



再生农业——基于土地保护性利用的可持续农业

韩明会¹, 李保国^{2✉}, 张丹¹, 李颖¹

¹ 大自然保护协会, 北京 100600; ² 中国农业大学土地科学与技术学院/农业农村部华北耕地保育重点实验室/自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193

摘要: 在全球生态危机和不断增加的粮食和食品安全需求背景下, 如何真正实现农业的可持续发展成了全世界共同关注的问题。再生农业 (regenerative agriculture) 作为新挑战下应运而生的农业模式。探讨再生农业的内涵、国内外应用的生态和经济效益以及分析在我国的应用情景, 能够为我国这一新型农业模式的引入和发展提供理论指导。本文首先通过对相关再生农业定义的梳理, 把再生农业概述为是以实现农业可持续发展为目的, 基于土地保护性利用, 在减少机械作业和化学品投入的基础上, 通过基于自然的解决方案实现在提高作物产出的同时, 提升土壤有机质和氮元素、促进土壤固碳、改善土壤健康、最大化生物多样性的农业模式。通过与其他可持续农业模式相比, 从粮食安全、化石能源、碳封存、土壤健康、生物多样性、净水和净收益多个维度说明了再生农业能够实现粮食安全、土壤健康、生态环境和经济效益的同步改善。通过对国内外再生农业相关研究的分析, 表明了再生农业的不同措施能够使得生态和经济效益的多个方面效益得到显著提升。最后, 提出了我国未来不同区域发展再生农业模式的建议。

关键词: 再生农业; 基于自然的解决方案; 固碳; 土壤健康; 土地保护性利用

Regenerative Agriculture-Sustainable Agriculture Based on the Conservational Land Use

HAN MingHui¹, LI BaoGuo^{2✉}, ZHANG Dan¹, LI Ying¹

¹The Nature Conservancy, Beijing 100600; ²College of Land Science and Technology, China Agriculture University/Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193

Abstract: With the intensified global ecological crisis and the increasing demand for food and food safety, it has become a widespread concern of the whole world as to how to realize the sustainable development of agriculture. In this context, the regenerative agriculture was proposed and developed to cope with new challenges. This paper discussed the content, ecological and economic benefits of regenerative agriculture and analyzed the application scenarios in China, aiming to provide theoretical guidance for the introduction and development of this new agricultural model in China. To sum up, regenerative agriculture is a nature-based solution which has at its core the intention to improve the health of soil through elevated soil organic content and nitrogen elements as well as reduced chemicals input and mechanical operations, so as to realize the sustainable development of agriculture, namely enhanced soil carbon sequestration, maximized biodiversity and improved quality of water, vegetation and land-productivity. Compared to several other agriculture models with respect to multiple dimensions, regenerative agriculture stands out by simultaneously achieving improvements in food security, soil health, ecological environment and economic benefits. The advantages

收稿日期: 2020-06-24; 接受日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1706211)、国家重点研发计划项目 (2016YFD0300801)、Craig & Susan McCaw Foundation (P120148)、大自然保护协会 TNC-先正达“润田项目” (P120473)

联系方式: 韩明会, E-mail: han_minghui@163.com. 通信作者李保国, E-mail: libg@cau.edu.cn

of applying regenerative agriculture were further proved with specific cases. At last, suggestions on the development of regenerative agriculture in China were put forward.

Key words: regenerative agriculture; nature-based solution; carbon sequestration; soil health; conservational land use

1 提出背景和意义

1.1 发展背景

根据《联合国防治荒漠化公约》(UNCCD)^[1], 在过去 40 年里, 由于土壤退化和荒漠化, 世界 30% 的农田被遗弃, 而 52% 的农业用地受到土壤退化的中度至严重影响。土壤因人类活动, 主要是农业活动而退化。频繁翻耕或整地、灌溉、不合理施用化肥和农药、过度放牧以及重型农业装备使用, 都会造成土壤退化。开垦土地和毁林对土壤的形成和腐殖质的组成有着深刻的影响: 各种原始植被被次生植被所取代, 其中单一栽培会造成一系列生态环境问题。土壤的退化直接表现为土壤变为一个碳源, 更多土壤有机质分解释放二氧化碳到大气中, 还会导致土壤生物多样性的丧失, 且随着土壤的板结压实, 可改变地表反照率, 增加甲烷和一氧化二氮等温室气体的排放, 对全球变暖产生重要影响^[2]。据统计, 全世界 44% 的粮食生产系统和 50% 的牲畜被认为易受气候变化的影响, 且每年损失的耕地达 1 200 万公顷 (每分钟 23 公顷)。预计 2050 年要多生产 60% 的粮食才能满足人类的需求。而我们只能通过不断提高单位土地的生产力来实现^[1,3]。面对生态危机和粮食危机的双重胁迫, 全球科学家提出了有机农业 (organic agriculture)、保护性农业 (conservation agriculture)、低碳农业 (low carbon agriculture)、生态农业 (ecological agriculture) 等以实现可持续农业为目的的农业模式, 但是全球农业可持续危机仍在加剧。一个主要原因是这些模式没有真正从土地可持续利用或保护性利用为基础出发实现农业自身可持续的发展。据此, 20 世纪 80 年代罗伯特·罗代尔 (Robert Rodale) 探索提出了再生农业的概念。

“再生”一词本质上意味着“重新产生的能力”。因此, 如果一个项目或系统是再生的, 它就有内在的能力使自己不断更新永存。一个完全可持续/再生系统的完美例子是森林, 在那里没有废物, 系统完全自给自足。再生农业经罗代尔研究所 (Rodale Institute) 进行了 30 多年的探索试验后实现了二氧化碳排放量降低 35.3% 和利润增加 193.7% 的显著生态经济改善效果^[4-5]。利用再生农业的措

施, 不仅可以大幅增加现有土壤有机碳和氮元素的含量, 同时也可改善土壤结构和土壤健康, 提高土壤肥力和作物产量, 保持水分和蓄水层的补给, 从而提高应对极端天气的弹性。气候变化会增加土壤侵蚀、造成土壤质量和农业生产效率下降, 对粮食安全和全球可持续发展产生不利影响, 而再生农业良好的土壤管理措施则可增强土壤和植物减缓以及适应气候变化的能力^[2]。

2020 年荣获世界粮食奖的国际土壤科学联合会主席 Rattan Lal 将再生农业当作重要研究课题, 并认为该模式能够真正同时满足日益增加的粮食需求和生态环境改善需求^[6]。随着再生农业相关研究的不断深入, 越来越多的国际组织加入进来。2019 年, 再生农业被联合国开发计划署 (UNDP) 定为在全球变暖的严峻态势下有望应对生态脆弱地区农业可持续发展问题的、基于自然的解决方案^[7]。商业界对再生农业的投资也日益增加, 据土壤财富统计发现, 2019 年就有 70 项投资策略包括一个或多个与再生农业相关内容, 总资产达 475 亿美元^[8]。

在北美, 通过再生农业推广, 预计到 2025 年改善 0.96 亿公顷农牧土壤质量, 从而改善野生动物栖息地, 提高土壤碳储存能力和水质, 振兴农村经济^[9]。中国作为农业大国, 改革开放以来的集约化生产虽然增加了粮食产量, 但却付出了极大的生态环境代价, 威胁农业可持续发展。在当前满足中国粮食安全的绿色农业发展大趋势下, 再生农业是在满足粮食安全基础上, 实现农业绿色发展的重要途径。据此, 也有必要在中国进行再生农业措施的试验示范与推广模式的探索, 以期为新挑战下的农业可持续发展寻求可行的途径^[10-11]。

1.2 定义和原则

许多被贴上“可持续”标签的农业生产方式, 相对于传统的农业生产方式来说, 只是在某个方面做出了改进, 并没有考虑实现农业生态系统的可再生, 因而实际上只是减缓了土地退化的速度^[12]。采用“再生”做法需要从根本上重新设计系统, 以便通过自然生态系统服务功能恢复农业资源^[13]。再生农业作为全球新挑战下应运而生的农业模式, 国内外学者目前尚没有明确的定义, 其内容也在不断完善和发展中, 以下汇总了文献中提到的再生农业的定义 (表 1)。

表 1 再生农业的定义
Table 1 The definition of regenerative agriculture

角度 Perspective	定义内容 Definition	参考文献 Reference
特点 Characteristic	再生农业是一种趋向于闭合养分循环的农业模式，它使生物群落的多样性更大，最大程度依赖于内部资源而不是外部资源投入 Regenerative organic agriculture is marked by tendencies towards closed nutrient loops, greater diversity in the biological community, fewer annuals and more perennials, and greater reliance on internal rather than external resources	[5]
原则 Principle	最小土壤扰动、最大化生物多样性、保持土壤覆盖、保持全年活根和引入牲畜 Minimize soil disturbance; maximize crop diversity; keep the soil covered; maintain living root year-round; integrate livestock	[6,14-15]
措施 Practice	免耕少耕（或在耕作后积极重建土壤群落）；覆盖作物；培育田地的植物多样性（如多种作物轮作）；整合畜牧业和种植业（如整体放牧） (1) Abandoning/reducing tillage (or actively rebuilding soil communities following a tillage event); (2) Eliminating spatio-temporal events of bare soil by cover crop, etc; (3) Fostering plant diversity on the farm by crop rotation, etc; (4) Integrating livestock and cropping operations on the land such as holistic grazing	[15]
功能 Function	促进土壤肥力与健康；提高水的渗透和减少地表径流，净化水源；增加生物多样性，增强生态系统的健康和复原能力；将当前农业的碳排放转化为显著的碳封存 (1) Contribute to generating/building soils and soil fertility and health; (2) Increase water percolation, water retention, and clean and safe water runoff; (3) Increase biodiversity and ecosystem health and resiliency; (4) Invert the carbon emissions of our current agriculture to one of remarkably significant carbon sequestration thereby cleansing the atmosphere of legacy levels of CO ₂	[16]

总的来说，再生农业是以实现农业可持续发展为目的，基于土地保护性利用，在减少机械作业和化学品投入的基础上，通过基于自然的解决方案实现在提高作物产出的同时，提升土壤有机质和氮元素、促进土壤固碳、改善土壤健康、最大化生物多样性的农业模式。该模式以实现土壤功能再生为核心目标，考虑对整个农业生态环境的优化并最终实现粮食安全的长期保障^[6]。图 1 是再生农业的概念框架图。首先，再生农业中的覆盖作物和整体放牧措施可快速提高土壤有机质及氮元素含量^[17-18]；再生农业中的轮作与覆盖作物措施可抑制杂草的生长，且大大有利于提高农田的生物多样性^[19-20]，进而减少病虫害的数量。此外，免耕和覆盖作物还可有效减少水土流失^[21]，尤其是覆盖作物通过大量活的根系提高土壤的持水能力^[22]，节水净水能力^[23-24]，以及间接提高作物的抗旱能力^[25-26]。免耕、覆盖作物和整体放牧都是稳定和提高碳封存以减缓全球变暖的有效措施^[5,27]。再生农业通过采用基于自然的手段，减少机械和化学品的投入，对作物生长环境从本质进行全方位的优化和调整，提升作物产出和土壤健康状况，从而实现农业的可持续发展^[28]。

1.3 与保护性农业等的比较

虽然现在国内外学者提出了很多以实现可持续农业为目的的农业模式，如低碳农业（low carbon

agriculture）^[29]、有机农业（organic agriculture）^[30]、保护性农业（conservation agriculture）^[31]等，但是就可持续发展农业的几个重要方面评价来看^[32-33]，它们各有优势和不足（图 2）。

低碳农业是以减少大气温室气体含量为目标，以减少碳排放、增加碳固定以及适应气候变化的技术为手段的农业模式^[29]。与传统农业相比，它的优势在于通过减少化石能源的应用缓解气候变暖，并且重视通过土壤固碳措施提高土壤碳固定，且水污染得到一定缓解，但产量、净收益和生物多样性未得到明显提高^[29,34-36]。

有机农业是指不使用化学肥料和杀虫剂等农用化学品，而是依赖于当地生态过程和生物多样性的农业模式^[37]。它通过施用有机肥替代化肥，以增加土壤有机质，提高了农田的生物多样性。因为有机农产品的品质安全的保障，因此售价提升，收益增加，但是由于追求品质而忽略产量，因此不能实现满足所有人口粮食安全的目标，并且未能解决温室气体排放和水污染问题^[37-40]。

保护性农业（也称保护性耕作）被定义为将最小的土壤扰动（免耕、少耕）、永久土壤覆盖（覆盖物）与轮作相结合的耕作系统^[41]。由于减少土壤扰动，其相比传统农业可保护和增加生物多样性^[42]，秸秆还田

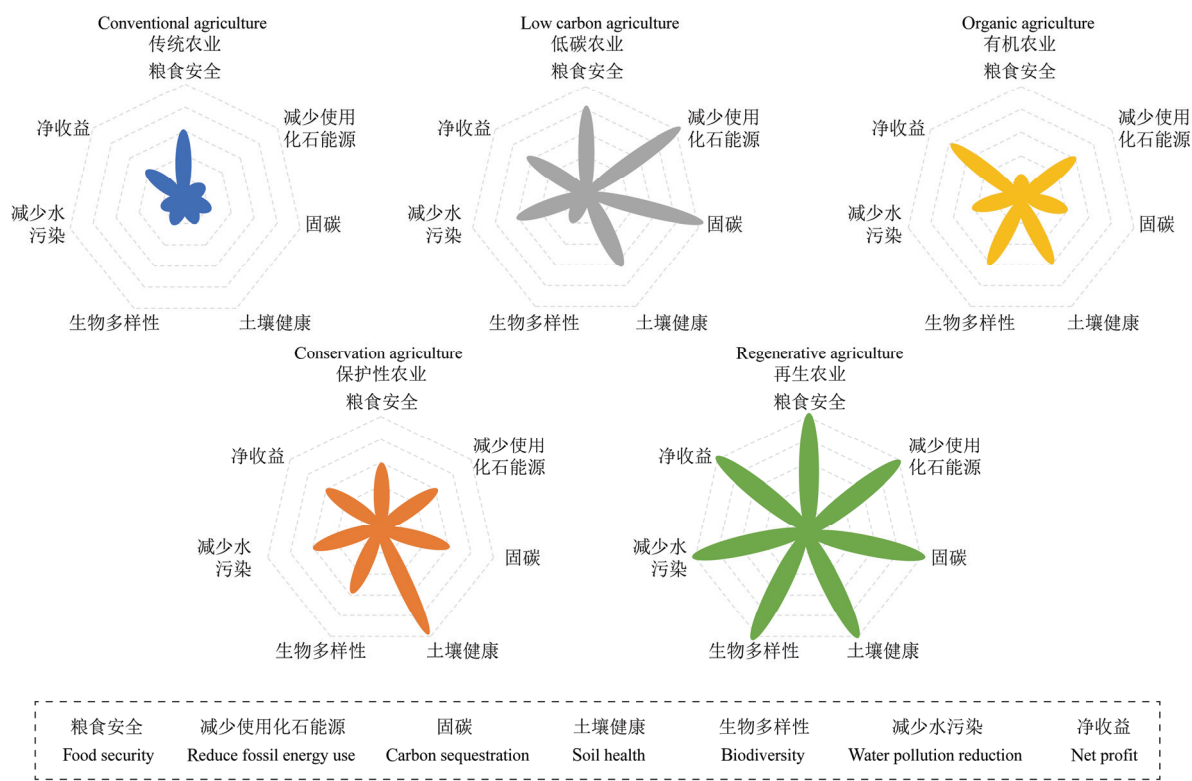


图 2 再生农业与其他可持续农业模式比较的文献分析

Fig. 2 A literature analysis comparing regenerative agriculture with other sustainable agriculture models

量，从而减少化学肥料的投入。在改善土壤健康方面，再生农业中的覆盖作物措施使大量活的植物根系扎于地下，增加了土壤孔隙度，改善了土壤物理性质，增加了水分渗透，提高土壤微生物丰度，从而可以达到更好的养分和水管理效果，并可大大减少土壤侵蚀^[25]。另外，覆盖作物还可以帮助早期杂草控制，能抑制地上地下的作物病虫害。除了对土壤本身的影响之外，再生农业还可显著降低生产投入成本，有效提高作物产量，达到降本增效的目的，增加生物固碳、减少碳排放，从而缓解气候变暖，增强农民应对气候变化的风险能力^[22]。保护性农业对减缓温室气体排放方面不如再生农业显著^[44]。另外，再生农业考虑动物福利，在此基础上提高畜牧产量和质量。

2 主要技术措施和效益

2.1 主要措施

2.1.1 免耕少耕 免耕少耕播种作业是在地表秸秆覆盖还田情况下，不耕整地或少耕后播种，以减少水蚀、风蚀，提高土壤肥力和抗旱能力的一项作业技术，其具有拦蓄径流、增加土壤入渗、改良土壤结构、优

化耕地环境等多重优点^[37]。

当免耕与其他再生农业措施相结合，可以增强土壤的渗水保水性能和稳定碳的储存^[16]。我国在 20 世纪 50 年代引入了这一技术，随着该技术的不断发展，我国免耕技术应用普及开来。经过多年努力，我国东北黑土地地区保护性耕作或免耕研究和技术推广取得明显进展^[51]。2020 年国家启动了东北黑土地保护性耕作行动计划，开始在适宜区域全面推广应用。

2.1.2 轮作 轮作是指在同一块土地上，按照规定顺序轮换种植不同作物的种植方式^[52]。作物轮作有利于提高生物的多样性，进而可促使均衡利用土壤中的各种元素，提高肥料利用率，可改良土壤结构，防止病虫害^[19]。多样化的生态系统，能够有效提升土壤的健康水平和生态服务功能。ZHAO 等^[53]通过对我国 45 项轮作研究的汇总分析得知，与连续单作耕作相比，轮作因其对土壤生态环境的多方面改善，使得作物单产提高 20%，且轮作对作物产量的影响在中国西南部（+38%）比在东部地区（+10%）更为明显。在砂质和壤质土壤上，即初始土壤有机碳（7—10 g·kg⁻¹）和较低的总氮（≤1.2 g·kg⁻¹）下，轮作具有更大的增产效益。

表 2 保护性农业与再生农业的比较

Table 2 The comparison between conservation agriculture and regenerative agriculture

农业类型	保护性农业 ^[48-49]	再生农业 ^[2]
Agro-type	Conservation agriculture	Regenerative agriculture
提出背景	耕作加速土壤荒漠化/退化	有限的耕地如何应对人口增加、粮食和食品安全、极端天气频发、气候变化
Background	Tillage accelerates soil desertification/degradation	Challenges of population growth, food security, climate change etc.
主要原则	最小土壤扰动；提高生物多样性和保持土壤覆盖	最小土壤扰动；最大化生物多样性；保持土壤覆盖；保持全年活根和引入牲畜 ^[14-15]
Principles	Minimum mechanical soil disturbance; species diversification; permanent soil organic cover	Minimize soil disturbance; maximize crop diversity; keep the soil covered; maintain living root year-round; integrate livestock
主要措施	免耕少耕、轮作、秸秆覆盖还田/覆盖作物	免耕少耕、轮作、覆盖作物、整体放牧
Main practices	No-till/reduced tillage; crop rotation; soil organic cover (at least 30%) with crop residues and/or cover crops	No-till/reduced tillage; crop rotation; cover crop; holistic grazing
对土壤影响	改善土壤结构，提高土壤有机质含量；增强土壤持水能力，减少土壤侵蚀，维护生物多样性，控制杂草	改善土壤结构，大幅提高土壤有机质和氮元素含量，增强土壤持水能力，减少水土流失，防止土壤侵蚀，增加生物多样性（尤其是土壤微生物多样性），控制杂草 ^[25]
Impact on soil	Improve soil structure and increase soil organic matter content; enhance soil water retention, reduce soil erosion, maintain biodiversity, and control weeds	Improve soil structure, substantially increase soil organic matter and nitrogen content, enhance soil water-holding capacity, reduce soil erosion, prevent soil erosion, increase biodiversity (especially soil microbial diversity), and control weeds
减少化肥投入	在一年一季的地区可以减少氮肥投入，但某些地区需要增加氮肥投入，调节因为秸秆还田而不平衡的碳氮比 ^[37, 44]	养分有机转化以及整体放牧的粪肥，能够减少无机化肥投入
Fertilizer	Nitrogen fertilizer input can be reduced in seasonal areas, but it needs to be increased in some areas to adjust the imbalance of carbon nitrogen ratio due to straw returning	Organic conversion of nutrients and integrated grazing of manure can reduce the input of inorganic fertilizers
动物福利	无影响	提升动物福利，提高畜牧产量和质量 ^[4]
Animal welfare	No effect	Improve animal welfare, livestock production and quality
国外发展情况	免耕少耕和秸秆还田已大面积推广	覆盖作物和整体放牧初具规模，发展迅速
Development abroad	No-till/reduced tillage and straw returning have been widely spread	Cover crops and holistic grazing have taken shape and developed rapidly
我国发展情况	免耕少耕和秸秆还田在我国多省快速发展 ^[50]	覆盖作物和整体放牧尚未得到发展
Development in China	No-till/reduced tillage and straw returning are developing rapidly in many provinces of China	Cover crops and holistic grazing have not been developed

2.1.3 覆盖作物 在两季作物之间,许多农田会有一段时间没有种植作物的空闲时间。如果在这段时间种上某种植物以提供稳定的土壤覆盖,这种植物便被称为“覆盖作物 (cover crop)”^[37]。覆盖作物是再生农业的关键技术,它们可以保护土壤免受风和水的侵蚀,减少径流泥沙和养分流失,可保持土壤肥力,从而减少氮肥施加。在美国西北太平洋地区进行的一项研究表明,奥地利冬季豌豆、多毛野豌豆和紫花苜蓿 (Austrian winter peas, hairy vetch and NITRO alfalfa) 可以为后续马铃薯作物提供 80%到 100%的氮需求^[18]。覆盖作物也是缓解水污染、改善水质的重要措施^[23,54]。另一项研究显示,黑麦覆盖能够迅速吸收乔治亚州 (Georgia State) 传统玉米田和免耕玉米田中 25%到 100%的残留氮,减少过量氮肥对周围水体的面源污染^[55]。覆盖

植物能够有效控制杂草和积累土壤碳。理想的覆盖作物是那些能在开花前终止其生长,这样他们就不会产出种子从而变成杂草。在它们活着的时候,其光合作用是土壤碳的一个重要来源,死后可作为生物质被利用^[56]。

在美国农民的种植实践中发现,覆盖作物可以快速改善土壤健康,让玉米和大豆在干旱年份增产 9.6%和 11.6%,因此最近几年覆盖作物在美国迅速推广^[57-58]。覆盖作物和保护性耕作中提倡的作物残茬覆盖不同,前者是在农田空闲期种植的活的覆盖作物,而后者是将收获的作物秸秆和残茬保留在地表从而使土壤得到覆盖。覆盖作物不仅增加了生物多样性,还大大提升了土壤生物质的量。覆盖作物因其不同的特质具有不同的功能,如有庞大根系的黑麦草,高达 2 m

可抑制杂草的高丹草和遏制土壤板结的毛苕子等, 因此混合播种也是其发展的趋势。美国覆盖作物种植面积在 2017 年达到 623 万公顷, 同比 5 年前增长 50%^[59], 而该措施在我国的相关研究和应用大多只局限在豆科绿肥 (“绿肥” 属于覆盖作物的一类, 种植目的是为土壤提供有机物质和养分, 但再生农业所包括的覆盖作物措施的生态效益不仅限于此), 其种植区主要分布在我国稻区、华北、西北、西南地区, 且在 20 世纪 70 年代达到最高峰, 面积最高年份约 1 300 万公顷, 但由于化肥的普及, 而后种植面积迅速减少^[60-61]。

2.1.4 整体放牧 虽然我国种植业与养殖业发展迅速, 但饲料粮供给总体不足, 营养缺乏、价格高成为近年来国内畜牧业发展的制约因素。整体放牧是一种考虑动物福利的模式, 从而提高畜牧业产品的产量和质量^[4]。传统圈养饲养系统往往是不健康的单一生产系统, 喂养的饲料营养密度低, 且该系统增加了水污染和抗生素的使用。整体放牧是由 Allan SAVORY 提出, 意在模拟大自然本身的形态, 让成群被驯养的动物 (主要是牛) 适时地在田地上迁移, 它们的粪、尿也排放于土壤上^[2,62]。良好的放牧措施促进了植物生长, 增加了土壤碳沉积, 提高了整个牧场的生产力, 同时大大提高了土壤肥力、昆虫和植物的生物多样性, 以及土壤的固碳能力。这些措施不仅改善了生态健康, 也改善了动物和消费者的健康^[62-63]。采用整体放牧可以在几年内快速重建土壤表层 (一般一层土壤可能需要 200—1 000 年才能形成), 而且新建的土壤表层富含生物体^[17]。这也被实践证实: 在 3 年的时间里成功培育出了 10 cm 厚的土层^[64]。在一项为期 10 年的试验中, 发现使用堆肥牛粪进行轮作的田地每年每公顷可吸收超过 2 吨的碳^[65]。此外, 当用堆肥代替合成氮肥时, 则可促使植物长出更多的根, 使植物固定更多的二氧化碳^[66]。同时整体放牧还能够通过提高动物福利 (世界农场动物福利协会 (CIWF) 制定的动物福利 “五大自由”), 提升畜牧业产品的产量和质量。

2.2 生态和经济效益

2.2.1 改善土壤质量, 减少水土流失 覆盖作物和整体放牧是增加有机质、提高土壤持水量的有效措施^[67]。增加的有机物间接增加了土壤孔隙度 (通过增加土壤动物活动), 渗透到土壤中的雨水比例取决于所提供的土壤覆盖量。覆盖在土壤表面的植物也可保护土壤免受雨滴的冲击而结块和结皮, 从而增强雨水的渗透性并减少径流。研究表明覆盖作物使土壤保水

性和植物可利用水分分别提高 10%—11% 和 21%—22%^[24]。另外, 富含碳的土壤也往往更能抵抗干旱胁迫和病虫害等^[68]。再生农业不仅有减少水土流失的效果, 其措施还可以降低水污染^[25,69]。根据多年生黑麦草作为大麦的覆盖作物对硝酸盐淋失和主要作物氮的有效性试验表明, 覆盖作物使硝酸盐浸出浓度从 10—18 mg·L⁻¹ 降低了不到 5 mg·L⁻¹^[69]。

2.2.2 增加生物多样性 再生农业中的轮作和覆盖作物 (种植各种类型的覆盖作物和混合物) 措施都有利于提高田地里的生物多样性。覆盖作物可为有益昆虫提供栖息地, 提高种群多样性, 进一步控制害虫种群。覆盖作物也有助于吸引传粉昆虫以提高作物田间的授粉率^[20]。随着对土壤碳稳定机制认识的不断深入, 研究发现土壤生物群落在其中扮演着重要的角色, 真菌生物量的丰度与土壤碳的丰度呈正相关^[70]。

2.2.3 提高作物产量和质量 植物的生产力与土壤有机质紧密相关^[71]。再生农业可大大提高土壤有机质含量, 土壤碳储存的增加会积累更多的团聚体, 团聚体能够辅助土壤保持住水分, 改善作物质量和产量^[72]。当植物有充足的阳光、养分、水、氧气、二氧化碳时, 植物才能处于最佳的健康状态。在再生农业中, 高碳储条件能够培育有着多样和大量微生物的健康土壤, 这使作物有着高营养密度, 抗病虫害, 富含抗氧化剂和较长的保存期限^[73]。另外, 健康的植物会合成更多易挥发的分子与更多的代谢物使粮食作物产生香味和香气。使农民获得高产, 口感更好的作物, 消费者得到更健康的食品^[56]。

2.2.4 减少温室气体排放 2018 年, 全球温室气体排放量为 553 亿吨, 其中二氧化碳排放占大部分 (375 亿吨)^[74]。来自农业系统和牧场试验的数据表明, 如果采用免耕, 种植覆盖作物, 加强作物轮作, 以及堆肥和轮牧等措施, 碳可以被土壤高效固定^[5,75]。如果所有现有农田 (15 亿公顷的农田) 各种作物都能采用覆盖作物措施, 土壤可以封存 2018 年二氧化碳排放总量的 4%^[76], 但若联合其他再生农业措施, 如堆肥^[77]、多种作物轮作^[78]等则可将碳封存量分别提高到 11.6% 和 32.11%。特别地, 针对全球热带地区的玉米作物实践覆盖作物措施的研究表明, 该措施可使玉米地碳 (CO₂) 封存量高达 21.28 t·hm⁻²·a⁻¹^[79]。与此同时, 如果所有的全球牧场 (33 亿公顷的草地) 都采用再生模式 (尤其是再生放牧系统), 那么额外地, 每年二氧化碳排放总量的 114%—355% 可被封存于地下, 使地球实现二氧化碳负排放的情景^[80-81]。

2.2.5 农场及非农经济效益预估 对于再生农业可带来的经济效益,以美国为例进行了模拟研究结果表明:美国玉米、大豆或小麦农田每增加 1%的再生农业措施(仅涵盖了免耕、轮作、覆盖作物)实践面积,将产生非农经济效益包括温室气体排放减少、营养损失减少、土壤侵蚀降低和节水净水等分别为 0.297 亿美元、0.901 亿美元、0.758 亿美元和 0.306 亿美元,即一共 2.26 亿美元,而若将推广面积增加到 50%则可产生 74.35 亿美元,推广到 100%的农田则有 187.44 亿美元的潜在社会效益^[9]。另外,据统计,美国玉米地每增加 1%的再生农业推广面积,可提高的潜在农场经济效益为 3 670 万美元/年^[9]。针对再生农业可带来的巨大效益,大自然保护协会(TNC)联合美国农业部(USDA)、美国国家自然资源保护委员会(NRCS)和美国能源部(DOE)等政府机构以及土壤健康合作伙伴和土壤健康研究所等实践再生农业措施,目标是到 2025 年,减少 2 500 万吨的温室气体排放,减少 15.6 万吨养分损失,减少 1.16 亿吨的土壤侵蚀和在农田土壤中创造 44.4 亿立方米的可用水^[9]。

2.3 典型案例剖析

2.3.1 罗代尔研究所针对玉米和大豆的农业模式对比研究 罗代尔研究所联合各地相关研究人员在世界各地展开了超过 30 年的再生农业长期实践效果监测,如在美国中西部和哥斯达黎加新热带农业区域等^[5]。鉴于玉米和大豆在美国的种植面积占到总面积的近一半,因此这两种作物被定为研究重点,其中再生农业采取的主要技术措施包括免耕、轮作(8 年内 7 种作物)、种植覆盖作物和施用有机粪肥(不同于整体放牧)。传统农业的主要技术措施包括连续耕作、施用杀虫剂以及在种植空闲期土地裸露。通过再生农业的采用发现,与传统农业相比明显提高了土壤有机质含量,迅速改善了当地土壤健康。在不影响产量的前提下,该地区的农民不但可以减少 28.5%的能量投入,还可增加近两倍利润,并且有效帮助减少 35.3%的温室气体的排放^[5]。

2.3.2 南达科塔州立大学针对玉米的农业模式对比研究 玉米作为一种重要的粮食作物,在世界上占有重要地位,其种植面积占有所有作物面积的 39.9%^[82]。为了探究再生农业这一农业模式对玉米地的多重影响,LACANNE 等^[15]在美国北部平原区 10 个农场的 40 块田地开展了再生农业试验,其措施包括免耕、播种多种覆盖作物(2—40 种)、不使用杀虫剂且在农

田放牧牲畜。与之对比的是传统农业模式(8 个农场的 36 块田),其措施包括每年连续耕作、施用杀虫剂以及在种植空闲期土地裸露。

研究人员就再生和传统玉米生产系统对害虫、土壤和农民利润等的相对影响进行评估,发现杀虫剂处理过的玉米田的害虫数量是无杀虫剂的再生农场的 10 倍,这表明再生农场丰富的生物多样性对害虫有明显的抑制作用。传统农业模式下的农场所需的种子和肥料金额占到总收入的 32%,而再生农业模式下该投入只占 12%。由于再生农业的肥料等资金投入大大减少,且肉产品等的收入增加,最后的净利润相比传统农业提高了 78%^[15],可见再生农业的重要经济效益。并且利润大小和土壤有机质含量呈显著正相关。有机质的增加(主要通过覆盖作物和整体放牧)可提高水的渗透率,促进生物多样性,进而抑制单一害虫的繁殖,促进土壤健康。

3 中国再生农业的发展探讨

我国耕地资源的稀缺性日益突出,已成为我国农业生产和国民经济可持续发展的瓶颈^[83]。中国的人地矛盾在世界上是最尖锐突出的^[84],我国 2004 年的人均耕地面积不足世界平均水平的 40%^[85],其中 72%的耕地质量较差、产量不高。我国北方粮食主产区更是用全国 19%的水资源灌溉着 62%的耕地^[83]。近些年,随着我国对可持续发展农业模式不断研究和优化,目前全国 6 个农业生产区域基于其自然资源禀赋、农业生产现状及存在问题,发展出其各自可持续发展模式及特征^[86]。以下针对这 6 个区域其各自特点又进一步归类为 4 类区域,并提出了初步的研究建议和途径。

3.1 东北地区

黑土是世界公认最肥沃的土壤。我国东北黑土区是全球仅有的四片黑土区之一,是我国重要的商品粮基地。由于多年高强度开发利用,我国东北多地每年春耕季节掀起铺天盖地的沙尘暴,农田的珍贵表土大量流失,再加上用养失衡,黑土地土壤有机质含量显著下降,这严重威胁着国家粮食安全基础的稳固,因此黑土地保护刻不容缓^[87]。因此,东北区应该加快推广如“梨树模式”的保护性耕作等适宜的黑土地保护技术^[51]。在某些作物种植模式如马铃薯和花生、全株收割的青贮玉米等优势产区,应进行覆盖作物的种植探索,有望解决马铃薯和花生及青贮玉米产区因长达 7 个月的冬季地表严重裸露风蚀造成的农田土壤退化

问题,保障农户长期经济收益和提高土壤健康的覆盖作物模式。

近些年,我国东北区(辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古东部)已发展出“玉米青贮—奶牛、肉牛生态养殖—粪污处理还田”的现代种养循环模式^[86]。这在东北西部风沙盐碱地区,值得大力推广并进一步完善(如保持高留茬)。这些对农牧业结合理念的重视对再生农业模式的推广奠定了良好基础。未来需要考虑综合效益和可行性,进行有针对性的研究和试验,探索区域差异性的种养结合方式。内蒙古某些地区长期以来过度放牧已造成草地严重退化,使得草地的可持续利用难以为继,为了促进草地的恢复和修复地的可持续管理,已试点整体放牧措施^[88]。

3.2 黄淮海平原地区

作为粮食主产区的黄淮海平原地区则面临着气候干旱和水资源缺乏、耕地质量下降、生产资源成本提高等不利于农业可持续发展的问题^[89-90]。此外,随着全球气候不断变暖,降雨量不足的问题日益加重。由于全球变暖对北方干湿的负面影响较大,北方气候干湿空间分布格局的变化同时也对农业需水、作物布局和种植制度产生重大影响。贾艳青等通过对中国 1981—2010 年的干湿气候状况进行区划,分析了干湿气候界线的移动变化及干湿区域差异特征,发现干旱化趋势主要发生在华北和东北部分地区^[91],在半干旱加剧的区域进行水分高效利用的再生农业的推广更具有深远意义。黄淮海地区与中部平原区主要为夏玉米-冬小麦一年两熟的农业模式,因而可产生大量秸秆,且农田空闲期很短,因此秸秆还田相比覆盖作物可能对该地区的农户更为适宜。研究发现免耕和秸秆覆盖的联合举措对半干旱气候下的雨养农业生态系统作物产量的提升颇有效果,并且可增加土壤水稳定团聚体 24.2%,大大提高土壤持水能力和土壤水分利用率,从而起到抗旱节水效果^[92-93]。在滨海或黄河三角洲地区,也应该以再生农业的理念以农牧结合或整体放牧的方式进行盐渍化土地的开发利用。

3.3 西北灌区

我国西北地区生态环境脆弱,荒漠区面积占全国荒漠区总面积的 63.7%,是一个资源性缺水大区,水资源开发中的生态与经济矛盾十分突出^[94],该地区大部分干旱区年降水量在 200 mm 以下^[95],且土地瘠薄。农业生产的精华地在绿洲,农田灌溉用水占总用水量接近 70%,部分地区农业用水比例达到

了 90% 以上^[96]。西北绿洲灌溉地区作物多在秋天收获,冬天农田裸露时间长达 7 个月,大风加剧了表土的流失,到春季又可能使得表层积盐加剧,秸秆覆盖免耕可通过减少翻耕次数保护土壤结构,防治水土流失、土地沙化与土壤盐渍化。针对西北绿洲农业发展主要挑战,覆盖作物的种植将有效缓解冬天表层土流失并加强土壤持水能力,但覆盖作物的种植也要消耗珍贵的水资源,如何真正做到节水保水控盐下绿洲土地的可持续利用,今后应加强在有限水资源的供给条件下,探索周年多年尺度下的绿洲再生农业模式。

3.4 长江中下游、华南和西南地区

我国南方地区水资源丰富。由于化肥、农药等长期投入较高的原因我国南方土壤污染重于北方,其中长江中下游地区面临严重水体面源污染,江河湖水体富营养化问题也引发担忧^[97-99]。而南方的红壤地区更是水土流失和土壤酸化严重地区^[86]。我国根据南方各地区的特殊情况发展了各具特色的可持续发展农业模式,如长江中下游的鱼虾—水稻田综合种养模式,“猪—沼肥—作物—猪”的生态循环农业模式;华南区的蚕桑循环种养模式等^[86]。鉴于南方的农户耕地面积较小以及其自然生态环境情况,以上种养模式相比整体放牧更为适合当地农业。为有效解决水污染、水土流失和土壤酸化问题,可在现有绿肥种植的基础上,考虑引入多种覆盖作物,发展创新红壤旱作农区的再生农业模式,以防治水土流失,提高与稳定土壤有机质的含量,减少化肥施用,从而真正防治此区内土壤退化,并使旱作红壤的地力再生。由于覆盖作物需要一定资金投入(主要是作物种子和除草剂),在南方高经济价值的水果种植区(可接受额外资金投入)应用覆盖作物将有可观收益^[100]。我国南方部分地区也引入了覆盖作物这一农业实践。如四川绵竹猕猴桃产业园区、河南丹江水库樱桃种植区、千岛湖水源保护区坡地茶园等。还需要提到的是由于我国南方地区水热条件丰富,通过覆盖作物的推广还将能大力发挥此区草牧业的发展优势,能做到整体放牧模式广泛实施。

参考文献 References

- [1] United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) (n.d.) Desertification, land degradation and drought: Some global facts and figures. <http://www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/WDCD/DLDD%20Facts.pdf>.

- [2] RHODES C J. The imperative for regenerative agriculture. *Science Progress*, 2019, 100(1): 80-129.
- [3] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, HADDAD L, LAWRENCE D, MUIR J F, PRETTY J, ROBINSON S, THOMAS S M, TOULMIN C. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818.
- [4] Regenerative organic agriculture. <https://rodaleinstitute.org>.
- [5] Rodale Institute. Regenerative organic agriculture and climate change. http://rodaleinstitute.org/assets/RegenOrgAgricultureAndClimateChange_20140418.pdf.
- [6] LAL R. Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020: 75(5):123A-124A
- [7] United Nations Development Program (UNDP). Nature-based solutions for climate in Latin America and the caribbean. <https://www.ndcs.undp.org/content/ndc-support-programme/en/home/ndc-events/global-and-regional/latin-america-caribbean-climate-week-ndc-dialogues.html>.
- [8] ELECTRIS C, HUMPHREYS J, LANG K, LEZAKS D, SILVERSTEIN J. Soil wealth-Investing in regenerative agriculture across asset classes. <http://www.croataninstitute.org/images/publications/soil-wealth-2019.pdf>.
- [9] The nature conservancy. Rethink soil - A road map to U.S. soil health. https://connect.tnc.org/sites/globallink/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=/sites/globallink/library/reThink%20Soil%20Executive%20Summary_FINAL.pdf&action=default&DefaultItemOpen=1.
- [10] 杨光. 先正达与大自然保护协会合作 推进以自然环境为导向的创新. *农药市场信息*, 2019(10): 50.
YANG G. Syngenta works with the nature conservancy to promote environmentally oriented innovation. *Pesticide Market News*, 2019(10): 50. (in Chinese)
- [11] 大自然保护协会. 2020 年张家口可持续农业项目培训会暨现场观摩会召开. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1677353546098010828&wfr=spider&for=pc>.
The Nature Conservancy. Zhangjiakou Sustainable Agriculture Project Training Meeting and On-site Observation Meeting was held in 2020. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1677353546098010828&wfr=spider&for=pc>. (in Chinese)
- [12] RHODES C J. Permaculture: Regenerative-not merely sustainable. *Science Progress*, 2015, 98(4): 403-412.
- [13] JONES C. Recognise relate innovate, 2003. <http://www.amazingcarbon.com/PDF/JONES-RecogniseRelateInnovate.pdf>.
- [14] General Mills. Regenerative Agriculture. <https://www.generalmills.com/Responsibility/Sustainability/Regenerative-agriculture>.
- [15] LACANNE C E, LUNDGREN J G. Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 2018, 6: e4428.
- [16] Regeneration Agriculture Initiative and the Carbon Underground. What is Regenerative Agriculture? *Regen. Intl*. Available online: <http://www.regenerationinternational.org/2017/02/24/what-is-regenerative-agriculture/>
- [17] JONES C. Creating new soils. <http://creatingnewsoil.blogspot.co.uk>.
- [18] STARK J C. Development of sustainable potato production systems for the Pacific NW. SARE Project report #LW91-029. Western Region SARE. Logan, Utah. www.sare.org/projects.
- [19] BALL B C, BINGHAM I, REES R M, WATSON C A, LITTERICK A. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 2005, 85(5): 557-577.
- [20] ZABLOTOWICZ R M, LOCKE M A, GASTON L A. Tillage and cover effects on soil microbial properties and fluometuron degradation. *Biology & Fertility of Soils*, 2007, 44(1): 27-35.
- [21] WILLIAMS J D, GOLLANY H T, SIEMENS M C, WUEST S B, LONG D S. Comparison of runoff, soil erosion, and winter wheat yields from no-till and inversion tillage production systems in northeastern Oregon. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2009, 64(1): 43-52.
- [22] KAYE J P, QUEMADA M. Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(1): 4.
- [23] BLANCO-CANQUI H. Cover crops and water quality. *Agronomy Journal*, 2018, 110(5): 1633-1647.
- [24] BASCHE A D, KASPAR T C, ARCHONTOULIS S V, JAYNES D B, SAUER T J, PARKIN T B, MIGUEZ F E. Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 2016, 172: 40-50.
- [25] SHARMA P, SINGH A, KAHLON C S, BRAR A S, GROVER K K, DIA M, STEINER R L. The role of cover crops towards sustainable soil health and agriculture-A review paper. *American Journal of Plant Sciences*, 2018, 9(9): 1935-1951.
- [26] Andy Clark. Cover Crops. <https://www.sare.org/Learning-Center/Topic-Rooms/Cover-Crops>.
- [27] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change

- and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [28] Regeneration International. <https://regenerationinternational.org/why-regenerative-agriculture/>.
- [29] NORSE D. Low carbon agriculture: Objectives and policy pathways. *Environmental Development*, 2012, 1(1): 25-39.
- [30] WILLER H, LERNOUD J. The world of organic agriculture. Statistics and emerging trends. Research Institute of Organic Agriculture FiBL and IFOAM Organics International, Bonn, 2019.
- [31] HOBBS P R, SAYRE K, GUPTA R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 543-555.
- [32] VELTEN S, LEVENTON J, JAGER N, NEWIG J. What is sustainable agriculture? A systematic review. *Sustainability*, 2015, 7: 7833-7865.
- [33] WIRÉN-LEHR S V. Sustainability in agriculture - An evaluation of principal goal-oriented concepts to close the gap between theory and practice. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2001, 84(2): 115-129.
- [34] SÁ J C D M, LAL R, CERRI C C, LORENZ K, HUNGRIA M, DE FACCIO CARVALHO P C. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, 2017, 98: 102-112.
- [35] CSABA F, NABRADI A. Proposals for low-carbon agriculture production strategies between 2020 and 2030 in Hungary. *Applied Studies in Agribusiness and Commerce*, 2016, 9(4): 5-16.
- [36] 张丹, 张卫峰. 低碳农业与农作物碳足迹核算研究述评. *资源科学*, 2016, 38(7): 1395-1405.
- ZHANG D, ZHANG W F. Low carbon agriculture and a review of calculation methods for crop production carbon footprint accounting. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1395-1405. (in Chinese)
- [37] ROSA-SCHLEICH J, LOOS J, MUBHOFF O, TSCHARNTKE T. Ecological-economic trade-offs of diversified farming systems—A review. *Ecological Economics*, 2019, 160: 251-263.
- [38] LU H, CHANG Y, WU B. The compare organic farm and conventional farm to improve sustainable agriculture, ecosystems, and environment. *Organic Agriculture*, 2020, 10(6): 409-418.
- [39] MULLER A, SCHADER C, EL-HAGE SCIALABBA N, BRÜGGEMANN J, ISENSEE A, ERB K, SMITH P, KLOCKE P, LEIBER F, STOLZE M. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1290.
- [40] CROWDER D W, NORTHFIELD T D, STRAND M R, SNYDER W E. Organic agriculture promotes evenness and natural pest control. *Nature*, 2010, 466(7302): 109-112.
- [41] HOBBS P R, SAYRE K, GUPTA R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 543-555.
- [42] MAFONGOYA P, RUSINAMHODZI L, SIZIBA S, THIERFELDER C, MVUMI B M, NHAU B, HOVE L, CHIVENGE P. Maize productivity and profitability in Conservation Agriculture systems across agro-ecological regions in Zimbabwe: A review of knowledge and practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 220: 211-225.
- [43] PITTELKOW C M, LIANG X, LINQUIST B A, VAN GROENIGEN K J, LEE J, LUNDY M E, VAN GESTEL N, SIX J, VENTEREA R T. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 2015, 517(7534): 365-368.
- [44] PALM C, BLANCO-CANQUI H, DECLERCK F, GATERE L, GRACE P. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 187: 87-105.
- [45] ABDALLA M, OSBORNE B, LANIGAN G, FORRISTAL D, WILLIAMS M, SMITH P, JONES M B. Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions. *Soil Use and Management*, 2013, 29(2): 199-209.
- [46] 朱晓晴, 安晶, 马玲, 陈松岭, 李嘉琦, 邹洪涛, 张玉龙. 秸秆还田深度对土壤温室气体排放及玉米产量的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(5): 977-989.
- ZHU X Q, AN J, MA L, CHEN S L, LI J Q, ZOU H T, ZHANG Y L. Application and environmental effects of one-off fertilization technique in major cereal crops in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(5): 977-989. (in Chinese)
- [47] GOSNELL H, GILL N, VOYER M. Transformational adaptation on the farm: Processes of change and persistence in transitions to 'climate-smart' regenerative agriculture. *Global Environmental Change*, 2019, 59: 101965.
- [48] PALM C, BLANCO-CANQUI H, DECLERCK F, GATERE L, GRACE P. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 187: 87-105.
- [49] FAO. Conservation-agriculture. <http://www.fao.org/conservation-agriculture/zh/>.

- [50] 胡立峰. 中国保护性耕作试验研究的产量效应. 东北农业科学, 2020, 45(4): 40-44.
HU L F. Yield effects of conservation tillage experiments in China. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(4): 40-44. (in Chinese)
- [51] 李保国, 王贵满. 东北地区的保护性耕作技术—梨树模式. 北京: 科学技术文献出版社, 2019: 150.
LI B G, WANG G M. Conservation Tillage Technique in Northeast China - Pear Tree Model. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 2019: 150. (in Chinese)
- [52] KARLEN D L, VARVEL G E, BULLOCK D G, CRUSE R M. Crop rotations for the 21st century. Advances in Agronomy, 1994, 53: 1-45.
- [53] ZHAO J, YANG Y, ZHANG K, JEONG J, ZENG Z, ZANG H. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis. Field Crops Research, 2020, 245: 107659.
- [54] 刘芳, 金美艳, 何丽, 王显国, 李颖, 曾楠, PARMODH S, ATINDERPAL S, CHARANJIT S K. 饲草作物对土壤健康与农业可持续发展的作用. 中国饲料, 2020(1): 101-106.
LIU F, JIN M Y, HE L, WANG X G, LI Y, ZENG N, PARMODH S, ATINDERPAL S, CHARANJIT S K. The role of cover crops towards sustainable soil health and agriculture-A review paper. China Feed, 2020(1): 101-106. (in Chinese)
- [55] JORDAN J L, MORGAN S L, ELNAGHEEB A H. An economic analysis of cover crop use in Georgia to protect groundwater quality. Research Bulletin, 1994, 6(419): 13.
- [56] Regeneration International. Soil Carbon Restoration: Can Biology do the Job? <https://regenerationinternational.org/2015/10/05/soil-carbon-restoration-can-biology-do-the-job/>.
- [57] MYERS R, WATTS C. Progress and perspectives with cover crops: Interpreting three years of farmer surveys on cover crops. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 70(6): 125A-129A.
- [58] DELGADO J A, DILLON M A, SPARKS R T, ESSAH S Y C. A decade of advances in cover crops. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 62(5): 110A-117A.
- [59] United States Department of Agriculture. 2017 Census Full Report. https://www.nass.usda.gov/Publications/AgCensus/2017/Full_Report.
- [60] 李子双, 廉晓娟, 王薇, 赵同凯, 李洪杰. 我国绿肥的研究进展. 草业科学, 2013, 30(7): 1135-1140.
LI Z S, LIAN X J, WANG W, ZHAO T K, LI H J. Research progress of green manure in China. Pratacultural Science, 2013, 30(7): 1135-1140. (in Chinese)
- [61] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 聂军, 高亚军, 耿明建. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(6): 1450-1461.
CAO W D, BAO X G, XU C X, NIE J, GAO Y J, GENG M J. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1450-1461. (in Chinese)
- [62] 艾伦·雪柏利, 克里斯多佛·派克, 吴立金. 整体管理助推可持续发展. 环境, 2007(11): 46-49.
SAVORY A, PARKER C, WU L J. Holistic management help to establish the sustainable world. Environment, 2007(11): 46-49. (in Chinese)
- [63] CNN. Put down that veggie burger. These farmers say their cows can solve the climate crisis. <https://edition.cnn.com/2020/03/06/africa/agriculture-regenerative-farming-climate-crisis-intl/index.html>.
- [64] Yeomans Plow Co. (n.d.) The keyline plow. <http://yeomansplow.com.au/8-yeomans-keyline-systems-explained>.
- [65] HEPPERLY P, LOTTER D, ULSH C Z, SEIDEL R, REIDER C. Compost, manure and synthetic fertilizer influences crop yields, soil properties, nitrate leaching and crop nutrient content. Compost Science & Utilization, 2009, 17(2): 117-126.
- [66] KHORRAMDEL S, KOOCHEKI A, MAHALLATE M, KHORASANI R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems. Soil and Tillage Research, 2013, 133: 25-31.
- [67] Rodale Institute. Literature review: crop & livestock integration. <https://rodaleinstitute.org/science/articles/literature-review-crop-livestock-integration>.
- [68] RHODES C J. Feeding and healing the world: Through regenerative agriculture and permaculture. Science Progress, 2012, 95(4): 345-446.
- [69] BERGSTRÖM L F, JOKELA W E. Ryegrass cover crop effects on nitrate leaching in spring barley fertilized with $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(5): 1659-1667.
- [70] DE VRIES F T, THÉBAULT E, LIIRI M, BIRKHOFFER K, TSIAFOULI M A, BJØRN LUND L, BRACHT JØRGENSEN H, BRADY M V, CHRISTENSEN S, DE RUITER P C. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2013, 110(35): 14296.
- [71] BAUER A, BLACK A L. Quantification of the effect of soil organic

- matter content on soil productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(1): 185-193.
- [72] WHITE C. Why regenerative agriculture? *American Journal of Economics & Sociology*, 2020, 79: 800-811.
- [73] GOSLING P, HODGE A, GOODLASS G, BENDING G. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2006(113): 17-35.
- [74] UNEP. Emissions Gap Report 2019. <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>.
- [75] Regenerative agriculture and the soil carbon solution. <http://ow.ly/y6fq50BKjUF>.
- [76] POEPLAU C, DON A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2015, 200: 33-41.
- [77] HEPPELRY P, LOTTER D, ULSH C Z, SEIDEL R, REIDER C. Compost, manure and synthetic fertilizer influences crop yields, soil properties, nitrate leaching and crop nutrient content. *Compostence & Utilization*, 2009, 17(2): 117-126.
- [78] DRINKWATER L E, WAGONER P, SARRANTONIO M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature*, 1998, 396(6708): 262-265.
- [79] BUNCH R, BERKELAAR D, MOTIS T, BUNCH J, SWARTZ S. Restoring the Soil: How to Use Green Manure/Cover Crops to Fertilize the Soil and Overcome Droughts; ECHO Incorporated. ISBN 978-1-946263-30-8. 2019.
- [80] STANLEY P L, ROWNTREE J E, BEEDE D K, DELONGE M S, HAMM M W. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems*, 2018, 162: 249-258.
- [81] MACHMULLER M B, KRAMER M G, CYLE T K, HILL N, HANCOCK D, THOMPSON A. Emerging land use practices rapidly increase soil organic matter. *Nature Communications*, 2015, 6: 6995.
- [82] National Agriculture Statistics Service (NASS). 2017. National Agriculture Statistics Service. Washington, D.C., USDA. <http://www.nass.usda.gov>.
- [83] 赵其国, 周生路, 吴绍华, 任奎. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策. *土壤学报*, 2006(4): 662-672.
- ZHAO Q G, ZHOU S L, WU S H, REN K. Cultivated land resources and strategies for its sustainable utilization and protection in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2006(4): 662-672. (in Chinese)
- [84] SMIL V. Who will feed China? *The China Quarterly*, 1995, 143: 801-813.
- [85] 张士功. 中国耕地资源的基本态势及其近年来数量变化研究. *中国农学通报*, 2005, 21(6): 374-378.
- ZHANG S G. The basic situation of cultivated land resources in China and its quantitative change in recent years. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(6): 374-378. (in Chinese)
- [86] 胡钰, 王莉. 中国可持续农业发展模式的区域比较和启示. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(1): 8-14.
- HU Y, WANG L. Regional comparison and inspiration of sustainable agricultural development model in China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 41(1): 8-14. (in Chinese)
- [87] 孟凡杰, 于晓芳, 高聚林, 赵益平. 黑土地保护性耕作发展的制约瓶颈和突破路径. *农业经济问题*, 2020(2): 135-142.
- MENG F J, YU X F, GAO J L, ZHAO Y P. The bottleneck and breakthrough path of the conservation tillage development in black soil of northeast China. *Issues in Agricultural Economy*, 2020(2): 135-142. (in Chinese)
- [88] 大自然保护协会. <http://tnc.org.cn/home/richproject?cid=5>.
- [89] 李秀军, 田春杰, 徐尚起, 罗莎莎. 我国农田生态环境质量现状及发展对策. *土壤与作物*, 2018, 7(3): 267-275.
- LI X J, TIAN C J, XU S Q, LUO S S. Current situation of ecological environment quality and countermeasures in China's farmland. *Soils and Crops*, 2018, 7(3): 267-275. (in Chinese)
- [90] HUANG F, LIU Z, RIDOUTT B G, HUANG J, LI B. China's water for food under growing water scarcity. *Food Security*, 2015, 7(5): 933-949.
- [91] 贾艳青, 张勃. 近 57 年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1085-1097.
- JIA Y Q, ZHANG B. Relationship of dry-wet climate changes in northern China in the past 57 years with pacific decadal oscillation (PDO). *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1085-1097. (in Chinese)
- [92] SKAALSVEEN K, INGRAM J, CLARKE L E. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. *Soil and Tillage Research*, 2019, 189: 98-109.
- [93] ZHU W, CAO M. Effects of saving water and bettering land fertility by the stubble mulching no-till and its future utilization. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1988(4): 12-17.
- [94] 陈亚宁, 陈亚鹏, 朱成刚, 李卫红. 西北干旱荒漠区生态系统可持

- 续管理理念与模式. 生态学报, 2019, 39(20): 7410-7417.
- CHEN Y N, CHEN Y P, ZHU C G, LI W H. The concept and mode of ecosystem sustainable management in arid desert areas in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7410-7417. (in Chinese)
- [95] 南纪琴, 王景雷, 陶国通, 肖俊夫, 刘战东, 宁东峰, 秦安振. 西北旱区农业水土资源匹配格局研究. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 41-45.
- NAN J Q, WANG J L, TAO G T, XIAO J F, LIU Z D, NING D F, QIN A Z. Matching patterns of agricultural soil and water resources in northwest arid area. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(5): 41-45. (in Chinese)
- [96] 王玉宝, 刘显, 史利洁, 上官周平, 吴普特, 山仑, 赵西宁. 西北地区水资源与食物安全可持续发展研究. 中国工程科学, 2019, 21(5): 38-44.
- WANG Y B, LIU X, SHI L J, SHANGGUAN Z P, WU P T, SHAN L, ZHAO X N. Sustainable development of water resources and food security in northwest China. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(5): 38-44. (in Chinese)
- [97] 肖书兴, 白福臣. 长江中下游粮食主产区农业面源污染对粮食经济的生态压力研究. 生态经济, 2019, 35(7): 155-160.
- XIAO S X, BAI F C. Effects of agricultural non-point source pollution on ecological pressure of food economy in the main grain production area of the Lower Yangtze Region. *Ecological Economy*, 2019, 35(7): 155-160. (in Chinese)
- [98] 黄国勤. 中国南方农业生态系统可持续发展面临的问题及对策. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 13-18.
- HUANG G Q. Problems and countermeasures of sustainable development of agricultural ecosystem in Southern China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 13-18. (in Chinese)
- [99] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理. 中国农业科学, 2016, 49(3): 503-517.
- WANG J G, LIN S, LI B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(3): 503-517. (in Chinese)
- [100] 朱先波, 潘亮, 王华玲, 肖丽丽, 钟云鹏, 齐秀娟, 吴伟. 十堰猕猴桃果园生草生态效应的分析. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 381-388.
- ZHU X B, PAN L, WANG H L, XIAO L L, ZHONG Y P, QI X J, WU W. Analysis of the ecological effects of grass-growing in kiwifruit orchards in Shiyan, China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 381-388. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)