤的生态系统服务价值和对于全人类的普遍受益，这是土壤生态文明观的重要基础。国家颁布的《生态文明体制改革总体方案》已经奠定了自然资源生态文明观的国家思想和根本原则。土壤的生态文明观，首先是土壤的自然资源价值及其不可再生性意识，任何对土壤的强烈干扰和快速损害是人类地球环境可持续性的亏损；其次，是土壤对于生态系统和环境系统的多功能、多（生态系统）服务和多收益意识，片面地或者过度地利用某一种功能或服务或收益可能严重削弱其整体功能和服务以及对全人类的普遍收益；其三，是土壤利用的风险意识和管控土壤变化的急迫性意识。土壤变化具有潜伏性与不可逆性。由于土壤是矿物质、有机质、生物质高度复合和关联的复杂生态系统，任何干扰都会通过土壤这个复杂系统中相互作用而使土壤过程、功能与服务出现复杂变化，通过长期的积累

和演进而导致地球表层系统过程或功能的激变甚至可能是灾难。人类措施可以快速改变或者恢复地表或土壤结构，但是极难恢复生态系统功能及服务。例如，石漠化治理中植被可以在较短时间内恢复，但并不能显著地提升土壤质量与功能<sup>[51]</sup>，因而短期内并不能恢复生态系统服务及其对社会的支撑能力。树立一种土壤可持续利用的生态文明观，是指导中国社会可持续发展的长远需求。保持土壤覆盖、提升土壤功能、优化土壤服务、保障资源永续应该成为中国土壤（资源）可持续利用与管理的基本国策，在国家生态文明建设中予以体现和贯彻。

#### 4.2 建立土壤可持续利用的国家政策及社会协调机制

国土资源不但是国家、社会的经济活动空间，更是中华民族未来可持续发展的自然资源储备与生态环境屏障。合理的土壤资源利用与开发，应该妥善处理农业需求与生态（系统）服务、环境（缓冲）服务的关系，土壤的可持续利用，就是需要建立一种兼顾农业、生态系统与环境损益的平衡（图3），

保证土壤资源的最大价值和服务在社会不同产业、国家不同区域、人口的不同世代间共同但有区别地享有受益。

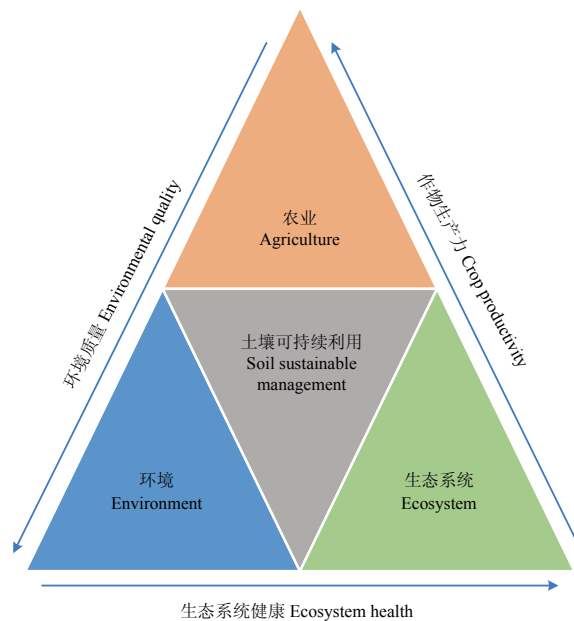


图 3 土壤的可持续利用中心概念—平衡土壤的农业生产能力、环境缓冲与生态系统维持

Fig. 3 Sustainable soil use-balancing agricultural production, environmental buffer and ecosystem services

农业是国家的基础产业，也是最直接利用土壤、获取土壤生态系统收益的产业部门。当前中国仍有 1.35 亿  $\text{hm}^2$  耕地<sup>[39]</sup>，农业土壤支撑着 85% 以上的中国粮食保障。一方面中国农业土壤十分有限，资源面积开发空间已经捉襟见肘；另一方面过度开发土壤资源作农业利用，可能对于生态系统服务价值来说得不偿失。20 世纪 90 年代末以来退耕还林、退耕还草，是保持土壤生态系统服务的国家意志的真实体现。在处理土壤资源的全局服务价值和规划国土利用时，将土壤的国家价值与平衡利用观念作为国家政策基点落实到土壤资源的产业利用和区域利用的规划和布局上。当前，“红线”（2014 年中央电视台 CCTV-12 特别节目《红线-水、土地、雾霾、碳排放、湿地和森林》）意识已经成为中国生态文明建设的重要原则，仍需切实将“红线”意识落实在土壤的产业和区域利用上。中国已经设置了严格的基本农田保护“红线”，同时启动建设中国生态补偿机制<sup>[52]</sup>。还应尽早在生态

脆弱区、水资源源头区及气候变化关键区设置土壤农业、牧业开发利用的红线，包括予以开发数量的面积红线、区域开发布局的空间边界红线和开发利用强度红线限制，研究探讨区域间生态补偿的国家机制，对土壤资源保护予以合理补偿。此外，尽管保障耕地的农业生产事关国家粮食安全，但在农业生产的同时，保护土壤而提升土壤功能和服务的农业利用，也应该予以生态补偿。例如保障基本生产的同时增加碳汇、减少污染的农业利用，应该通过诸如碳交易机制进行补偿。中国已经建立了区域碳交易中心，如何完善这种利益补偿机制，促进土壤资源在产业、区域间的平衡和优化利用仍然是国家政策和协调机制需要解决的问题。

### 4.3 管控土壤退化

土壤退化已经是人类活动对全球环境影响最深刻和最普遍的全球挑战之一。21 世纪初以来，美国、爱尔兰、英国和苏格兰以及澳大利亚等西方国家相继出台了国家规划或法规，实施管控土壤退化、保护其土壤资源的国家计划。2006 年，欧盟提出了覆盖全欧的土壤治理战略框架<sup>[15]</sup>。在该框架下通过对全欧土壤退化态势的调查，开展了对土壤退化的风险评估，提出了治理土壤退化的目标，进而开始实施第七期土壤-环境行动计划（7<sup>th</sup> Environment Action Program）。21 世纪以来，中国相继开展了国土生态地球化学调查、土壤污染调查、土壤侵蚀（遥感）调查和石漠化调查监测，基本明确了集中于西南喀斯特地区的石漠化、集中于东南地区的土壤酸化、集中于东部工业发达地区和中东部矿业开发地区的土壤污染、东北的黑土退化等区域分布性土壤退化和农业土壤的污染和肥力衰退等重大问题。近年来，国家相继颁布了《岩溶区石漠化综合治理规划大纲（2006—2015）》<sup>[53]</sup>、《国家环境保护“十二五”规划》<sup>[54]</sup>、《全国生态脆弱区保护规划纲要》<sup>[55]</sup>、《保护性耕作工程建设规划（2009—2015 年）》<sup>[56]</sup>、等有关土壤治理工程建设规划，特别是自本世纪初以来实行的“退耕还林还草工程”<sup>[57]</sup>在土壤保护及恢复提升土壤资源价值家生态系统服务上取得了显著成效。最近，国家又推出《全国水土保持规划（2015—2030 年）》<sup>[58]</sup>和《全国农业可持续发展规划（2015—2030 年）》<sup>[59]</sup>，环保部又将推出土壤污染防治行动计划<sup>[60]</sup>。如何通过这些计划的实施，整合土壤保护和治理的各方面工作，全面提升土壤资源利用的国家利益和社会利益是中国土壤可持续管理的新机遇。值得肯定的是，中国农业在粮食生产



连续十连增的基础上, 将更加侧重于资源-环境-生态的协调发展, 从监管机制、价值机制和补偿机制建设上推进中国农业可持续发展。这些规划从规定了国家层面的方向、布局和推进策略, 将在较长时期指导中国土壤的可持续利用<sup>[59]</sup>。

但是, 如何监管中国土壤退化、如何有效控制土壤退化以及如何高效治理土壤退化仍然是当前面临的重大挑战。在科学技术范畴, 如何整合构建面上的国土地球化学监测、环境监测和农田土壤肥力动态监测、生态系统长期试验观测及当前正在推进的地球关键带观测为土壤可持续性国家监测体系, 全面监控中国土壤退化, 进行国家尺度土壤退化态势的及时评估及其风险的综合评价, 是将上述规划落实到国家行动的基础科技工作。监测技术体系、评价标准和方法、风险构成及阈值以及报告与发布机制等工作, 是当前管控土壤变化的基础性科技需求。特别是, 资源和服务定价机制和生态补偿机制, 要求客观和充分地认知土壤的价值和生态系统服务收益, 急迫需要发展基于生命周期评价法的环境损益和生态系统服务综合评价体系<sup>[61]</sup>。只有做到了充分认识土壤的生态系统服务并能进行定量评估时, 才能合理进行生态补偿。

管控土壤退化, 尚有许多空白或薄弱之处。如何管控中国土壤的城市化固封 (urban sealing), 如何管控稻田土壤的非农利用? 快速城镇化中大面积土壤被建成区固封, 在利用了土地 (面积) 的同时, 土壤被固化而脱离了碳氮水的地球系统循环, 也剥夺了这部分土壤对人类的生态该系统服务和受益<sup>[62]</sup>。建成区土壤固封是全球土壤功能退化的一大突出现象<sup>[1]</sup>, 但中国的情况尤为突出。近 10 年来, 中国城市化快速, 土地被占的速率超出城市人口增长速率约 20 个百分点, 现在土地的非农化速度大约是人口非农化速度的 2.29 倍。至 2013 年, 全国批准在建的城市新区总面积超过 7.3 万  $\text{hm}^2$ , 是 2010 年全国城市建成区面积 (3.18 万  $\text{hm}^2$ ) 的两倍<sup>[63]</sup>, 将新增 4.1  $\text{Mhm}^2$  土壤面积被固封 (相当于 2009 年浙江全省耕地面积 1.9  $\text{Mhm}^2$  的两倍), 尽管可能通过置换补偿而保持耕地的总量平衡, 但还是永久失去了如此大面积的土壤覆盖。因此, 呼吁国家严格管控新城区无序扩张, 减少土壤被永久固封, 并制定相应政策鼓励城市土壤的生态覆盖。

另一个需要管控的土壤利用变化是南方稻田的快速丧失。稻田是中国重要和特色的农业资源, 长江中

下游、杭嘉湖地区和珠江三角洲地区的稻作文明历来是中国农业文明的代表, 历史上支撑着国家粮食安全和税收。与世界各地旱作农业文明相比, 稻作文明数千年来不曾衰退。但是, 这些地区快速的工业化和城镇化, 蚕食了稻田。浙江省素有“七山二水一分田”之称, 20 世纪 80 年代稻田面积 1.84  $\text{Mhm}^2$ , 目前尚存 1.33  $\text{Mhm}^2$ <sup>[64]</sup>。江苏省常州市, 2004 年尚有稻田面积 18.4 万  $\text{hm}^2$ , 至 2014 年仅剩 8 万  $\text{hm}^2$ 。珠江三角洲的中山市, 目前人口 300 余万, 但仅剩 1.5 万  $\text{hm}^2$  稻田。即使是尚存的稻田, 也在不断地被开挖成鱼塘蟹池, 千百年来培育的肥沃稻田毁于一旦。诚然, 水产养殖的农民收益远远高于植稻, 但是稻田作为特殊的生态系统的湿地环境功能和气候调节功能一去不复返。如何评估这种土地利用的生态系统服务受损, 如何认识这种土地利用转变的环境损益, 尚未有科学回答, 更还没有引起政府的重视和管控。

#### 4.4 构建新型土壤管理技术体系, 实现土地利用的多赢

管控土壤退化, 实现土壤可持续利用, 没有灵丹妙药。人为活动的驱动因素、对土壤的干扰特征、发生的土壤过程及其环境损益与生态系统效应因土壤退化类型而不同。从土壤学意义上, 保护性耕作和有机农业, 是被证明可以保持和提升土壤质量, 特别是生物学质量, 但是单位生产力的制约和农业的多熟制限制了其不能全面推广。通过生物工程、农林结合和资源协调利用的生态系统调适和构建资源适应性、气候变化适应性和环境安全型新农业可能是未来土壤可持续利用的发展方向<sup>[65-66]</sup>。所幸, 从土壤自身来说, 存在一种或若干种关键属性的土壤功能调节机制, 可以减缓或抵御干扰的破坏, 而增强土壤的可持续利用能力。至少, 土壤有机质是一个调节土壤功能、抵御土壤退化而维持生态系统服务的关键属性<sup>[67]</sup>。通过土壤团聚体等有机碳与矿物质-微生物的相互作用调适, 在长期的形成和发育中土壤有机质的积累造就土壤固定碳库<sup>[68]</sup>, 但这种碳固定不但不与生物利用抵触, 反而可能促进生物活性<sup>[69]</sup>, 而不断提高土壤功能活性, 而增强自身的可持续性。通过合理的管理措施提高土壤有机质含量, 不但是中国农业固碳减排的主要途径<sup>[70]</sup>, 还可以带来土壤更高的农业生产力、更高的肥料利用率以及保墒增墒、缓冲酸化和减缓污染损伤等良好生态系统服务<sup>[24]</sup>。因此, 提升土壤有机质水平可能是土壤可持续利用的关键途径之一。

自然土壤中, 土壤有机质是生命活动残余物(residues)循环于土壤的产物。在产业化农业条件下, 农业生物质废弃物循环于农田是提高土壤有机质的必由之路。一方面, 改造农牧分离的常规农业, 重建农牧结合的新型农场结构, 使秸秆经过饲养动物转化成为厩肥就地还田, 可能是农业可持续发展的新方向。另一方面, 因为秸秆直接还田的困难, 在农业区构建秸秆收集-热裂解炭化-生物质炭还田技术体系, 秸秆等废弃物成为新的有机质重回农业循环。已经证明, 生物质炭还田具有固碳减排、污染物钝化、减肥减药和保墒增墒的多种生态系统服务效益, 展现循环、低碳、安全等多赢的农业废弃物炭化产业化新方向, 不但提供了有机培肥新途径, 而且将废弃物处理、秸秆禁烧、土壤质量提升和农产品安全生产有机结合, 可望再造新的绿色农业<sup>[25]</sup>。作为落实联合国倡议国际土壤年的实际行动, 联合国环境署(UNEP)通过全球环境机制(GEF)启动实施“生物质炭土壤可持续治理”全球示范项目<sup>[71]</sup>。中国农业部也在计划分步实施秸秆炭化还田, 探索秸秆处理和土壤可持续利用的有机结合。这十分符合中国已颁布的《农业可持续发展规划 2015-2020》的国家目标。

## 5 结语

当前, 全球环境问题日益凸显, 可持续发展挑战日益严峻。土壤作为人类最基本和最重要的自然资源, 其可持续性将影响人类社会的福祉和永续生存。科学界有责任向社会和公众全面推介土壤的资源价值和生态服务收益。可持续利用和管理土壤, 应该更关注土壤的资源价值、土壤的生态系统服务和对全社会的收益。管控土壤退化, 不仅是农业的基本任务, 更是国家安全和持续发展的长远任务。人类的智慧, 不仅仅是如何利用土壤而获取收益, 而且更应该是如何保障土壤的功能和服务, 保障土壤对全社会、全人类的持续受益。特别地, 农业在保障农业生产和保障粮食安全的同时, 着力于促进和提高土壤的质量和与健康, 为平衡和优化土壤的生态系统服务, 实现人类对土壤的可持续利用。今后的土壤可持续管理, 需要构建面向农业-环境-生态协调发展的多赢和集成技术体系。这方面尚有许多科学技术问题亟待解决。

## References

- [1] Smith P, House J I, Bustamante M, Sobocká J, Harper R, Pan G, West P C, Clark J, Adhya T, Rumpel C, Paustian K, Kuikman P, Cotrufo M F, Elliott J A, McDowell R, Griffiths R I, Asakawa S, Bondeau A, Jain A K, Meersmans J, Pugh T A. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 2015, doi: 10.1111/gcb.13068.
- [2] Smith P, Cotrufo M F, Rumpel C, Paustian K, Kuikman P J, Elliott J A, McDowell R, Griffiths R I, Asakawa S, Bustamante M, House J I, Sobocká J, Harper R, Pan G, West P C, Gerber J S, Clark J M, Adhya T, Scholes R J, Scholes M C. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. *Soil Discussions*, 2015, 2(1): 537-586.
- [3] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 北京: 高等教育出版社, 2013. Fu B J. *Ecosystem Services and Eco-Security*. Beijing: Higher Education Press, 2013. (in Chinese)
- [4] Gleick P H. *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press, 1993.
- [5] European Space Agency. Over 30 years of global soil moisture observations for climate applications. 2012. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/SMOS/Over\\_30\\_years\\_of\\_global\\_soil\\_moisture\\_observations\\_for\\_climate\\_applications](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS/Over_30_years_of_global_soil_moisture_observations_for_climate_applications).
- [6] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [7] Parikh S J, James B R. Soil: The foundation of agriculture. *Nature Education Knowledge*, 2012, 3(10): 2.
- [8] Xu X, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749.
- [9] Heffer P, Prud'homme M. *Fertilizer Outlook 2013-2017*. International Fertilizer Industry Association (IFA). 2013. [http://www.fertilizer.org/imis20/images/Library\\_Downloads/2013\\_chicago\\_ifa\\_summary.pdf?WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306&=404%3bhttp%3a%2f%2fwww.fertilizer.org%3a80%2fen%2fimages%2fLibrary\\_Downloads%2f2013\\_chicago\\_ifa\\_summary.pdf](http://www.fertilizer.org/imis20/images/Library_Downloads/2013_chicago_ifa_summary.pdf?WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306&=404%3bhttp%3a%2f%2fwww.fertilizer.org%3a80%2fen%2fimages%2fLibrary_Downloads%2f2013_chicago_ifa_summary.pdf).
- [10] Serna-Chavez H M, Fierer N, Bodegom P M. Global drivers and patterns of microbial abundance in soil. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(10): 1162-1172.
- [11] Wall D H, Bardgett R D, Kelly E. Biodiversity in the dark. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 297-298.
- [12] Van der Heijden M G A, Bardgett R D, Van Straalen N M. The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, 11(3): 296-310.
- [13] Samarasinghe O, Greenhalgh S, Vasey É T. *Looking at Soils Through the Natural Capital and Ecosystem Services Lens, Landcare Research Science Series No 41*. Lincoln, N.Z.: Manaaki Whenua Press, 2013:

- 31.
- [14] Brodt S, Six J, Feenstra G, Ingels C, Campbell D. Sustainable agriculture. *Nature Education Knowledge*, 2011, 3(10): 1.
- [15] EU Commission to the Council (EUCC), the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection [SEC(2006)620] [SEC(2006)1165]\* COM/2006/0231 final \*/. 2006. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52006DC0231>.
- [16] Mackay A D. Impacts of intensification of pastoral agriculture on soils: Current and emerging challenges and implications for future land uses. *New Zealand Veterinary Journal*, 2008, 56(6): 281-288.
- [17] Dominati E, Mackay A, Green S, Patterson M. The value of soil services for nutrient management//Currie L D, Christensen C L. *Adding to the Knowledge Base for the Nutrient Manager*. Massey University, Palmerston North, New Zealand. Fertilizer and Lime Research Centre, <http://flrc.massey.ac.nz/publications.html>. Occasional Report No. 24, 2011.
- [18] Solomon S, Qin D, Manning M. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing//*Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Oxford: Cambridge University Press, 2007.
- [19] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, McKeown R, Ojima D S, Painter T H, Parton W J, Townsend A R. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(3): 279-293.
- [20] Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenko V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789-813.
- [21] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 282-289.
- Pan G X. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of china. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5): 282-289. (in Chinese)
- [22] Victoria R, Banwart S, Black H, Ingram J, Joosten H, Milne E, Baskin Y. The benefits of soil carbon: Managing soils for multiple economic, societal and environmental benefits//*UNEP Year Book 2012: Emerging Issues in Our Global Environment*. UNEP, Nairobi, 2012: 19-33.
- [23] Pan G, Zhou P, Li Z, Smith P, Li L, Qiu D, Zhang X, Xu X, Shen S, Chen X. Combined inorganic/organic fertilization enhances N efficiency and increases rice productivity through organic carbon accumulation in a rice paddy from the Tai Lake region, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131: 274-280.
- [24] Pan G, Li L, Zheng J. Benefits of SOM in agro-ecosystems: A case of China//*Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits*. London: CABI, 2014: 383-401.
- [25] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 程琨, 卞荣军, 吉春颖, 郑聚峰, 张旭辉, 郑金伟. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径. 科技导报, 2015, 33(13): 92-101.
- Pan G X, Li L Q, Liu X Y, Cheng K, Bian R J, Ji C Y, Zheng J F, Zhang X H, Zheng J W. Industrialization of biochar from biomass pyrolysis: A new option for straw burning ban and green agriculture of China. *Science & Technology Review*, 2015, 33(13): 92-101. (in Chinese)
- [26] Gibbs H K, Johnston M, Foley J A, Holloway T, Monfreda C, Ramankutty N, Zaks D. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: The effects of changing yield and technology. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(3): 51-55.
- [27] Carlson K M, Goodman L K, May-Tobin C C. Modeling relationships between water table depth and peat soil carbon loss in Southeast Asian plantations. *Environmental Research Letters*, 2015, DOI: 10.1088/1748-9326/10/7/074006.
- [28] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature*, 1994, 371: 783-785.
- [29] Robinson D A, Hockley N, Cooper D M, Emmett B A, Keith A M, Lebron I, Reynolds B, Tipping E, Tye A M, Watts C W, Whalley W R, Black H I J, Warren G P, Robinson J S. Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 1023-1033.
- [30] Hooke R L B, Martin-Duque J F, Pedraza J. Land transformation by humans: A review. *GSA Today*, 2012, 22(12): 4-10.
- [31] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [32] Montgomery D R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2007, 104(33): 13268-13272.
- [33] Trigger B G. *Understanding Early Civilizations: A Comparative Study*. Oxford: Cambridge University Press, 2003.
- [34] Banwart S. Save our soils. *Nature*, 2011, 474(7350): 151-152.
- [35] United Nations Environment Programme. Assessing Global Land Use:

- Balancing Consumption with Sustainable Supply. 2014. [http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Full\\_Report-Assessing\\_Global\\_Land\\_UseEnglish\\_\(PDF\).pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Full_Report-Assessing_Global_Land_UseEnglish_(PDF).pdf).
- [36] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果等情况新闻发布会. [2014-02-25]. <http://www.xinhuanet.com/zhibo/20140225a/zhibo.htm>. State Forestry Administration of People's Republic of China. The eighth press conference on national forest inventory results and more. [2014-02-25]. <http://www.xinhuanet.com/zhibo/20140225a/zhibo.htm>. (in Chinese)
- [37] 中华人民共和国农业部. 2013 年全国草原监测报告. [2014-03-03]. [http://www.agri.cn/V20/ZX/nyyw/201403/t20140303\\_3802105.htm](http://www.agri.cn/V20/ZX/nyyw/201403/t20140303_3802105.htm). Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 2013 National Grassland Monitoring Report. [2014-03-03]. [http://www.agri.cn/V20/ZX/nyyw/201403/t20140303\\_3802105.htm](http://www.agri.cn/V20/ZX/nyyw/201403/t20140303_3802105.htm). (in Chinese)
- [38] 国家林业局. 第二次全国湿地资源调查结果. [2014-09-15]. [http://wenku.baidu.com/link?url=s3V\\_H1W5eauJnpBL9-PutJFWIM4e2smNPWeJA0sCk\\_wbpx1lupC8AJ4jt3v7Rh3YD6WuLdIJN2detSFdWIGbMZ3UblIghPAC8ShQMj09EkS](http://wenku.baidu.com/link?url=s3V_H1W5eauJnpBL9-PutJFWIM4e2smNPWeJA0sCk_wbpx1lupC8AJ4jt3v7Rh3YD6WuLdIJN2detSFdWIGbMZ3UblIghPAC8ShQMj09EkS). State Forestry Administration of People's Republic of China. The Second National Investigation Results of Wetland Resources. [2014-09-15]. [http://wenku.baidu.com/link?url=s3V\\_H1W5eauJnpBL9-PutJFWIM4e2smNPWeJA0sCk\\_wbpx1lupC8AJ4jt3v7Rh3YD6WuLdIJN2detSFdWIGbMZ3UblIghPAC8ShQMj09EkS](http://wenku.baidu.com/link?url=s3V_H1W5eauJnpBL9-PutJFWIM4e2smNPWeJA0sCk_wbpx1lupC8AJ4jt3v7Rh3YD6WuLdIJN2detSFdWIGbMZ3UblIghPAC8ShQMj09EkS). (in Chinese)
- [39] 中华人民共和国国土资源部. 2013 中国国土资源公报. [2014-04-22]. <http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201404/P020140422295411414695.pdf>. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 2013 Zhongguo Guotu Ziyuan Gongbao. [2014-04-22]. <http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201404/P020140422295411414695.pdf>. (in Chinese)
- [40] 国土资源部土地整治中心. 土地整治蓝皮书. [2014-06-24]. [http://www.gtzyb.com/zhengcejiedu/20140624\\_67066.shtml](http://www.gtzyb.com/zhengcejiedu/20140624_67066.shtml). China Land Consolidation and Rehabilitation of Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Blue Book of Land remediation. [2014-06-24]. [http://www.gtzyb.com/zhengcejiedu/20140624\\_67066.shtml](http://www.gtzyb.com/zhengcejiedu/20140624_67066.shtml). (in Chinese)
- [41] 国家林业局. 第四次全国荒漠化和沙化监测成果. [2011-01-04]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/195/content-457769.html>. State Forestry Administration of People's Republic of China. The Fourth National Desertification and Desertification Monitoring Results. [2011-01-04]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/195/content-457769.html>. (in Chinese)
- [42] 中华人民共和国农业部. 关于全国耕地质量等级情况的公报. [2014-12-17]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217\\_4297895.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217_4297895.htm). Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The Communique About the National Cultivated Land Quality Grade. [2014-12-17]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217\\_4297895.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201412/t20141217_4297895.htm). (in Chinese)
- [43] 环境保护部&国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. [2014-04-17]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm). Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China & Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. The Communique on the National General Survey of Soil Contamination. [2014-04-17]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417\\_270670.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm). (in Chinese)
- [44] Hu W, Chen Y, Huang B, Niedermann S. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from a typical greenhouse vegetable production system in China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, 20(5): 1264-1280.
- [45] Cheng K, Pan G, Smith P, Luo T, Li L, Zheng J, Zhang X, Han X, Yan M. Carbon footprint of China's crop production-An estimation using agro-statistics data over 1993-2007. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3): 231-237.
- [46] Cheng K, Yan M, Nayak D, Pan G, Smith P, Zheng J, Zheng J. Carbon footprint of crop production in China: An analysis of national statistics data. *The Journal of Agriculture Science*, 2015, 153(3): 422-431.
- [47] Qiu J. Nitrogen pollution soars in China: Emissions from transport and industry have increased faster than those from agriculture. *Nature*, 2013, doi:10.1038/nature.2013.12470.
- [48] Top 10 Environmental Issues Facing Our Planet. Planet Earth Herald, 2015. <http://planetearthherald.com/top-10-environmental-issues/>.
- [49] Janzen H H, Fixen P E, Franzluebbers A J, Hattey J, Izaurralde R C, Ketterings Q M, Lobb D A, Schlesinger W H. Global prospects rooted in soil science. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(1): 1-8.
- [50] Bian R, Cheng K, Zheng J, Liu X, Liu Y, Li Z, Li L, Smith P, Pan G, Crowley D, Zheng J, Zhang X, Zhang L, Hussian Q. Does metal pollution matter with C retention by rice soil? *Scientific Reports*, 2015, doi: 10.1038/srep13233.
- [51] 任京辰, 张平究, 潘根兴, 宋林华. 岩溶土壤的生态地球化学特征及其指示意义. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 504-512. Ren J C, Zhang P J, Pan G X, Song L H. Indices of eco-geochemical characteristics in a degradation-reclamation sequence of soils in mountainous karst area. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 504-512. (in Chinese)

- [52] 徐绍史. 国务院关于生态补偿机制建设工作情况的报告. [2013-04-23]. [http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2013-04/26/content\\_1793568.htm](http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2013-04/26/content_1793568.htm).  
Xu S S. The report of State Council about construction work of ecological compensation mechanism. [2013-04-23]. [http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2013-04/26/content\\_1793568.htm](http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2013-04/26/content_1793568.htm). (in Chinese)
- [53] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院批复《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》. [2013-04-17]. [http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content\\_946918.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content_946918.htm).  
The Central People's Government of the People's Republic of China. Approval of State Council for "Outline of comprehensive treatment planning for rocky desertification in karst region". [2013-04-17]. [http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content\\_946918.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content_946918.htm). (in Chinese)
- [54] 环境保护部. 国家环境保护“十二五”规划. [2008-12-20]. [http://www.gov.cn/zwgk/2011-12/20/content\\_2024895.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2011-12/20/content_2024895.htm).  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. "Twelfth Five-year Plan" of Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. [2008-12-20]. [http://www.gov.cn/zwgk/2011-12/20/content\\_2024895.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2011-12/20/content_2024895.htm). (in Chinese)
- [55] 环境保护部. 全国生态脆弱区保护规划纲要. [2008-09-27]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content\\_1250928.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1250928.htm).  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Outline of Protection Plan for National Eco-Fragile Region. [2008-09-27]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content\\_1250928.htm](http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1250928.htm). (in Chinese)
- [56] 中华人民共和国农业部&国家发展改革委员会. 保护性耕作工程建设规划(2009—2015年). 2008. [http://www.dss.gov.cn/Article\\_Print.asp?ArticleID=308163](http://www.dss.gov.cn/Article_Print.asp?ArticleID=308163).  
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China & National Development and Reform Commission. Plan of Conservation Tillage Engineering Construction (2009-2015). 2008. [http://www.dss.gov.cn/Article\\_Print.asp?ArticleID=308163](http://www.dss.gov.cn/Article_Print.asp?ArticleID=308163). (in Chinese)
- [57] 中国退耕还林工程. 新华网, 2009. [http://news.xinhuanet.com/ziliao/2009-10/29/content\\_12356104.htm](http://news.xinhuanet.com/ziliao/2009-10/29/content_12356104.htm).  
Grain for Green Project in China. Xinhua Net, 2009. [http://news.xinhuanet.com/ziliao/2009-10/29/content\\_12356104.htm](http://news.xinhuanet.com/ziliao/2009-10/29/content_12356104.htm). (in Chinese)
- [58] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于全国水土保持规划(2015—2030年)的批复. [2015-10-17]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/17/content\\_10232.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/17/content_10232.htm).  
The Central People's Government of the People's Republic of China. Approval of State Council about Plan for National Water and Soil Conservation of 2015 to 2030. [2015-10-17]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/17/content\\_10232.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-10/17/content_10232.htm). (in Chinese)
- [59] 中华人民共和国中央人民政府. 全国农业可持续发展规划(2015-2030). 2015. [http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201505/t20150528\\_1242763.htm](http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201505/t20150528_1242763.htm).  
The Central People's Government of the People's Republic of China. A National Plan for Sustainable Development of Agriculture (2015-2030). 2015. [http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201505/t20150528\\_1242763.htm](http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201505/t20150528_1242763.htm). (in Chinese)
- [60] 北京市农业局. 环保部审议通过《土壤污染防治行动计划》. [2014-03-21]. <http://www.bjny.gov.cn/nyj/231595/603501/603544/520012/index.html>.  
Beijing Municipal Bureau of Agriculture. Environmental Protection Department for consideration by 《Soil Pollution Prevention Action Plan》 [2014-03-21]. <http://www.bjny.gov.cn/nyj/231595/603501/603544/520012/index.html>.
- [61] 程琨, 岳骞, 徐向瑞, 闫明, 潘根兴. 土壤生态系统服务功能表征与计量. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4621-4629.  
Cheng K, Yue Q, Xu X R, Yan M, Pan G X. Characterizing and quantifying soil resilience for ecosystem services. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4621-4629.
- [62] Scalenghe R, Marsan F A. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90(1): 1-10.
- [63] 方创琳, 马海涛. 新型城镇化背景下中国的新区建设与土地集约利用. 中国土地科学, 2013, 27(7): 4-9.  
Fang C L, Ma H T. New city district development and intensive land use in the context of new-type urbanization. *China Land Science*, 2013, 27(7): 4-9. (in Chinese)
- [64] 平帆. 浙江省稻田地力评价与分等定级的研究. 杭州: 浙江大学, 2014.  
Ping F. Study of paddy soil fertility evaluation and classification and grading of Zhejiang province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [65] Wiczorek A M, Wright M G. History of agricultural biotechnology: How crop development has evolved. *Nature Education Knowledge*, 2012, 3(10): 9.
- [66] Dar W D, Gowda C L L. Declining agricultural productivity and global food security. *Journal of Crop Improvement*, 2013, 27(2): 242-254.
- [67] Banwart S, Black H, Cai Z, Gicherud P, Joostene H, Victoriaf R, Milnegh E, Noellemeyeri E, Pascualj U, Nziguhebak G, Vargasl R, Bationom A, Buschiazzon D, de-Brognezio D, Melilloj P, Richterq D, Termansenr M, Noordwijks M, Goverset T, Ballabioo C, Bhattacharyyau T, Goldhaberv M, Nikolaidisw N, Zhao Y, Funky R, Duffyz C, Pan G, Scalaab N, Gottschalkac P, Batjesad N, Sixae J,

- Wesemaelaf B, Stocking M, Bampaah F, Bernoux M, Fellerai C, Lemanceau P, Montanarella L. Benefits of soil carbon: Report on the outcomes of an international scientific committee on problems of the environment rapid assessment workshop. *Carbon Management*, 2014, 5(2): 185-192.
- [68] 潘根兴, 陆海飞, 李恋卿, 郑聚锋, 张旭辉, 程琨, 刘晓雨, 卞荣军, 郑金伟. 土壤碳固定与生物活性: 面向可持续土壤管理的新前沿. *地球科学进展*, 2015, 30(8): 940-951.
- Pan G X, Lu H F, Li L Q, Zheng J F, Zhang X H, Cheng K, Liu X Y, Bian R J, Zheng J W. Soil carbon sequestration with bioactivity: A new emerging frontier for sustainable soil management. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(8): 940-951. (in Chinese)
- [69] Wang P, Liu Y, Li L, Cheng K, Zheng J, Zhang X, Zheng J, Joseph S, Pan G X. Long-term rice cultivation stabilizes soil organic carbon and promotes soil microbial activity in a salt marsh derived soil chronosequence. *Scientific Reports*, 2015, doi: 10.1038/srep15704.
- [70] Cheng K, Ogle S M, Parton W J, Pan G X. Simulating greenhouse gas mitigation potentials for Chinese croplands using the DAYCENT ecosystem model. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 948-962.
- [71] United Nations Environment Programme. Sharing knowledge on the use of biochar for sustainable land management. 2014. [http://addis.unep.org/projectdatabases/01284/project\\_general\\_info](http://addis.unep.org/projectdatabases/01284/project_general_info).

(责任编辑 杨鑫浩, 李莉)