

# 土壤生态系统服务功能表征与计量

程琨, 岳骞, 徐向瑞, 闫明, 潘根兴

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

**摘要:** 2015 年是世界土壤年, 健康的土壤是地球可持续发展的基石。然而, 由于人类直接或间接的干扰, 如土地利用变化、土壤管理和土地退化, 使得土壤在全球变化压力下变得愈加脆弱。土壤在生态系统服务供应中发挥着至关重要的作用, 土壤所提供的各种生态系统服务之间的相互协同或抵消作用是土壤生态系统服务功能研究的主要内容。土壤的碳、氮、水三大生物地球化学循环以及土壤的生物多样性与供给、调节、支持和文化四个生态系统服务紧密相关。为探索土壤可持续管理途径, 提升土壤的生态系统服务能力, 从碳、氮、水循环与生物多样性出发进行土壤生态系统服务功能表征与计量方法学研究亟待进行。开发用于评价土地利用和土壤管理可持续性的生态系统服务指标体系, 采用多尺度、多目标、多因素集成分析探讨各生态系统服务之间的协同或抵消效应是研究的难点, 而模型模拟可以在土壤生态系统服务功能计量研究中扮演重要的角色。

**关键词:** 土壤功能; 生态系统服务; 可持续发展; 表征; 计量

## Characterizing and Quantifying Soil Resilience for Ecosystem Services

CHENG Kun, YUE Qian, XU Xiang-ru, YAN Ming, PAN Gen-xing

(*Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095*)

**Abstract:** 2015 is the International Year of Soil, which indicates soils are the central consideration of what constitutes sustainable development. However, due to direct or indirect human disturbance such as land use change, soil management and land degradation, soil becomes fragile under the global change pressures. Soils play a critical role in delivering ecosystem services. The co-benefits or trade-offs between various ecosystem services provided by soils are main issues focused by the researchers. Soil carbon, nutrient and water cycles, and soil biodiversity could be related to the provisioning, regulating, supporting and cultural ecosystem services which they underpin. Characterizing and quantifying soil resilience for ecosystem services are main challenges to seek the sustainable soil management for improving soil resilience. Developing the ecosystem service indicators system and assessing the co-benefits or trade-offs between various ecosystem services using multiscale, multi-objectives, multi-factors approaches are both focused on the process of research. Furthermore, model simulation is one of the key approaches for the quantification of soil resilience for ecosystem services.

**Key words:** soil resilience; ecosystem service; sustainable development; characterization; quantification

### 1 全球变化下的土壤

当前, 地球处于“人类纪”, 由于人类的繁衍及其经济的发展, 一半以上的地球表面受到人为活动的强烈干扰和改变, 包括农业的耕种、草原的放牧、城镇化土地占用、森林砍伐、工程建设、污染等, 这些

干扰主要发生在大气到地下水的近地表系统特别是地表的薄层土壤<sup>[1]</sup>, 改变着地球的生物地球化学循环和地球生命的生境及生态协调<sup>[2]</sup>。土壤侵蚀、生境破碎化、化学物质活化、物种消亡、温室气体浓度升高、气候变化改变了土壤水碳养分循环, 从而改变了地球生物地球化学过程, 对生态系统以及全球气候变化产

收稿日期: 2015-09-21; 接受日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(41501569)、中央高校基本科研业务费项目(KYZ201523, KJQN201673)、江苏省自然科学基金(BK20150684)

联系方式: 程琨, E-mail: chengkun@njau.edu.cn。通信作者潘根兴, E-mail: panggenxing@aliyun.com

生反馈作用<sup>[3]</sup>。

为满足未来几十年全球人口的快速增长对食物、纤维和能源的需求,植物和土壤的生产力必须不断提高,这将进一步给土壤带来压力。人类需求的增加将导致越来越多的自然土地转变为粗放型管理土地和集约利用的农用地,同时还体现为对已有土地的高强度人为管理,例如增加养分和水的投入、增加收获次数等。土地覆盖和利用的变化,如森林和自然草地开垦为牧场或农田,将移除生物量、改变植被、干扰土壤,进而导致土壤碳和养分的损失、土壤结构的改变以及地上、地下部生物多样性的变化。已有研究估计,人类已经至少改变了地球 50% 的无冰雪覆盖的陆地。森林砍伐已经导致了全球 25% 的土壤有机碳排放到大气中<sup>[4-5]</sup>,而 1950—2000 年,中国东北和青藏高原等地区有 1.3 万 km<sup>2</sup> 的湿地开垦为农田,最终导致了近 5.5 Pg 二氧化碳当量的土壤有机碳的损失<sup>[6]</sup>。在农田生产过程中,一些良好的集约化管理措施可以在保障产量的同时避免过多的土地开垦,例如, Burney 等<sup>[7]</sup>估计 1961—2010 年农田的集约化生产减免了约 590 Pg 二氧化碳的排放。然而,农业措施的过度使用将大大增加环境风险,例如,农作物收获后,土壤中仍残留了 50%—60% 的养分,后季的继续施用将可能导致营养元素进入水体中成为水体富营养化的主要污染源<sup>[8-9]</sup>。在处理全球食物生产和供应的农业问题时,往往忽视土壤将如何适应这种需求<sup>[10]</sup>。全球食物生产量还需要增加 50%,土壤的农业耕作等将不断强化,地球上的土壤将日益处于风险和威胁之中<sup>[10-11]</sup>。在高强度农业开发下,世界上一些地区每年剥去土壤达 50 t·hm<sup>-2</sup> 以上,超过自然土壤形成速率 100 多倍<sup>[12]</sup>。

土壤在可持续集约化利用中占据中心位置,在全球环境保护和可持续发展中扮演着非常重要的角色。2015 年是世界土壤年,科学界将迎来新一轮的机遇以探索人类干预下的全球变化对土壤的影响。同时,2015 年各国政府也将在联合国气候变化框架公约下探讨新的有法律效应的气候变化协议,而土壤碳氮循环是陆地温室气体排放与清除的关键。而且,在 2015 年,各国政府将在“千年发展目标”下形成并通过各自的新的可持续发展规划,土壤将在支撑生态系统服务的供应并促进可持续发展中发挥重要的作用。

## 2 土壤功能与生态系统服务

### 2.1 生态系统服务

“千年生态系统评估”将生态系统服务定义为人类

类可以从生态系统获取的益处<sup>[13]</sup>。生态系统服务被分为四类,分别是供给服务(provisioning services)、调节服务(regulating services)、支持服务(supporting services)和文化服务(cultural services)。供给服务是指生态系统向人类提供产品的服务,调节服务指从生态系统管理中获取的益处,支持服务是指其他生态服务实现的必要条件,文化服务是指人类从生态系统中可获取的非物质性的益处。“千年生态系统评估”首先系统地列出了近 20 项生态系统服务功能,它们通过一系列生态系统过程表现为对人类的直接或间接服务功能<sup>[14]</sup>,归结为气候调节和固碳、提供天然水储库和水流通、病原生物控制、天然原材料、提供燃料和能源、废弃物和污染物分解、形成、维持和更新土壤肥力、作物植物繁殖、病虫害控制、食物生产、生产木材和纤维、过滤和纯化水质、提供氧气、提供文化和精神慰藉、休闲和娱乐、治愈某些疾病及提供科学思维的源泉等。不过,目前还不能完全量化生态系统的功能、服务或收益<sup>[15]</sup>。尽管如此,上述服务功能对经济活动、人类生活和健康具有不同的直接或间接影响;有些服务是具体的,局地生产者受益的,而另一些服务则是人类普遍的(例如生物多样性)。当然,这些服务在不同地区、不同环境和不同人群具有不同的重要性,使其成为生态学与社会科学研究的主要内容。由于人为利用和管理的差异,生态系统服务可能是互相冲突的,或者可能是互相抵消的,但在良好的生态系统或良好的管理下,生态系统服务可以协同而得到最大收益<sup>[16]</sup>。

### 2.2 土壤的生态系统服务功能

土壤功能不仅仅体现在农业和林业生产,土壤中的碳、氮、水和生物储库对地球可持续性也具有举足轻重的贡献<sup>[10]</sup>。生态系统过程的核心是碳氮水生物地球化学循环,从生态系统服务功能视角认识和评价土壤的碳氮水等自然资本储蓄,可以提供一种途径来最优化利用自然资本而提高生产活动的资源利用效率<sup>[15]</sup>。有机碳贮存是土壤的一项重要的生态系统功能,土壤有机碳的固持与增加可以为人类社会带来一系列的经济和生态效益<sup>[17]</sup>,包括可以增加土壤的保水保肥能力,避免土壤侵蚀,从而增加和稳定作物产量;增加土壤碳储量还有助于减缓气候变化<sup>[18-19]</sup>。

氮素是蛋白质、核酸等物质的重要组成元素,是所有生命形态中含量最多的营养元素,同时也是农业生态系统生产力的限制性因素。以氮素循环为代表的养分循环为生物量的生产提供着养分支持<sup>[20]</sup>。

与土壤水循环相关的生态系统服务包括粮食和水安全的供给服务、土壤贮存水分和净化水流的调节服务和支持服务<sup>[21]</sup>。土壤生物多样性与生态系统服务功能的形成有密切的关系, 应该将维持生物多样性置于土壤功能的中心地位<sup>[22]</sup>。无论在团聚体水平, 还是在剖面 and 景观水平, 生态系统服务都与地上部和地下部生物活动有密切的关系, 而生物多样性本身又决定或制约土壤功能及服务<sup>[23]</sup>。然而, 土壤微生物量及其多样性是否与地上部生物生产力及其多样性相耦合, 或者地下部生物多样性是否与地上部的生产力及多样性相联系, 这些认识至今仍是空白<sup>[24]</sup>。

生态学上广为接受的土壤生态系统功能包括:(1)

生物生产, (2) 物质(包括养分、水和污染物) 储存、过滤和转化, (3) 生境、物种和遗传多样性保持, (4) 自然和文化环境维持, (5) 提供矿物等原材料, (6) 碳库及其循环, 以及(7) 历史遗迹存留<sup>[25]</sup>。如果生态系统服务是人类社会通过这些土壤功能而得到的收益, 那么土壤的生态服务可以理解为对生物生产、生境、物种和遗传多样性的支撑服务, 提供养分、水和矿物质原料的供应服务, 对水、碳循环及和温室气体排放的调节服务和土壤景观、历史和文化遗迹保存的文化服务<sup>[26]</sup>。最近, 联合国粮农组织在组织编制世界土壤资源态势报告时, 重新定义和厘清了生态系统服务及其与土壤功能的关系(表 1)<sup>[27]</sup>。

表 1 生态系统服务及其相关的土壤功能<sup>[27]</sup>

Table 1 Ecosystem services and soil functions

生态系统服务 Ecosystem service	土壤功能 Soil function
支撑服务 Supporting services	
原材料生产 Raw material production	支撑陆地植被 Terrestrial vegetation
土壤形成 Soil formation	岩石风化和有机质积累 Weathering and organic matter accumulation
养分循环 Nutrient cycles	储存、转化与内部循环 Storage, transform and internal recycling
供应服务 Provisioning services	
水分保蓄 Freshwater	景观中水分保持 Water retention
提供食物 Food supply	供应植物生长 Support plant growth
生物质供应(食物、纤维、燃料) Biomass supply	
自然材料(表土、团聚体等) Natural material	提供源物质 Supply source materials
自然基础 Natural basis	支持建筑物、支撑机械行走 Underpinning
生物庇护所 Biology refuge	对土壤动物、鸟类等提供生境 Provide habitat
生物多样性与遗传资源 Biodiversity and genetic resources	多样化的生物质来源 Diverse sources of biomass
调节服务 Regulating services	
水质调节 Water purification	过滤和缓冲水 Buffering and filtering
养分调节 Nutrient regulation	养分循环 Nutrient cycles
气候调节 Climate regulation	温室气体释放 Greenhouse gas emission
沉积调节(土壤侵蚀) Erosion regulation	流域内土粒与胶体的保蓄 Keeping soil particles and colloid
文化服务 Cultural services	
运动、科教及自然欣赏 Recreation & aesthetic values	古迹与古记录保藏 Preservation
遗产保护 Heritage protection	

因此, 科学家呼吁在亚洲等人口密集且仍在快速增长的地区进行土壤的生态系统服务功能研究, 这些地区的农业将日益集约化、土地将被高强度开发, 其在利用土壤生产力同时对地球近地表环境的干扰和破坏必将更为深刻和长远<sup>[28]</sup>。当前, 高强度农业开发已经引起土壤退化: 结构破坏、土壤侵蚀、养分流失和

有效性降低、污染物积累且迁移到食物链、生物多样性下降、土壤温室气体排放大幅度提高<sup>[1]</sup>。因此, 土地利用及农业开发导致的各种土壤功能变化及其对生态系统服务的影响成为科学界十分关注的问题。然而, 对土壤功能及其生态系统服务进行量化和集成分析的研究还非常有限<sup>[29]</sup>。为此, 迫切需要一个表征土壤功

能变化的预测性机制，并定量刻画其对于地球环境和生态系统的深刻和长远的影响，探索和评价可能的解决方案，并寻找最佳的解决途径。与传统土壤学不同，土壤的生态系统服务功能研究是系统诠释土壤过程和功能的基本原理，影响生态系统服务的土壤形成与退化的机制，力图做到量化的表征及预测土壤功能变化，并通过模型进行评价和监测。

### 3 土壤的生态系统服务功能表征与计量

#### 3.1 生态系统服务指标

土地利用和土地管理是影响生态系统提供服务的重要因子，了解土地利用和土地管理、生态系统过程和生态系统服务间的交互作用是认识土地利用可持续性的基础<sup>[30]</sup>。而生态指标是认识和表征这些交互作用的重要指示，可为决策者提供制定土地管理和利用政策的依据<sup>[31]</sup>。

高强度的土地利用将通过影响土壤碳氮水循环以及对能源和资源的消耗，从而对各种生态系统服务造成影响。例如，高强度的土壤扰动和过度的土地利用将加剧土壤矿化过程，甚至通过大量排放二氧化碳使

得土壤成为碳源<sup>[32]</sup>；在稻田淹水厌氧条件下，还将通过产甲烷过程造成甲烷的排放，而甲烷的全球增温趋势是二氧化碳的 21 倍<sup>[33]</sup>。由于氮素能够显著增加作物产量，且氮肥价格较低，农民通常过量施用氮肥以保证作物的生长需求<sup>[34]</sup>。中国氮肥利用率较低，氮肥过量施用使得氮素在土壤中大量积累，造成了水体污染、土壤酸化、温室气体排放等严重的环境问题<sup>[20,35]</sup>。土壤水分可通过蒸散过程排放到大气中，甚至会通过地表径流和土体渗透将养分和污染物排放到水体当中。在当前气候变化水资源分配不均的背景下，农田水分高效利用对于保障生态系统服务至关重要<sup>[36-37]</sup>。以土壤碳氮水循环为核心和焦点的土壤功能及其生态系统服务计量研究愈来愈成为关注的热点和难点。

生态足迹是 20 世纪 90 年代发展起来的一种生态可持续性评估方法，它通过计量人类对生态服务的需求与自然能提供的生态服务之间的差距，来研究人类对自然的利用状况以及生态系统的承受能力，从而判断生态的可持续性<sup>[38-39]</sup>。碳足迹、氮足迹和水足迹都是发源于生态足迹概念，是用于衡量人类活动对生态环境影响程度的生态学指标<sup>[40-41]</sup>。农业生产碳、氮、水足迹的定义及目标如表 2 所示。

表 2 农业生产碳、氮、水足迹的定义及目标

Table 2 The concept and scope of carbon, nitrogen and water footprint of agricultural production

足迹 Footprint	定义 Concept	目标 Scope
碳足迹 Carbon footprint	在农业生产过程中由人为投入的生产资料或者器械使用所带来的直接或间接的温室气体排放量，并以二氧化碳当量表示 The total greenhouse gas emissions in carbon dioxide equivalent through material added, and from mechanical operation performed in a single whole cycle of agricultural production	评价农业生产的温室效应 Assessing the greenhouse effect of agricultural production
氮足迹 Nitrogen footprint	农业生产过程中向环境中释放的活性氮的数量，以氮当量表示 The total direct reactive N losses to the environment that occur for the agricultural production of one unit of (food) product, measured in g N·kg <sup>-1</sup> food product	评价氮素损失与利用效率 Assessing nitrogen loss and use efficiency
水足迹 Water footprint	农业生产过程中的用水量之和。包括蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹 The volume of freshwater used for production at the place where it was actually produced. Water footprint includes blue, green and grey water footprint	评价水分损失与利用效率 Assessing water loss and use efficiency

碳足迹是指在产品生产和消费整个生命周期中直接和间接排放的温室气体总量，用于评价生产和活动的温室气体排放状况。农业生产的碳足迹已在国家、区域和田间尺度得到了广泛的评价。英国科学家通过田间调查计算了苏格兰农业生产碳足迹，发现农业生产过程中 75% 的温室气体排放来源于氮肥的施用<sup>[42]</sup>。笔者课题组发现中国农作物生产碳足迹高于发达国家，且近年来碳排放效益呈现下降趋势<sup>[43]</sup>。

然而，由于研究目标和数据来源的不同，碳足迹的计量范围和方法有所差异。例如，Cheng 等<sup>[44]</sup>基于国家统计数据，采用排放系数法计算中国粮食作物生产过程中直接排放和间接排放；而 Gan 等<sup>[45]</sup>则以加拿大一个长期试验点为研究对象，将试验测定、排放系数法与经验模型法相结合，将土壤固碳也计入了碳足迹当中。

氮足迹是关注产品生产和消费过程中向环境排放

的活性氮的总量，用以评价氮素损失与利用效率。水足迹则是计量用于生产某产品的整个生产供应链中的用水量之和，以评价水分损失与利用效率为主要目标。氮足迹和水足迹可以反映农业生产过程对氮素和水分的利用情况。Leip 等<sup>[46]</sup>和 Pierer 等<sup>[47]</sup>分别对欧盟和奥地利食物生产氮足迹进行了计量，均得出畜牧业生产的氮足迹远高于种植业。Chapagain 和 Hoekstra<sup>[48]</sup>计算了全球不同国家水稻生产的水足迹，并探讨了蓝水、绿水和灰水足迹的比例。Xu 等<sup>[49]</sup>研究了北京市农作物生产水足迹的年际变化，指出近年来水足迹有所下降，而蓝水足迹所占比例最大。由上可知，目前对农业生产氮、水足迹的研究主要集中于大尺度的计量，小尺度特别是田块尺度的研究还非常有限，且适用于田块尺度研究的计量方法学还有待进一步的发展。

目前对农业活动生态环境效应的研究大多数关注于单一影响，将温室效应、氮素环境影响、水资源消耗综合考虑的研究还非常有限。近来有研究发现农作物生产的碳足迹和水足迹、能源作物的碳足迹和氮足迹可能出现此消彼长的特征，而且可通过整合足迹的计算判别作物生产过程中温室气体排放和水资源消耗对生态环境的相对贡献<sup>[50-52]</sup>。

在农业生产过程中，人们往往只追求某一种或某几种生态系统服务类型（例如粮食供给服务），而对其他生态系统服务的提供产生了影响，从而引起了生态系统服务的权衡与协同问题<sup>[53]</sup>。在气候变化背景下，均衡的生态系统服务是地球可持续发展的重要条件<sup>[54]</sup>。近年来，在生态系统服务研究中日益采用多指标评价体系。Macfadyen 等<sup>[55]</sup>从病虫害控制的多个指标分析了有机农业与常规农业的生态系统服务差异，而 Schipanski 等<sup>[56]</sup>采用与粮食供给、氧化亚氮减排、土壤固碳等有关的 11 个生态系统服务指标，评价农田生态系统服务年际变化，并探讨不同生态系统服务间的协同或抵消情况。而且，将生态指标与社会经济计量方法相结合进行生态系统服务综合评价也是当前研究的热点。例如，Goldstein 等<sup>[31]</sup>通过不同土地利用规划情景下各种生态系统服务和社会经济效益的抵消情况的比较分析，探讨了实现生态效益和经济效益双赢的可能途径。Watanabe 和 Ortega<sup>[57]</sup>则将生态系统服务对区域经济的贡献量化为宏观经济价值，采用数量、能值、货币 3 种方式评价了巴西某流域土地利用变化对生态系统服务的影响，结果表明自然的热带草原和农林复合系统的生态与社会经济价值最高。

另外一些指标也可能帮助探讨人类活动对于土

地利用及生态系统功能及服务的影响。例如，生态系统人类干扰综合指数可以反映人类对当地生态系统的干预或干扰程度（ecosystem comprehensive anthropogenic disturbance index, ECADI）<sup>[58]</sup>。景观分析也可以通过空间变异结构变化，讨论农业或人类干扰对土壤景观和生态交错带结构的影响。李阳兵等<sup>[59]</sup>采用景观多样性指数空间变化讨论喀斯特生态系统恢复的效应。意大利科学家 Mancinelli 等<sup>[60-61]</sup>发展了景观多样性分析用于探讨土地利用可持续性，结果表明，私有用地景观异质性较高，促进了生态交错带的存在和土地覆被的多样性，因此，一个有良好结构的私有用地有助于提高（景观）可持续性。此外，还有的研究采用模糊认知图方法学（Fuzzy cognitive mapping）来分析直接或间接影响土地利用和生态系统服务功能的不同利益相关者对于生态系统服务功能及其保护的认知及其潜在的参与度和重要性<sup>[62]</sup>。

联合国“千年生态系统评估”提出的 DPSIR 框架（Drivers, Pressures, State, Impact and Response）<sup>[63]</sup>和 TEEB（The Economics of Ecosystems and Biodiversity），均致力于研究土地管理-生态系统服务-人类福祉的相互关联<sup>[64]</sup>，可为建立生态系统服务方法学框架提供支持。Dominati 等<sup>[65]</sup>提出了一个分类、量化和模拟土壤及其生态系统服务的方法框架。该框架将土壤资源与其生态系统服务很好的联系起来，通过明确外部驱动力对土壤过程及其生态服务的影响，来评价土壤生态系统服务对人类福祉的贡献。该框架包括五个有机联系的部分：土壤资源，土壤资源的形成、维持和退化，土壤过程的驱动因子，土壤的供给服务、调节服务和文化服务，与人类需求相关的生态系统服务。

### 3.2 模型在土壤生态系统服务功能研究中的应用

野外试验和观测可为生态系统服务的研究提供翔实的基础数据用于支撑单一到多个评价指标的研究，但这些观测资料需要进行尺度放大，以从短时间尺度到较长时间尺度，从小流域升尺度到特定的地球环境区域，因此，数学模拟在生态系统服务研究评价和预测中越来越得到应用<sup>[56,66-67]</sup>。近年来，各国科学家开发出一系列的计算机模型来模拟田间尺度到区域尺度甚至全球尺度的生态系统过程。例如，由全球植被动态模型 ORCHIDEE 和基于过程的作物模型 STICS 组成的 ORCHIDEE-STICS 模型，可以模拟不同植被类型下地表二氧化碳交换和水热交换以及各种土壤过程<sup>[68]</sup>；RothC 模型是由英国洛桑实验站的科学家们通过对洛桑实验站农田的长期试验数据的

统计分析发展而来,可以模拟全球多个区域的农田、草地和森林的碳循环<sup>[69]</sup>; DAYCENT 模型可以模拟与植物-土壤系统中碳、氮循环相关的主要过程,包括作物生长、水分运移、热量流动、有机碳分解、氮素矿化和固定作用、硝化作用和反硝化作用、甲烷氧化作用和甲烷产生<sup>[70-71]</sup>;而 SPA 模型(Soil-plant-atmosphere model)是一个多层次生态系统模型,可以用来模拟总初级生产力、冠层水分利用、气孔导度、叶面光合作用、各种土壤过程等<sup>[72]</sup>。目前已经有一些研究将模型模拟运用到生态系统服务评价中。例如, Schipanski 等<sup>[56]</sup>采用 Cycles 和 RUSLE 模型模拟农田过程,通过 11 个指标数据评价了美国宾夕法尼亚州农田多种生态系统服务的年际变化以及不同服务间的协同情况,并识别了各服务间最小抵消作用的关键时间点。Watanabe 和 Ortega<sup>[57]</sup>采用水碳模拟热带草原、农林复合系统、农田、牧场几种土地利用方式转变对生态系统服务价值的影响,得出自然热带草原的生态系统服务价值最高,而常规耕作农田的生态系统服务价值最低。生态风险评价也是生态系统服务研究中的重要组成部分,生态风险的控制是实现生态系统服务的前提,而生态系统模型可以通过模拟各种生态过程,以探讨不同管理情景的生态风险与效益<sup>[66]</sup>。

## 4 亟待进行的探索

2015 国际土壤年对于土壤学界是一个很好的契机,来提升国际和国家政策制定者、土地管理者、农林业和大众对土壤作为生态系统核心的认识。土壤学工作者应着力于系统地采用多尺度、多目标和多因素集成的生态系统服务,及其与土壤功能联系的评估方法学,从试验和观测资料结合区域空间资料,开发基于生物地球化学循环的生态系统服务与土壤功能评价、诊断和预测的方法学工具,特别是计算机模型,这是进行土壤管理可持续性评价以促进生态系统服务供应的需要,也是区域综合治理技术支撑的需要。

对于中国等发展中国家,土壤学研究的首要任务应是通过研究土壤功能与土壤健康,以探索保证食品安全与保障生态系统服务的主要途径。由于耕地资源紧缺,高强度、集约化的利用已经是农田利用的主要特征。因此,在土壤学研究中应当优先关注与作物生产相关的过程和条件,应当很清晰地知道利用生态系统服务获取作物产量所应付出的代价和收到的回报<sup>[73]</sup>。

碳、氮、水足迹是能够表征农业生产对温室气

体排放、氮素损失、水分消耗等环境影响的重要指标。然而,当前的研究还仅限于单个指标、单个系统的研究,将三个指标进行集成以探讨综合影响的研究还非常有限。而且,随着生活水平提高,人类对畜禽类产品的消耗也日益增加。畜牧业对环境的影响也体现为多个方面,同时,其与作物生产也有着紧密的联系。将种植业与畜牧业进行综合研究,探讨其对环境的综合影响,并将经济指标与生态指标相结合,探索生产、生态、经济多赢的关键途径,是当前研究的主要任务。

当前,土壤健康面临着各种威胁,例如气候变化、肥料过量施用、滥用农药、重金属污染、水土流失等,同时,也有一些新的技术手段运用的农业生产当中,例如生物质炭、重金属污染改良剂、有机菌肥等。如何通过土壤功能和生态系统服务表征,分析影响生态系统服务的关键因子,筛选关键指标及其阈值,评价环境变化和人为干扰下不同生态系统服务之间的协同与抵消作用,从而为土壤可持续管理模式的选取与构建提供方法学基础,亦是当前土壤学研究的重大任务。

## References

- [1] Smith P, Bustamante M, House J I, Sobocká J, Harper R, Pan G X, West P, 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, *et al.* Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 2015, doi: 10.1111/gcb.13068.
- [2] Richter D D, Hofmockel M, Callahan M A, Powlson D S, Smith P. Long-term soil experiments: keys to managing Earth's rapidly changing ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71: 266-279.
- [3] Smith P, Cotrufo M F, Rumpel C, Paustian K, Kuikman P, 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, doi: 10.5194/soild-2-537-2015.
- [4] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360.
- [5] Murty D, Kirschbaum M U F, McMurtrie R E, McGilvray H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, 8: 105-123.

- [6] 张旭辉, 李典友, 潘根兴, 李恋卿, 林凡, 许信旺. 中国湿地土壤碳库保护与气候变化问题. 气候变化研究进展, 2008, 4: 202-208.  
Zhang X H, Li D Y, Pan G, Li L Q, Lin F, Xu X W. Conservation of wetland soil C stock and climate change of China. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4: 202-208. (in Chinese)
- [7] Burney J A, Davis S J, Lobell D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107: 12052-12057.
- [8] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, Howarth R W, Sharpley A N, Smith V H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, 8: 559-568.
- [9] West P C, Gerber J S, Engstrom P M, Mueller N D, Brauman K A, Carlson K M, Cassidy E S, Johnston M, MacDonald G K, Ray D K, Siebert S. Leverage points for improving global food security and the environment. *Science*, 2014, 345: 325-328.
- [10] Banwart S. Save our soils. *Nature*, 2011, 474(7350): 151-152.
- [11] Tilman D, Balzer C, Hill J, Befort B L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [12] Montgomery D R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2007, 104: 13268-13272.
- [13] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [14] UNEP. Convention on Biological Diversity, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, UNEP, Montreal, Quebec, H2Y1N9, Canada, 2010.
- [15] Boyd J, Banzhaf H S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Resources for the Future, Discussion Paper No. RFF DP, 2006, 06-02.
- [16] Ramirez K S, Bardgett R D, Fricks B, Montanarella L, Six J, van der Putten W H, Diana W, Nele A, Fredrick A, Steven B, David B, Helaina B, Deborah B, Viktor B, Lijbert B, Colin C, Kathryn C, Philippe L, Zoe L, Phil M, *et al.* White Paper on the First Open Meeting of the Global Soil Biodiversity Initiative (GSBI). Global Soil Biodiversity Initiative, 2012. URL: [http://www.globalsoilbiodiversity.org/sites/default/files/WhitePaper\\_London2012.pdf](http://www.globalsoilbiodiversity.org/sites/default/files/WhitePaper_London2012.pdf)
- [17] Milne E, Banwart S A, Noellemeyer E, Abson D J, Ballabio C, Bampa F, Bationo A, Batjes N H, Bernoux M, Bhattacharyya T, Black H, Buschiazzo D E, Cai Z, Cerri C E, Cheng K, Compagnone C, Conant R, Coutinho H L C, Brognica D, Balieiro F C, *et al.* Soil carbon, multiple benefits. *Environmental Development*, 2015, 13: 33-38.
- [18] Clothier B E, Hall A J, Deurer M, Green S R, Mackay A D, Sauer T J, Norman J M, Sivakumar M V K. Soil ecosystem services//Sauer T J, Norman J M, Sivakumar M V K. *Sustaining Soil Productivity in Response to Global Climate Change: Science, Policy, and Ethics*, 2011: 117-139.
- [19] Pan G X, Li L Q, Zheng J F, Cheng K, Zhang X H, Zheng J W, Li Z C. Managing soil organic carbon for multiple benefits case studies – positive exemplars. Benefits of SOM in agro-ecosystems: A case of China. Chapter 27//Banwart S. eds. *Benefits of Soil Carbon, SCOPE Volume 71*. CAB International, 2014: 383-401.
- [20] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320: 889-892.
- [21] Dymond J. *Ecosystem Services in New Zealand*. Lincoln, New Zealand: Manaaki Whenua Press, 2014.
- [22] Sandifer P A, Sutton-Grier A E, Ward B P. Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: Opportunities to enhance health and biodiversity conservation. *Ecosystem Services*, 2015, 12: 1-15.
- [23] Rutgers M, Van Wijnjen H J, Schouten A J, Mulder C, Kuiten A M P, Brussaard L, Breure A M. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 39-48.
- [24] Fierer N, Leff J W, Adams B J, Nielsen U N, Bates S T, Lauber C L, Owens S, Gilbert J A, Wall D H, Caporaso J G, Affiliations A. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2012, 109(52): 21390-21395.
- [25] European Commission. Final report summary-SOILSERVICE. Conflicting demands of land use, soil biodiversity and the sustainable delivery of ecosystem goods and services in Europe, 2013. URL: [http://cordis.europa.eu/result/rcn/56367\\_en.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/56367_en.html)
- [26] Finvers M A. Application of DPSIR for analysis of soil protection issues and an assessment of British Columbia's soil protection legislation[D]. UK: Cranfield University, 2008.
- [27] FAO. World reference base for soil resources 2014. 2014. URL: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>
- [28] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, Hackmann H, Lee Y T, Mokhele K, Ostrom E, Raivio K, Rockstrom J, Schellnhuber H J, Whyte A. Earth system science for global sustainability: Grand challenges. *Science*, 2010, 12: 916-917.
- [29] De Groot RS, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in

- landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [30] van Oudenhoven A P E, Petz K, Alkemade R, Hein L, de Groot R S. Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2012, 21: 110-122.
- [31] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2012, 109: 7565-7570.
- [32] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, Field D J, Henakaaruchi N, Jenkins M, Minasny B, McBratney A B, Courcelles V R, Singh K, Wheeler I, Abbott L, Angers D A, Baldock J, Bird M, Brookes P C, Chenu C, Jastrow J D, Lal R, Lehmann J, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 80-99.
- [33] IPCC. Summary for policymakers//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [34] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*, 2013, 162: 145-173.
- [35] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- [36] 李保国, 黄峰. 1998-2007年中国农业用水分析. *水科学进展*, 2010, 21(4): 575-583.
- Li B G, Huang F. Trends in China's agricultural water use during recent decade of 1998-2007 using the green and blue water approach. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 575-583. (in Chinese)
- [37] Piao S, Ciais P, Huang Y, Shen Z, Peng S, Li J, Zhou L, Liu H, Ma Y, Ding Y, Friedlingstein P, Liu C, Tan K. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2011, 467: 43-51.
- [38] Wackernagel M, Rees W E, Testmale P. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth (New Catalyst Bioregional Series)*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [39] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. *中国人口. 资源与环境*, 2006, 16(6): 69-78.
- Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. A resolution to the conception of ecological footprint. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(6): 69-78. (in Chinese)
- [40] Galli A, Wiedmann T, Ercein E, Knoblauch D, Ewing B, Giljum S. Integrating ecological, carbon and water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100-112.
- [41] Andrews M, Lea P J. Our nitrogen 'footprint': The need for increased crop nitrogen use efficiency. *Annals of Applied Biology*, 2013, 163: 165-169.
- [42] Hillier J, Hawes C, Squire G, Hilton A, Wale S, Smith P. The carbon footprints of food crop production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, 7: 107-118.
- [43] Cheng K, Pan G, Smith P, Luo T, Li L L, Zheng J W, Zhang X H, Han X J, Yan M. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993-2007. 2011, 142: 231-237.
- [44] Cheng K, Yan M, Nayak D, Pan G X, Smith P, Zheng J F, Zheng J W. Carbon footprint of crop production in China: An analysis of national statistics data. *Journal of Agricultural Science*, 2014. doi: 10.1017/S0021859614000665.
- [45] Gan Y, Liang C, Chai Q, Lemke R L, Campbell C A, Zentner R P. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production. *Nature Communication*, 2014. doi: 10.1038/ncomms6012.
- [46] Leip A, Weiss F, Lesschen J P, Westhoek H. The nitrogen footprint of food products in the European Union. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152: 20-33.
- [47] Pierer M, Winiwarter W, Leach A M, Galloway J N. The nitrogen footprint of food products and general consumption patterns in Austria. *Food Policy*, 2014, 49(Part 1): 128-136.
- [48] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 2011, 70: 749-758.
- [49] Xu Y, Huang K, Yu Y, Wang X. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: a logarithmic mean Divisia index decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 180-187.
- [50] Page G, Ridoutt B, Bellotti B. Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 32: 219-226.
- [51] Čuček L, Klemeš J J, Kravanja Z. A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 34: 9-20.
- [52] Čuček L, Klemeš J J, Kravanja Z. Carbon and nitrogen trade-offs in biomass energy production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2012, 14: 389-397.



- [53] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- Fu B J, Zhang L W. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress. *Progress in Geography*, 2014, 33(4): 441-446. (in Chinese)
- [54] 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 刘国华. 农田生态系统服务功能及其形成机制. 应用生态学报, 2006, 17(5): 929-934.
- Yin F, Mao R Z, Fu B J, Liu G H. Farm land ecosystem service and its formation mechanism. *Chinese Journal Application Ecology*, 2006, 17(5): 929-934. (in Chinese)
- [55] Macfadyen S, Gibson R, Polaszek A, Morris R J, Craze P G, Planqué R, Symondson W O C, Memmott J. Do differences in food web structure between organic and conventional farms affect the ecosystem service of pest control? *Ecology Letters*, 2009, 12: 229-238.
- [56] Schipanski M E, Barbercheck M, Douglas M R, Finney D M, Haider K, Kaye J P, Kemanian A R, Mortensen D A, Ryan M R, Tooker J, White C. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems*, 2014, 125: 12-22.
- [57] Watanabe M D B, Ortega E. Dynamic emergy accounting of water and carbon ecosystem services: A model to simulate the impacts of land-use change. *Ecological Modelling*, 2014, 271: 113-131.
- [58] Zhao G, Liu J, Kuang W, Ouyang Z, Xie Z. Disturbance impacts of land use change on biodiversity conservation priority areas across China: 1990-2010. *Journal of Geographical Science*, 2015, 25(5): 515-529.
- [59] 李阳兵, 王世杰, 周德全. 茂兰岩溶森林的生态服务研究. 地球与环境, 2005, 33(2): 39-44.
- Li Y B, Wang S J, Zhou D Q. Research on the ecosystem service evaluation of Maolan karst forest. *Earth and Environment*, 2005, 33(2): 39-44. (in Chinese)
- [60] Mancinelli R, Campiglia E, Caporali F, Di Felice V. Habitat patch diversity evaluation for sustainability: A case study of a rural area in Central Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 2010, 4: 341-352.
- [61] Mancinelli R, Di Felice V, Radicetti E, Campiglia E. Impact of land ownership and altitude on biodiversity evaluated by indicators at the landscape level in Central Italy. *Land Use Policy*, 2015, 45: 43-51.
- [62] Christen B, Kjeldsen C, Dalgaard T, Martin-Ortega J. Can fuzzy cognitive mapping help in agricultural policy design and communication? *Land Use Policy*, 2015, 45: 64-75.
- [63] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-Being. A Framework for Assessment*. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [64] De Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [65] Dominati E, Patterson M, Mackay A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 2010, 69: 1858-1868.
- [66] Galic N, Schmolke A, Forbes V, Baveco H, van den Brink P. The role of ecological models in linking ecological risk assessment to ecosystem services in agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 93-100.
- [67] Balbi S, del Prado A, Gallejones P, Geevan C P, Pardo G, Pérez-Miñana E, Manrique R, Hernandez-Santigao C, Villa F. Modeling trade-offs among ecosystem services in agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software*, 2015, doi:10.1016/j.envsoft.2014.12.017.
- [68] Gervois S, Ciais P, de Noblet-Ducoudré N, Brisson N, Vuichard N, Viovy N. Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008. doi: 10.1029/2007GB003018.
- [69] Coleman K, Jenkinson D S. ROTHC-26.3. *A Model for the Turnover of Carbon in Soil. Model Description and Windows Users Guide*. Harpenden. 1999.
- [70] Parton W J, Hartman M D, Ojima D S, Schimel D S. DAYCENT: its land surface submodel: description and testing. *Global and Planetary Change*, 1998, 19: 35-48.
- [71] Del Grosso S J, Parton W J, Mosier A R, Hartman M D, Brenner J, Ojima D S, Schimel D S. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAYCENT model//Schaffer M, Ma L, Hansen S. Eds. *Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001: 303-332.
- [72] Williams M, Malhi Y, Nobre A D, Rastetter E B, Grace J, Pereira M G P. Seasonal variation in net carbon exchange and evapotranspiration in a Brazilian rain forest: A modelling analysis. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21(10): 953-968.
- [73] Bommarco R, Kleijn D, Potts S G. Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28: 230-238.

(责任编辑 杨鑫浩, 赵伶俐)