

农业生态系统减排增汇研究进展

王家辰^{1,2,3}, 刘子嫣^{3,4}, 尹哲玉^{3,5}, 白志辉^{3,5}, 庄绪亮^{3,5}

- (1. 滨州魏桥国科高等技术研究院, 滨州 256606; 2. 郑州大学河南先进技术研究院, 郑州 450001;
3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 中国科学院大学中丹学院, 北京 100049;
5. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101314)

摘要:在全球范围内,人类面临着日益严峻的气候变化挑战,绝大多数国家都在为解决这一问题而做出持续努力。农业生态系统既是重要的温室气体排放源,同时又具有巨大的碳汇潜力,所以农业生态系统减排增汇研究是应对气候变化挑战的重要举措。然而国内目前在碳汇方面的研究主要集中在森林、草原和海洋领域,有关农业生态系统碳汇的研究相对较少。对于减少温室气体排放的研究也主要集中在工业、能源、建筑等领域,农业领域缺乏重视。因此,农业生态系统减排增汇研究亟待开展。本文系统梳理了在农业生态系统中减少温室气体排放以及增加碳汇的研究进展,重点探讨了农业废弃物处理、肥料管理和土壤改良等一系列农业管理措施在农业生态系统减排增汇中的作用,对农业生态系统减排增汇措施及未来研究方向提出了相关建议和展望,以期为生态农业实践提供有益参考,实现农业的绿色可持续发展。

关键词:农业生态系统;温室气体减排;碳汇;生态系统增汇;农业管理措施

DOI:10.48014/pceep.20230914001

引用格式:王家辰,刘子嫣,尹哲玉,等. 农业生态系统减排增汇研究进展[J]. 中国生态环境保护进展,2023,1(3):22-35.

0 引言

目前全球气候变化日益加剧,温室气体排放对环境和人类社会造成的影响也日益显著。减少温室气体排放、提高生态系统碳汇功能是缓解全球气候变暖、提升适应气候变化能力的必由之路。世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)于2022年10月26日发布的2021年全球温室气体公报显示,温室气体浓度达到了有史以来的最高水平,其中二氧化碳(CO₂)浓度的上升幅度(约2.5ppm)超过了过去十年的平均值(2.46ppm)。除能源消耗排放外,农业生态系统是全球最大的温室

气体排放源,同时农业生态系统又是重要的碳库,具有巨大的碳汇潜力^[1]。碳达峰、碳中和目标的提出是党为减缓全球气温上升,应对气候变化而采取的关键举措。为实现“双碳”目标,农业生态系统减排增汇既是重要举措,也是潜力所在^[2]。

1 农业温室气体排放与碳汇概述

1.1 农业温室气体排放现状

为了满足不断增长的人口需求,大量的农田开垦以及化肥的过度施用导致了农业生态系统温室气体排放正在全球范围内升高^[3]。就不同共享社会

* 通讯作者 Corresponding author:王家辰, a1293268643@163.com

收稿日期:2023-09-14; 录用日期:2023-09-20; 发表日期:2023-09-28

基金项目:魏桥国科低碳技术专项(GYY-DTFZ-2022-004);中国科学院战略性先导科技专项(XDA2301040103);国家自然科学基金项目(42177111)

经济路径平均水平而言,预计2030年农业温室气体排放量将比2020年增加2%~5%^[4]。范紫月等^[5]对1980年至2020年中国农业生态系统产生的温室气体排放总量进行了核算。从农业生态系统温室气体排放结构来看,甲烷(CH₄)是占比最高的温室气体,但是其增势缓慢,总体占比呈下降趋势。而CO₂的占比逐渐升高并接近CH₄,氧化亚氮(N₂O)占比则不断波动。

农业生态系统中CO₂的排放主要来自于农作物(主要包括水稻、小麦、玉米)秸秆焚烧,其中小麦秸秆的排放因子最高,而玉米秸秆的CO₂排放量最高^[6],此外秸秆焚烧还会产生一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)等空气污染物。过去农民常常将农作物秸秆进行焚烧处理,在燃烧秸秆的过程中,会产生大量的CO₂及CO等温室气体^[7];另外化肥、农药等农产品投入也会间接产生大量的温室气体。Xu等^[8]通过研究2003年至2018年中国31个省区的数据发现,农业产品产生的温室气体排放量越来越大。

目前全球约40%的CH₄和60%的N₂O排放均来自于农业活动^[9]。从1980年到2018年,中国农业领域的非CO₂温室气体排放量增加了34%,如果不采取针对性的减排措施,预计到2060年中国农业非CO₂温室气体排放将继续增长33%^[10]。CH₄是农业生态系统中排放量最大的温室气体,主要来自于畜禽肠道发酵和水稻种植,其次是粪便管理,另外秸秆焚烧也会产生微量的CH₄^[11]。Fu等^[12]采用CH₄MOD模型和排放因子法计算中国农业源CH₄排放量,预计在2021年到2023年畜禽肠道发酵仍是中国最大的CH₄排放源,并且年CH₄排放量将会逐年增加。N₂O是农业生态系统的第三大温室气体,农业源N₂O约占全球人为排放总量的60%,其中农田排放约占30%^[13]。农业N₂O排放主要来自于农田土壤,其生成N₂O的过程十分复杂,而氮肥的施用对土壤排放N₂O的影响最大^[14]。土壤中微生物对N₂O的生成也具有重要作用,约有40%的N₂O是通过微生物介导的氮循环排放的^[15]。

1.2 农业生态系统碳汇现状

农业生态系统蕴含着巨大的碳汇潜力,是全球

碳库的重要组成部分,农业生态系统碳汇主要来自于农田土壤和植物光合作用^[16]。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,而农田土壤占全球陆地面积的37%,因此农田土壤拥有巨大的碳汇潜力^[17,18]。农作物是农业的生产对象,其自身也是农业生态系统中的另一个碳库,农作物产量的提高可以增强其固定大气中碳的能力^[19]。中国农业生态系统主要的农作物是水稻、小麦和玉米3种,年净碳汇总量约为1.66亿吨碳,其中水稻最高,占48.7%^[20]。

2 农业生态系统减排增汇途径

2.1 农业废弃秸秆管理

农业废弃秸秆作为生物质能的一部分,其新型能源化开发利用水平的提高对农业生产国存在深刻影响。农作物光合作用的产物一半在籽实,一半在秸秆,伴随着农业生产效率的提高,秸秆数量也在不断增加^[21]。焚烧通常被认为是将秸秆转化为植物养分最简单的方法^[22]。伴随着农业生产方式的转变,秸秆露天焚烧的现象频发,不仅造成巨大的资源浪费,而且带来了严重的污染^[23]。据统计,2005年到2014年期间中国县域级农作物秸秆露天焚烧产生的CO₂、CH₄和N₂O的平均排放量分别为6925.08万吨、24.29万吨和0.42万吨,分别占CO₂、CH₄和N₂O总排放量的1.16%、0.55%和0.33%^[24]。

为了提高秸秆的利用效率并减少焚烧带来的温室气体排放,可以将秸秆进行肥料化、饲料化、基料化、燃料化和原料化处理^[25]。其中肥料化是最主要的处理方式,包括机械化粉碎还田、生物腐熟还田、养畜消化还田等方式^[26]。农作物秸秆还田肥料化处理可以持续增加土壤有机碳含量^[27],Kozjek等^[28]通过机械粉碎后的秸秆来改良土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量低的耕地土壤,发现可以获得更高的微生物多样性,并且通过管理可以提升土壤碳储量。粉碎后的玉米秸秆投入农田土壤能够通过增加土壤真菌残体来增强微生物对有机碳的固定作用,而作物碎屑中的木质素增加了土壤有机碳库的容量,有利于长期的有机碳保存和积累^[29]。另外将有机肥的施用与秸秆还田相结合,

可以在不影响土壤固碳和固氮潜力的前提下,提高土壤有机碳和氮的稳定性^[30]。秸秆堆肥技术可以将秸秆转化为有机肥料,不仅减少了焚烧秸秆产生的 CO₂,而且还提供了一种环境友好型的肥料,是实现农业绿色发展的重要方式。微生物是堆肥过程中的关键参与者,通过分解有机物质和转化养分,促进秸秆转化为有机肥料。Wang 等^[31]研究发现在堆肥过程中接种芽孢杆菌可以提高堆肥成熟度,促进木质纤维素降解,提高堆肥肥力。然而给稻田施加秸秆堆肥肥料却会增加稻田的 CH₄ 排放,从而降低了稻田的净固碳效率。Liu 等^[32]发现水稻-食用菌模式可以改善这一现象,接种食用菌可促进秸秆碳向有机碳的转化,减少其向 CH₄ 的转化。随着食用菌接种量的增加,堆肥秸秆在土壤中的碳固存效率提高。秸秆还可以用来制生物炭,生物炭作为一种土壤改良剂,对于农业土壤减排增汇具有重要意义,有研究发现秸秆直接还田也会增加 N₂O 的排放,而秸秆衍生的生物炭可以维持周围氧气,并通过碱碳酸盐的扩散提高土壤的 pH 值,在这种情况下会抑制 N₂O 的排放^[33]。由于生物炭稳定且富含碳的特性,将废弃秸秆高温热解可以得到生物炭等产品,促进碳的封存,同时还能减少土壤中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的排放^[34]。据统计生物炭自身的碳封存可以使土壤总碳和有机碳分别增加 64.3% 和 84.3%^[35]。生物炭还可以通过增强地上植被光合作用,提高其对大气中 CO₂ 的捕获能力,进而增加农业生态系统碳汇^[36]。

农业秸秆饲料化是指将农作物收割后的秸秆作为动物饲料的利用方式,主要是以甜高粱、玉米、水稻、谷子等秸秆粉碎加工而成的纤维饲料,是反刍动物的主要饲料。秸秆饲料化技术不仅可以避免秸秆焚烧,还可以丰富牲畜草料,通过牲畜肠道最终以粪便形式还田,能够增加土壤有机碳含量^[37]。秸秆的纤维素、半纤维素与木质素相互缠绕构成粗纤维,是植物细胞壁的主要成分,这些天然有机高分子化合物结构很牢固,不易消化,是秸秆饲料化的难点^[38]。有研究发现,通过对瘤胃微生物中产琥珀酸丝状杆菌数量的调控,可以提升反刍动物对秸秆的利用效率^[39]。

农作物秸秆原料化有广泛的应用前景,将秸秆中的纤维素作为主要基材,代替塑料和木材,可用

于制备多种化学产品^[40]。目前我国木浆、木材等原材料大量依赖国外进口,而农作物秸秆含有大量的天然纤维素,是造纸和板材加工的好原料,秸秆原料化处理可以缓解资源短缺的压力,保护森林资源,减少碳汇损失^[41]。

秸秆资源化利用的减碳作用不仅体现在土壤碳汇,还体现在化石能源的替代上,秸秆燃料化替代化石能源可大量减少因化石能源燃烧而排放的温室气体,实现循环利用的同时保护环境。2020 年秸秆燃料化利用的温室气体净减排贡献为 3800 万吨 CO₂e,未来预计这一数值将会持续增长^[42]。秸秆燃料化利用技术主要包括生物质气化、热解制燃气、制生物质炭等^[43]。秸秆热解、碳化后本身降低的碳排放再加上副产物的生物油和气的利用,就可以实现负碳排放。另外以玉米为主要原料的燃料乙醇由于其较好的经济性而受到广泛的关注。与燃煤发电相比,秸秆发电在减排和缓解环境污染方面具有很大的潜力^[44]。而且秸秆燃烧后会产生 5% 左右的灰分,可作为优质的钾肥直接还田^[45]。然而其经济可持续性还没有达到先进水平,相关技术还有待发展。

秸秆基料是指以秸秆(农作物收割后的残余植物部分,如稻草、麦秸、玉米秸等)为原材料制备的固体物料,用于为植物、动物和微生物提供生长环境和营养物质,通常指利用秸秆来生产食用菌基料^[46]。

2.2 化肥减量与有机肥配施

化肥在农业生产中起着关键作用,主要用于提高农作物产量。然而,化肥的使用也带来了一些负面影响,例如土壤质量恶化、农田温室气体排放增加等。如果不考虑田间直接排放的 N₂O,农作物生产过程中温室气体排放总量的 47.7% 都是由于化肥施用而引起的^[47]。化肥的主要成分是氮、磷和钾,氮肥的施用量会显著影响作物的生长以及温室气体的排放,如果氮肥过量施用会导致土壤中的氮浓度超标,剩余氮会转化为硝酸盐,并通过硝化和反硝化过程释放出 N₂O 等温室气体。N₂O 是一种强效的温室气体,其温室效应是 CO₂ 的 310 倍^[48]。另一方面,氮肥不足会限制农作物的生长,导致农作物产量减少且无法充分吸收 CO₂,从而减少了农

作物对温室气体的吸收和固定,减少了农业生态系统碳汇。Sheng 等^[49]发现在水稻根际土壤中,施磷肥提高了产甲烷菌的丰度,而甲烷氧化菌并没有受到明显影响,导致 CH_4 排放的速率大于甲烷氧化吸收的速率,从而增加了 CH_4 排放。如果算入环境和健康成本的话,化肥施用所带来的农业效益会大打折扣。相对于单独施用化肥,有机肥与化肥配施可以提升土壤肥力,优化农业生产以增产减排^[50]。有机肥施用可以保持土壤 pH 稳定以减缓土壤的酸化进程,并且改善土壤结构,增强土壤的保水性和固氮能力^[51]。有研究表明,在全球范围内有机肥施用后可以使土壤有机碳含量增加 33.3%,当土壤的有机质含量达到每公斤 30g 的时候,就可以用有机肥完全替代化肥并且保持高产^[52,53]。从已有的经验来看,有机肥部分替代化肥可以在化肥用量减少的情况下产量不减甚至上升^[50-53]。Graham 等^[54]综合多位研究者的田间试验结果,发现尽管有机肥配施总投入氮略高于单一有机肥或无机肥处理,但是其减少了 N_2O 排放。当氮肥施用量过大,超过了作物生长发育所需要量时, N_2O 排放就会呈指数型增长,而有机肥的施用直接减少了氮肥的使用量^[55]。另外,Ma 等^[56]通过为期 11 年的温室菜地实验发现与单独施用化肥相比,有机肥配施明显减少了菜地 N_2O 排放。

2.3 生物有机肥的施用

生物有机肥是一种以生物质材料和特定功能微生物为基础制成的微生物肥料,可提供植物生长所需的养分,并改善土壤结构和微生物活性^[57]。生物有机肥与化肥配施能够协调作物对无机和有机养分的需求,有利于作物增产^[58]。Li 等^[59]通过研究土壤质量和微团聚体组成,发现施用生物有机肥可以显著增加土壤微生物的密度,提高土壤养分相关的土壤酶活性,这有助于增强土壤有机碳的储存。

不同的功能微生物制作的生物有机肥的效果也有所不同,主要有产生植物生长激素、固氮、溶磷、解钾、缓解生物和非生物胁迫以及调节根际微生物群落结构等作用^[60]。微生物固氮过程对于氮循环至关重要,根瘤菌作为最常见的固氮微生物,其与豆科植物的共生固氮系统为宿主以及其他植物提供了生长发育所需的氮源^[61]。Zhang 等^[62]选

育了一株固氮芽孢杆菌进行接种试验,结果表明接种固氮菌可以达到与化学氮肥相当的效果,并且还增加了作物根际细菌多样性。农田氮素流失的途径有 3 种,分别为气态流失、地表径流流失、地下淋溶流失,其中对农田温室气体排放影响最大的就是气态氮的流失^[63]。松散的含氮分子极易挥发,导致土壤向大气中排放 N_2O 等温室气体。地表径流和地下淋溶会带走土壤中的一部分氮,却带不走生物体中的氮,而添加的化肥是没有生物载体的氮,极易随径流而大量流失,这些被带走的氮最终会进入河流湖泊,导致富营养化、破坏水生生态系统。在土壤中,过量施用化肥导致的高浓度氮会改变土壤的 pH,使土壤环境不适合微生物生长,破坏了植物根系上的有益细菌^[64],这就导致在土壤中缺少氮元素时没有足够的微生物帮助植物获取营养元素,继而导致了更多化肥的使用,久而久之会慢慢“杀死”土壤。土壤微生物的作用不只是为植物提供氮,土壤真菌还可以为植物提供其他重要矿物质,土壤微生物的减少也会导致其他矿物肥料的增施,因此科研人员提倡使用生物有机肥^[65]。另外土壤净氮矿化率是植物能否有效利用土壤氮的关键,其变化主要归因于土壤中的微生物生物量,而年平均降水量、土壤 pH 值和土壤总氮等其他因素则是通过影响土壤微生物进而影响土壤净氮矿化率^[66]。Sun 等^[67]研究了含枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)的微生物肥料对农业土壤氮素流失的影响,结果表明,与单独施用化肥相比,用生物肥料替代 50% 的化肥可以在产量增加 5.0% 的情况下,减少农田土壤 54% 的氮素流失。还有文章报道了施用生物有机肥减少 N_2O 温室气体排放的文章,Wu 等^[68]研究发现解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*, BA)处理酸性土壤促进了植物生长,提高了土壤 pH 值,并且大大增加了 nosZ 基因的复制数,导致 N_2O 还原为 N_2 的代谢过程增强,与对照组相比,添加 BA 导致 N_2O 净排放量减少 50%。Geng 等^[69]研究了化肥、有机肥、生物有机肥 3 种处理方式对温室菜田 NO_x 排放和蔬菜产量的影响,结果生物有机肥在两个方面都表现出很好的效果。虽然其减少 NO_x 排放的具体机理尚不清楚,但是这为我们提供了一个可以实现双赢的思路,即通过筛选促进植物生长且可以减少温室气体排放的有益微生物制作生物

有机肥来替代化肥,实现减少温室气体排放的同时提高作物产量。

磷是植物生长发育所需的第二营养素,尽管磷在土壤中的含量丰富,但是由于其与土壤中的金属离子络合,大部分的磷不可供植物直接吸收,为保证农作物正常生长就需增加磷肥用量^[70]。使用溶磷细菌作为接种剂可以促进土壤微生物合成有机酸来溶解矿物磷酸盐,增加农作物对土壤中磷的吸收,这有利于农作物生长并且减少了化肥的使用^[71]。

Li等^[72]通过利用¹⁵N同位素示踪试验,研究发现在固定初始氮浓度(80 mg/kg)的15天培养期内,施钾肥显著提高了N₂O的平均排放率(1.6~10.8倍),其中反硝化作用对N₂O排放量的贡献更大。而土壤中大部分的钾元素都和矿物结合在一起而无法被植物吸收,仅有极少量可被植物直接利用,大多数农民为了获得最大生产力会增加钾肥的施用,就会导致土壤N₂O的排放增加^[73]。Meena等^[74]研究发现植物根际的溶钾微生物(Potassium solubilizing microorganisms, KSMs)可以解决这一问题,KSMs可以将不溶性钾(K)溶解为可溶性钾,用于植物生长和提高产量,另外KSMs除了具有溶解钾的能力,还具有产生植物生长激素、氨、铁载体和溶解磷等的功能。这表明施用含溶钾微生物的生物有机肥可以通过减少钾肥的施用量来间接减少N₂O的排放量。

农药的长期使用会破坏土壤中的微生物过程,干扰微生物种间关系,导致微生物活动的气态产物积累,N₂O和CO₂气体排放量增加^[75]。而生物有机肥具有很好的生物防治效果,可以增加土壤对某些病原体的抑制作用,Li等^[76]研究证实,生物有机肥的长期应用抑制了根际微生物群中某些病原体的活性,从而减少了农药的使用。

2.4 农田土壤改良

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,是全球碳循环的重要组成部分,而农田土壤是其中人为干预最多,最不稳定的。自从人类开始农业活动以来,农田土壤一直是温室气体主要的源,而其土壤碳储量则逐渐减少,在发生酸化、盐碱化等土壤退化情况下,土壤碳库减少的程度更大。采用合理的

土地利用方式和科学的管理措施可以遏止土壤的进一步退化,并使其成为大气中CO₂的汇^[77]。

2.4.1 酸性土壤改良

我国南方农田土壤酸化问题非常严重,不仅导致粮食产量和质量的下降,还会使CH₄和N₂O等温室气体的排放增加。欧阳学军等^[78]研究发现土壤酸化积累会促进CH₄和N₂O的排放。对于酸化土壤的改良,目前施用石灰是最传统有效的方法,但是石灰的大量使用会引发土壤板结等问题,造成土壤肥力下降,且石灰只能在上层土壤中发挥作用;对于酸化土壤下层国外主要是采用磷石膏来进行改良,而国内工业产生过程中产生的磷石膏通常富含酸性成分,这有可能进一步降低土壤中的pH值^[79]。对于酸化土壤的治理仍需要进一步的研究,在控制土壤酸化的同时优化改良技术,为我国农业可持续发展做出贡献。

2.4.2 盐碱地改良

大面积的盐碱地不仅导致了耕地面积减少和土壤退化,还会导致土壤碳储量减少,严重制约了土壤固碳增汇的生态功能。盐碱土壤中有有机碳含量与微生物活性低,植物的生长发育受到抑制,对大气中的碳固定较少,因此盐碱地与其他陆地生态系统相比碳汇潜力更高。目前我国约有1亿亩盐碱地具有农业改良潜力,其中有3500万亩在改良后可实现大幅增产^[80]。常见的盐碱地土壤改良技术主要包括水利工程措施、物理措施、化学措施以及生物措施等^[81]。

水利工程措施主要包括明渠排水、暗管排盐、覆膜滴灌等方式。明渠排水是指通过雨水淋洗使土壤中的盐分溶于水,再通过排水沟的作用使水分排出农田从而降低土壤中的盐分^[82];暗管排盐可以使土壤盐分随暗管流水排走达到有效脱盐,并通过控制地下水位防止土壤二次盐碱化^[83];覆膜滴灌技术的原理是膜下蒸汽凝结成淡水在地表形成淡化薄层,通过适量滴流将表土层的盐分淋洗出来^[84]。水利工程措施主要是靠降雨或者灌溉来对土壤盐分进行淋洗,同时淋洗也会对土壤有机碳产生影响,淋洗会降低土壤表层的有机碳含量,在0~40cm淋失量较大并且灌水量越大碳淋失越严重,然后土壤有机碳向土壤深层迁移,上层土壤淋失的有机碳

被下层截获实现有机碳积累量增加,并且这个截获上层有机碳的土壤层会随着灌溉量的增加而下移^[82,85]。

物理改良技术主要有深耕晒垡、秸秆覆盖、客土改良等。深耕晒垡可以提高土壤的孔隙度,有利于盐分的淋洗下行;秸秆覆盖可以阻碍地表水分的蒸发,抑制盐分上行,达到保墒抑盐的功效。虽然秸秆覆盖会增加土壤中的有机碳含量,但废弃物秸秆不会将空气中的碳固定到土壤中^[86],不经过肥料化处理直接还田会产生更多的CO₂排放,总体碳汇能力为碳亏损^[87];客土改良是指用优质土壤铺到盐碱地中,可以有效降低表层盐分含量、改善土壤性质并且促进植物生长,可以提高土壤碳汇能力,但是其成本较高且返盐性大,极易被渍化为盐碱土,不利于可持续发展^[88,89]。

化学改良是通过使用化学药剂,以酸碱中和、离子平衡为核心来改良土壤,包括添加钙质改良剂、有机改良剂等。钙质改良剂主要是指脱硫石膏,其为烟气脱硫过程中的副产物,价格低廉且成分与天然石膏相似^[90]。脱硫石膏改良盐碱地的主要原理是通过Ca²⁺置换出Na⁺并冲刷排出。在碱性条件下Ca²⁺可以通过离子桥的作用和有机碳结合,形成有机无机复合物,提高有机碳的稳定性^[91];另外Ca²⁺富集会促使土壤中团粒结构的产生,以减少有机碳矿化损失^[90]。有机改良剂主要包括生物炭、有机肥和有机酸等,施用有机改良剂可以增加土壤养分、降低盐分对植物的不利影响。有研究发现土壤电导率与含盐量成正比^[92],而生物有机肥与生物炭配施可以降低土壤电导率,且显著提高土壤中有机碳含量^[93]。Zhang等^[94]发现在盐碱条件下,施用生物炭基有机肥可以缓解盐碱胁迫对根系生长的不利影响,促进光合色素的合成和气孔开放,从而促进光合作用。Yang等^[95]通过盐碱地改良对土壤有机碳影响的meta分析发现,相对于其他改良剂来说,生物炭等有机改良剂的施入显著提高了土壤有机碳含量,改良后全氮、速效磷、速效钾等含量也显著增加。

生物改良措施被认为是盐碱地改良措施中最绿色、安全的改良措施,主要包括植物改良和微生物改良两方面。目前,生物改良措施的核心是依靠盐生植物的生长来吸收土壤中的盐分,再通过收割

盐生植物将盐分从土壤中带出^[96]。盐生植物可以将大气中的碳固定到植被中,并且在生长过程中产生的枯枝落叶、残留根系等也有利于增加表层土壤的有机碳含量,从而提升盐碱地土壤碳汇^[97]。另一方面土壤微生物也在土壤物质运输中发挥了作用,在一定程度上缓解了土壤中的高盐胁迫,有利于植物的生长^[98]。微生物措施例如施用生物菌剂或菌肥等可以增加土壤生物源碳,并且显著降低土壤pH和交换性Na⁺含量,提高土壤有机质含量^[99]。某些植物促生菌可以分解土壤中难溶性矿物质,并将其转化为可利用的矿质元素形态,从而增加植物源碳^[98]。Wu等^[100]在青藏高原地区筛选出一种解淀粉芽孢杆菌,这种菌株在高盐条件下能够正常生长,同时具备固氮和产生植物生长素的能力,将其作为特定菌株应用于微生物肥料的制作中,有望提升高原草地的植被覆盖率。

盐碱地改良对土壤碳汇提升有着重要作用,在改良过程中涉及添加有机肥料、生物炭等改良剂,这些改良剂可以改善土壤结构、增加SOM及调节土壤pH,促进植物生长发育。而植物能够通过光合作用将大量的CO₂固定在其体内,伴随着植物的生长一部分固定的碳会进入土壤,从而增加土壤碳汇量。有研究发现土壤中CH₄的吸收与土壤含盐量有关,即使少量的盐也会对CH₄的吸收产生强烈的抑制作用^[101]。盐分的减少同时也减少了土壤中的盐分对微生物代谢活动的抑制作用,进而有利于土壤微生物的生长,这可能对土壤中的微生物介导的碳循环过程产生影响,进而影响土壤碳汇^[102]。盐碱地的土壤碳储量较少,碳汇潜力大,其土壤碳汇的提升对于我国实现双碳目标具有重要意义。

2.5 其他农业管理措施

耕作管理可以在一定程度上帮助减少农业生态系统温室气体排放,尤其是CH₄和N₂O等温室气体,这些温室气体通常与农业活动密切相关。有研究发现农田采用免耕管理可以在不影响作物产量的情况下降低CO₂、N₂O、CH₄的排放量和全球变暖潜能值^[103]。Li等^[104]在半湿润温带气候区的玉米种植实验中比较了两种耕作方式对温室气体的影响,结果表明免耕管理在作物产量保持不变的

情况下降低了 8.07% 的全球变暖潜能值。另外 Bansal 等^[105]进行了一项长期的田间试验并计算了碳足迹,在免耕管理下用畜禽粪便来代替秸秆覆盖可以减少碳排放且提高生态系统稳定性。然而免耕管理对于温室气体影响的评估常常伴随着极大的不确定性,与土壤类型、气候条件以及管理持续时间等诸多因素密切相关,此外土壤中的碳分布也会受耕作方式影响,重新分配后土壤的总碳量是否真正增加尚不清楚^[106,107]。因此,单纯通过观察现象很难应对这一复杂情境,我们有必要深入了解其机制,以制定有效的管理措施,在保证农作物产量的同时增加土壤碳汇并减少温室气体排放。

采用不同的作物种植方式会对农田温室气体排放和土壤碳储存产生不同的影响。其中,轮作是指在不同时间段种植不同的农作物,而间作是在同一块农田上同时种植两种或更多不同种类的作物。这些种植方式不仅能够降低病虫害的风险,还可以减少单一作物对土壤养分的过度消耗,从而有效维护土壤的健康状况。水稻种植过程中会产生大量的 CH_4 ,细菌在水淹稻田的缺氧环境中分解有机物产生 CH_4 ,然后通过水面释放到大气中。相比一年内种植两季水稻的种植方式,单季稻种植方式在碳排放方面有明显的降低,但是单季稻的水稻产量和土壤有机碳含量则较少^[108]。Nittaya 等^[109]研究发现,引入玉米或甜高粱与水稻进行轮作可以在不减少土壤有机碳储量和作物产量的前提下,降低 78%~84% 的 CH_4 排放量。另外在作物序列中加入豆科作物可以通过根瘤固氮来减少氮肥用量,这有助于减少农田温室气体排放,降低农作物总体碳足迹^[110]。同时豆科植物-农作物间作模式也可以提高作物产量并降低其温室气体排放强度^[111]。

不同的灌溉量、灌溉方式以及灌溉时间会对农田土壤产生不同的影响,这些影响主要表现在调节土壤湿度、影响氧气供应、调控微生物活动等方面,与土壤温室气体排放以及土壤碳积累量密切相关。土壤含水量被认为是调控农田温室气体排放的主要驱动因素,因为它直接影响微生物的活动及其相关过程^[112]。土壤中较低的含水量可以抑制产甲烷菌的活性,从而减少 CH_4 的排放,但较高的氧化还原电位则有利于 N_2O 的生成。另一方面,较高的含水量可以抑制土壤呼吸,降低 CO_2 排放,同时过量

的水延缓了 N_2O 的扩散,导致 N_2O 还原为 N_2 。然而较高的含水量导致土壤形成厌氧区,进而促进产甲烷菌的生长和反硝化作用,从而增加了土壤中 CH_4 和 N_2O 的生成量^[113]。土壤中的含水量变化在影响温室气体排放时表现出复杂的效应,需要综合考虑不同气体的变化和土壤微生物的作用才能了解其原理。值得注意的是,Zou 等^[114]研究发现节水灌溉可以在节约 618.1 亿~1296.6 亿 m^3 水的同时,减少 2183 万~4748 万吨的 CO_2 排放量。此外还可以降低土壤中的盐分,抑制土壤盐渍化,保持土壤生产力。灌溉对土壤有机碳含量的影响主要与气候和土壤初始有机碳含量有关。在干旱、半干旱地区进行灌溉可使土壤有机碳含量显著增加,而湿润地区灌水则效果不一致^[115]。Han 等^[116]通过灌溉实验表明,沟灌有利于 SOC 积累,而滴灌有利于提高生物量碳。总而言之,通过合适的灌溉管理措施,有望在保持农作物产量的前提下,实现温室气体减排,并进一步提升土壤碳汇效应。

3 总结

综上所述,农业生态系统的减排增汇研究能够在全球气候变暖的背景下,为农业的可持续发展和环境保护提供有益的参考。通过深入分析农业温室气体排放与碳汇现状,以及探讨多种减排增汇途径,可见在农业生态系统减排增汇方面存在着丰富的机遇与挑战。农业生态系统作为温室气体排放主要的源,有望通过采取合理的管理措施,使其转变为大气中碳的汇,助力实现“碳中和”。

4 建议与展望

尽管农业生态系统的减排增汇研究已经取得了一些进展,但仍存在诸多问题。首先是温室气体排放量和农业碳汇的核算问题,促进农业生态系统减排增汇需要有评估碳变化的工具。目前我国温室气体排放量及碳汇相关的核算标准或规程仍不完善,忽略了小尺度上不同地域自然条件、土地利用变化、方法和模型等带来的差异性。其次,大多数研究只总结了其排放量和碳汇变化的结果和趋势,但缺乏对其原理的探究,很难为后续研究提供理论基础。同时对于不同措施之间联合应用的研

究较少,存在技术经济成本太高、未结合农民实际需求等问题,实施难度较大。

结合当前研究的局限性,针对存在的问题提出以下发展展望:加强气候监测和数据收集,为农业生态系统减排增汇技术提供更精确的计算和评估;对不同减排增汇途径的综合效果进行评估,探究不同策略的联合应用对于温室气体减排增汇的综合影响;注重在技术原理方面的研究,开发适用于不同地域和农业类型的实用性方法和技术,以便更广泛地推广和应用;将经济因素纳入考量范围,研究如何在经济可行性的前提下推动农业减排增汇实践;要了解农民和农业从业者的想法、需求和参与意愿,帮助制定更切实可行的政策和方案;加快碳交易市场的健全,持续扩大覆盖范围,促进低碳技术的研发和创新,推动实现“碳中和”目标。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 程秀娟. 农业温室气体排放与减排固碳措施分析[J]. 中南农业科技, 2022, 43(05): 84-90.
- [2] 杨红柳, 王美妮. 生态文明史观视域下中国“双碳”战略的治理现代化意义[J]. 辽宁师范大学学报(社会科学版), 2023, 46(02): 39-43.
<http://doi.org/10.16216/j.cnki.lsxwbk.202302039>
- [3] GOPI C, BIKRAM B, DIPESH J, et al. Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 11.
<http://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>
- [4] HU Y, SU M, JIAO L. Peak and fall of China's agricultural GHG emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 136035.
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136035>
- [5] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 等. 中国农业系统近 40 年温室气体排放核算[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9470-9482.
<http://doi.org/10.5846/stxb202201290273>
- [6] ZHANG H, YE X, CHENG T, et al. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(36): 8432-8441.
<http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.015>
- [7] 张晓萱, 秦耀辰, 吴乐英, 等. 农业温室气体排放研究进展[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2019, 49(06): 649-662+713.
<http://doi.org/10.15991/j.cnki.411100.2019.06.003>
- [8] SUN B, XU X. Spatial-temporal evolution of the relationship between agricultural material inputs and agricultural greenhouse gas emissions: experience from China 2003-2018[J]. Environmental science and pollution research, 2022, 29: 46600-46611.
<http://doi.org/10.1007/s11356-022-19195-x>
- [9] 张帆, 宣鑫, 金贵, 等. 农业源非二氧化碳温室气体排放及情景模拟[J]. 地理学报, 2023, 78(01): 35-53.
<http://doi.org/10.11821/dlxb202301003>
- [10] CHEN M, CUI Y, JIANG S, et al. Toward carbon neutrality before 2060: Trajectory and technical mitigation potential of non-CO₂ greenhouse gas emissions from Chinese agriculture[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 368: 133186.
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133186>
- [11] WANG G, LIU P, HU J, ZHANG F. Spatiotemporal Patterns and Influencing Factors of Agriculture Methane Emissions in China [J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1573.
<http://doi.org/10.3390/agriculture12101573>
- [12] LI Z, FU W, LUO M, et al. Calculation and scenario prediction of methane emissions from agricultural activities in China under the background of “carbon peak” [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1087(1): 11.
<http://doi.org/10.1088/1755-1315/1087/1/012021>
- [13] 严圣吉, 尚子吟, 邓艾兴, 等. 我国农田氧化亚氮排放的时空特征及减排途径[J]. 作物杂志, 2022, (03): 1-8.
<http://doi.org/10.16035/j.issn.1001-7283.2022.03.001>
- [14] 邢力. 华北农田玉米根区 N₂O 排放特征及其驱动机制[D]. 石家庄: 河北农业大学, 2022.
<http://doi.org/10.27109/d.cnki.ghbnu.2022.000022>
- [15] 孙立博. 中国北方农田土壤微生物驱动 N₂O 生成机制[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2022.
<http://doi.org/10.27714/d.cnki.giljs.2022.000208>
- [16] 黄晓雯. 乡村振兴视角下农业碳汇发展分析[J]. 农业开发与装备, 2022(11): 10-12.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9205.2022.11.004>
- [17] 苑明睿, 杨峰山, 蔡柏岩, 等. 农业土壤碳汇研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(08): 37-42.
- [18] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. Philosophical Transactions

- of The Royal Society B, 2007, 363(1492):789-813.
<http://doi.org/10.1098/rstb.2007.2184>
- [19] 余玮, 黄璜, 官春云, 等. 我国典型农作区作物生产碳汇功能研究[J]. 中国工程科学, 2016, 18(01): 106-113.
<http://doi.org/10.15302/J-CESS-2016013>
- [20] SHE W, WU Y, HUANG H, et al. Integrative analysis of carbon structure and carbon sink function for major crop production in China's typical agriculture regions [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162:7.
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.108>
- [21] 石祖梁, 贾涛, 王亚静等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(09):32-37.
<http://doi.org/10.7621/cjarrp.1005-9121.20170905>
- [22] TOAN N, HANH D, PHUONG N, et al. Effects of burning rice straw residue on-field on soil organic carbon pools; Environment-friendly approach from a conventional rice paddy in central Viet Nam [J]. Chemosphere, 2022, 294:1.
<http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133596>
- [23] 方放, 李想, 石祖梁等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(02): 228-234.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2015.02.032>
- [24] LIU Y, ZHANG J, ZHUANG M. Bottom-up re-estimations of greenhouse gas and atmospheric pollutants derived from straw burning of three cereal crops production in China based on a national questionnaire [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(46):65410-65415.
<http://doi.org/10.1007/s11356-021-15658-9>
- [25] 周子清, 牛秀莲, 张艳国. 推进农作物秸秆综合利用的思路及对策[J]. 新农业, 2023, (04):9.
- [26] 庞力豪, 王丽霞, 姜凯阳, 等. 山东省主要农作物秸秆肥料化及沼气化利用分析[J]. 东北农业科学, 2021, 46(03):48-53.
<http://doi.org/10.16423/j.cnki.1003-8701.2021.03.011>
- [27] HAO X, HAN X, WANG S, et al. Dynamics and composition of soil organic carbon in response to 15 years of straw return in a Mollisol [J]. Soil & Tillage Research, 2022, 215:105221.
<http://doi.org/10.1016/j.still.2021.105221>
- [28] KOZJEK K, MANOHARAN L, URICH T, et al. Microbial gene activity in straw residue amendments reveals carbon sequestration mechanisms in agricultural soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 179:108994.
<http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108994>
- [29] Li Y, Zhang W, Li J, Zhou F, et al. Complementation between microbial necromass and plant debris governs the long-term build-up of the soil organic carbon pool in conservation agriculture [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 178:108963.
<http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108963>
- [30] Wang S, Lu C, Huai S, Yan Z, Wang J, et al. Straw burial depth and manure application affect the straw-C and N sequestration: Evidence from ¹³C & ¹⁵N-tracing [J]. Soil & Tillage Research, 2021, 208:104884.
<http://doi.org/10.1016/j.still.2020.104884>
- [31] WANG L, WANG T, XING Z, et al. Enhanced lignocellulose degradation and composts fertility of cattle manure and wheat straw composting by Bacillus inoculation [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(3):109940.
<http://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109940>
- [32] HU Q, LI C, CAO C, HUANG J, et al. The rice-edible mushroom pattern promotes the transformation of composted straw-C to soil organic carbon [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023, 353:108560.
<http://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108560>
- [33] ZHU K, YE X, RAN H, et al. Contrasting effects of straw and biochar on microscale heterogeneity of soil O₂ and pH: Implication for N₂O emissions [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2022, 166:108564.
<http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108564>
- [34] ZHANG C, LIU L, ZHAO M, et al. The environmental characteristics and applications of biochar [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(22): 21525-21534.
<http://doi.org/10.1007/s11356-018-2521-1>
- [35] CHAGAS J, FIGUEIREDO C, RAMOS M. Biochar increases soil carbon pools: Evidence from a global meta-analysis [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 305:114403.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114403>
- [36] 李文杰, 左翔之, 王建, 等. 生物炭施用土壤的固碳减排效应及机制 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(5):1-12.
<http://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230529.017>
- [37] 吴淑勋, 马文林, 孙天晴, 等. 秸秆饲料化技术减排评价指标体系研究——基于层次分析法 [J]. 黑龙江畜牧兽

- 医,2020(04):1-6.
<http://doi.org/10.13881/j.cnki.hljxmsy.2019.06.0024>
- [38] 陆刚.农作物秸秆饲料化的利用技术[J].浙江畜牧兽医,2022,47(05):26-27+31.
- [39] 王喜凤,李海峰,屈建航.瘤胃中产琥珀酸丝状杆菌的纤维素降解机制及其在秸秆饲料化中的应用[J].饲料研究,2023,46(05):126-130.
<http://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2023.05.026>
- [40] 郭丽丽.农作物秸秆“五化”利用及展望[J].河南农业,2023(14):62-64.
<http://doi.org/10.15904/j.cnki.hnny.2023.14.022>
- [41] 苑鹤,李威,蔡丹,等.秸秆原料化利用技术简介[J].河北农业,2018(08):33-34.
- [42] 霍丽丽,姚宗路,赵立欣,等.秸秆综合利用减排固碳贡献与潜力研究[J].农业机械学报,2022,53(01):349-359.
<http://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.038>
- [43] 朱颢,胡启春,汤晓玉,等.我国农作物秸秆资源燃料化利用开发进展[J].中国沼气,2017,35(02):115-120.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1166.2017.02.021>
- [44] WANG Z, WANG Z, XU G, et al. Sustainability assessment of straw direct combustion power generation in China: From the environmental and economic perspectives of straw substitute to coal[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273: 122890.
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122890>
- [45] 唐宏伟.农作物秸秆燃料化利用价值分析[J].农机科技推广,2017,(12):52-53.
- [46] 石祖梁,王飞,李想,等.秸秆“五料化”中基料化的概念和定义探讨[J].中国土壤与肥料,2016(06):152-155.
<http://doi.org/10.11838/sfsc.20160625>
- [47] WANG Z, CHEN J, MAO S, et al. Comparison of greenhouse gas emissions of chemical fertilizer types in China's crop production[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 1267-1274.
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.120>
- [48] ARYAL, BABITA, GURUNG, ROSHNI, CAMARGO, ALINE F, et al. Nitrous oxide emission in altered nitrogen cycle and implications for climate change[J]. Environmental pollution(Barking, Essex:1987), 2022, 314:120272.
<http://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120272>
- [49] GAO D, SHENG R, et al. Effect of phosphorus amendments on rice rhizospheric methanogens and methanotrophs in a phosphorus deficient soil[J]. Geoderma, 2020, 368(C): 114312.
<http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114312>
- [50] LIU H, LI J, LI X, et al. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland[J]. Science Bulletin, 2015, 60(6): 598-606.
<http://doi.org/10.1007/s11434-014-0679-6>
- [51] 邹原东,范继红.有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展[J].中国农学通报,2013,29(03):12-16.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6850.2013.03.003>
- [52] XIA L, LAM S, YAN X, et al. How Does Recycling of Livestock Manure in Agroecosystems Affect Crop Productivity, Reactive Nitrogen Losses, and Soil Carbon Balance? [J]. Environmental science & technology, 2017, 51(13): 7450-7457.
<http://doi.org/10.1021/acs.est.6b06470>
- [53] 徐明岗.化肥有机替代找回另一半农业[J].中国农村科技,2016(02):37-39.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9768.2016.02.010>
- [54] GRAHAM R, WORTMAN S, PITTELKOW C, et al. Comparison of Organic and Integrated Nutrient Management Strategies for Reducing Soil N₂O Emissions [J]. Sustainability, 2017, 9(4): 510.
<http://doi.org/10.3390/su9040510>
- [55] 谭月臣.氮肥、耕作和秸秆还田对作物生产和温室气体排放的影响[D].北京:中国农业大学,2018.
- [56] XU W, ZHAO D, MA Y, et al. Effects of long-term organic fertilizer substitutions on soil nitrous oxide emissions and nitrogen cycling gene abundance in a greenhouse vegetable field[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 188: 104877.
<http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104877>
- [57] NY-884-2012,生物有机肥[S].北京:中华人民共和国农业部,2012-06-06.
- [58] 可艳军,张雨萌,郭艳杰,等.生物有机肥配合深松对农田土壤肥力和作物产量的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(04):157-166.
<http://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2022.0203>
- [59] LI H, ZHOU Y, MEI H, et al. Effects of Long-Term Application of Earthworm Bio-Organic Fertilization Technology on Soil Quality and Organo-Mineral Complex in Tea Garden[J]. Forests, 2023, 14(2): 225.
<http://doi.org/10.3390/f14020225>
- [60] 马莹,曹梦圆,石孝均等.植物促生菌的功能及在可持续农业中的应用[J].土壤学报,2022,76(11):1-15.
<http://doi.org/10.11766/trxb202203160112>

- [61] DONG, CAO Y. Research progress on the immune regulation of symbiotic nitrogen fixation between legumes and rhizobia[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(10): 25-33.
<http://doi.org/10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2019-0716>
- [62] ZHANG, SUN J, XU J, et al. Isolation and identification and evaluation of nitrogen-fixing bacillus strain GD272 [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1196-1201.
<http://doi.org/10.3321/j.issn:1008-505X.2009.05.030>
- [63] 常珺枫, 刘莹, 李陈, 等. 农田氮磷流失特征及影响因素研究[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(15): 69-75.
- [64] CHEN W, ZHOU H, WU Y, et al. Direct and indirect influences of long-term fertilization on microbial carbon and nitrogen cycles in an alpine grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 149: 107922.
<http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107922>
- [65] DEVI R, KAUR T, KOUR D, et al. Minerals solubilizing and mobilizing microbiomes: A sustainable approaches for managing minerals deficiency in agricultural soil[J]. *Journal of applied microbiology*, 2022, 133(3): 1245-1272.
<http://doi.org/10.1111/jam.15627>
- [66] LI Z, TIAN D, WANG B, et al. Microbes drive global soil nitrogen mineralization and availability[J]. *Global change biology*, 2018, 25(3): 1078-1088.
<http://doi.org/10.1111/gcb.14557>
- [67] SUN B, GU L, BAO L, et al. Application of biofertilizer containing *Bacillus subtilis* reduced the nitrogen loss in agricultural soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107911.
<http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107911>
- [68] WU S, ZHUANG G, BAI Z, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions from acidic soils by *Bacillus amyloliquefaciens*, a plant growth-promoting bacterium [J]. *Global change biology*, 2018, 24(6): 2352-2365.
<http://doi.org/10.1111/gcb.14025>
- [69] GENG Y, WANG J, SUN Z, et al. Soil N-oxide emissions decrease from intensive greenhouse vegetable fields by substituting synthetic N fertilizer with organic and bio-organic fertilizers[J]. *Geoderma*, 2021, 383: 114730.
<http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114730>
- [70] PRATIBHA R, SUDESHNA D, DEEPTI S, et al. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 21(1).
<http://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- [71] RODRIGUEZ H, FRAGA R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion[J]. *Biotechnology Advances*, 1999, 17(4): 319-339.
[http://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](http://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)
- [72] LI Z, XIA S, ZHANG R, et al. N₂O emissions and product ratios of nitrification and denitrification are altered by K fertilizer in acidic agricultural soils[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265(Pt B): 115065.
<http://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115065>
- [73] SOUMARE A, SARR D, DIEDHIOU G. Potassium sources, microorganisms and plant nutrition: Challenges and future research directions [J]. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 105-115.
<http://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.025>
- [74] MEENA V, MAURYA B, VERMA J. Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils? [J]. *Microbiological Research*, 2014, 169(5-6): 337-347.
<http://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.003>
- [75] JONIEC J, BEDNARZ J, et al. Microbiological Nitrogen Transformations in Soil Treated with Pesticides and Their Impact on Soil Greenhouse Gas Emissions[J]. *Agriculture*, 2021, 11(8): 787.
<http://doi.org/10.3390/agriculture11080787>
- [76] DENG X, ZHANG N, LI Y, ZHU C, et al. Bio-organic soil amendment promotes the suppression of *Ralstonia solanacearum* by inducing changes in the functionality and composition of rhizosphere bacterial communities [J]. *The New phytologist*, 2022, 235(4): 1558-1574.
<http://doi.org/10.1111/nph.18221>
- [77] LAL, RATTAN, MONGER, CURTIS, NAVE, LUKE, et al. The role of soil in regulation of climate[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2021, 376(1834): 1-13.
<http://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084>
- [78] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 等. 土壤酸化对温室气体排放影响的培育实验研究[J]. *中国环境科学*, 2005(04): 465-470.
<http://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6923.2005.04.019>
- [79] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(02): 160-167.
<http://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2018.02.005>

- [80] YANG J, YAO R. Management and Efficient Agricultural Utilization of Salt-affected Soil in China[J]. 2015, 30(Z1):162-170.
<http://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2015.Z1.018>
- [81] 于宝勒. 盐碱地修复利用措施研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(07):81-87.
- [82] 曹伟, 魏光辉, 谷新保, 等. 农田明渠排水条件下土壤水盐运移规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(02):234-238.
- [83] 张彬, 杨宁, 王迪, 等. 国内外盐碱地改良技术比较及对吉林省的启示[J]. 现代营销(上旬刊), 2023(03):113-115.
<http://doi.org/10.19921/j.cnki.1009-2994.2023-03-0113-038>
- [84] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(01):10-27.
<http://doi.org/10.11766/trxb202110270578>
- [85] 胡琴. 灌溉水量对滨海盐碱地有机碳及水盐运移影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
<http://doi.org/10.7666/d.D01698646>
- [86] Gougoulias C, Joanna M, Liz J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2014, 94(12):2362-2371.
<http://doi.org/10.1002/jsfa.6577>
- [87] 冷寒冰, 马利静, 秦俊. 滨海盐碱地改良对绿地碳汇效益影响的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(S2):96-101.
- [88] 魏坤峰. 盐碱地微区改土植树技术[J]. 盐碱地利用, 1991(02):17-19.
- [89] 王仰仁, 周青云, 孙书洪, 等. 滨海盐碱地微区改土系统刍议[J]. 天津农学院学报, 2011, 18(04):45-48.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.1008-5394.2011.04.014>
- [90] 赵英, 王丽, 赵惠丽, 等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望[J]. 中国农学通报, 2022, 38(03):67-74.
- [91] 王丽. 秸秆配施脱硫石膏对滨海盐碱土碳固持的影响[D]. 烟台: 鲁东大学, 2022.
<http://doi.org/10.27216/d.cnki.gysfc.2022.000671>
- [92] 李兵, 刘广明, 苏里坦, 等. 基于磁感式大地电导率仪的土壤盐分解译模型[J]. 土壤, 2017, 49(04):789-794.
<http://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2017.04.022>
- [93] YU G, YANG Z, YAN L, et al. Effect of different bio-char particle sizes together with bio-organic fertilizer on rhizosphere soil microecological environment on saline-alkali land [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:1-14.
<http://doi.org/10.3389/fenvs.2022.949190>
- [94] ZHANG P, YANG F, ZHANG H, et al. Beneficial Effects of Biochar-Based Organic Fertilizer on Nitrogen Assimilation, Antioxidant Capacities, and Photosynthesis of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) under Saline-Alkaline Stress [J]. Agronomy, 2020, 10(10):1562.
<http://doi.org/10.3390/agronomy10101562>
- [95] YANG S, HAO X, XU Y, et al. Meta-Analysis of the Effect of Saline-Alkali Land Improvement and Utilization on Soil Organic Carbon [J]. Life (Basel, Switzerland), 2022, 12(11):1870.
<http://doi.org/10.3390/life12111870>
- [96] 赵振勇, 田长彦, 张科, 等. 盐碱地生物改良与盐生植物资源综合利用[J]. 高科技与产业化, 2020(09):64-66.
- [97] 程珊珊, 李瑞利, 石福臣. 应用耐盐植物改良滨海盐渍土的研究[C]. //2015年中国环境科学学会年会论文集. 2015:4418-4424.
- [98] 黄晶, 孔亚丽, 徐青山, 等. 盐渍土壤特征及改良措施研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(01):18-23.
<http://doi.org/10.13758/j.cnki.tr.2022.01.003>
- [99] 韩敏, 红梅, 刘鹏飞, 等. 不同改良措施对土默川平原碱化土壤理化性质的影响[J]. 北方农业学报, 2018, 46(02):76-81.
<http://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1197.2018.02.16>
- [100] WU X, XIE Y, QIAO J, et al. Rhizobacteria Strain from a Hypersaline Environment Promotes Plant Growth of *Kengyilia thoroldiana* [J]. Microbiology, 2019, 88(2):220-231.
<http://doi.org/10.1134/S0026261719020127>
- [101] YANG W, JIAO Y, YANG M, WEN H, et al. Methane uptake by saline-alkaline soils with varying electrical conductivity in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 112(2):265-276.
<http://doi.org/10.1007/s10705-018-9943-5>
- [102] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(05):680-695.
<http://doi.org/10.1007/s11430-020-9705-9>
- [103] YUE K, WU Q, PENG Y, et al. No tillage decreases GHG emissions with no crop yield tradeoff at the global scale [J]. Soil & Tillage Research, 2023, 228:105643.
<http://doi.org/10.1016/j.still.2023.105643>

- [104] LI Z, ZHANG Q, LI Z, QIAO Y, et al. Effects of no-tillage on greenhouse gas emissions in maize fields in a semi-humid temperate climate region [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 309: 119747.
<http://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119747>
- [105] BANSAL S, YIN X, SCHNEIDER L, et al. Carbon footprint and net carbon gain of major long-term cropping systems under no-tillage [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 307: 114505.
<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114505>
- [106] JOHAN S, et al. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 155-160.
<http://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00730.x>
- [107] STEPHEN M, ALSAKER C, et al. Climate and Soil Characteristics Determine Where No-Till Management Can Store Carbon in Soils and Mitigate Greenhouse Gas Emissions [J]. *Scientific reports*, 2019, 9(1): 1-8.
<http://doi.org/10.1038/s41598-019-47861-7>
- [108] ZHANG L, XU X. Difference in carbon footprint between single and double-cropping rice production in China, 2003-2016 [J]. *Environmental science and pollution research international*, 2021, 28(21): 1-10.
<http://doi.org/10.1007/s11356-021-12543-3>
- [109] NITTAYA C, AMNAT C., KAZUYUKI Y, et al. Greenhouse gas emissions, soil carbon sequestration and crop yields in a rain-fed rice field with crop rotation management [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 237: 109-120.
<http://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.025>
- [110] GAN Y, LIANG C, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production [J]. *Nature communications*, 2014, 5(1): 1.
<http://doi.org/10.1038/ncomms6012>
- [111] WANG X, CHEN Y, YANG K, et al. Effects of legume intercropping and nitrogen input on net greenhouse gas balances, intensity, carbon footprint and crop productivity in sweet maize cropland in South China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127997.
<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127997>
- [112] OERTEL C, MATSCHULLAT J, ZURBA K, et al. Greenhouse gas emissions from soils—A review [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry-Interdisciplinary Journal for Chemical Problems of the Geosciences and Geoecology*, 2016, 76(3): 327-352.
<http://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- [113] WANG H, ZHAO R, ZHAO D, et al. Microbial-Mediated Emissions of Greenhouse Gas from Farmland Soils: A Review [J]. *Processes*, 2022, 10(11): 2361.
<http://doi.org/10.3390/pr10112361>
- [114] ZOU X, LI Y E, GAO Q, et al. How water saving irrigation contributes to climate change resilience—a case study of practices in China [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2012, 17(2): 111-132.
<http://doi.org/10.1007/s11027-011-9316-8>
- [115] TROST B, PROCHNOW A, DRASTIG K, et al. Irrigation, soil organic carbon and N₂O emissions. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(4): 733-749.
<http://doi.org/10.1007/s13593-013-0134-0>
- [116] HAN L, ZHANG Y, JIN S, et al. Effect of Different Irrigation Methods on Dissolved Organic Carbon and Microbial Biomass Carbon in the Greenhouse Soil [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(8): 1175-1182.
[http://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60205-4](http://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60205-4)

Review on Greenhouse Gas Mitigation and Carbon Sink in Agroecosystem

WANG Jiachen^{1,2,3}, LIU Ziyan^{3,4},
YIN Zheyu^{3,5}, BAI Zhihui^{3,5}, ZHUANG Xuliang^{3,5}

1. Binzhou Institute of Technology, Weiqiao-UCAS Science and Technology Park, Binzhou 256606, China;
2. Zhengzhou University, Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou 450001, China;
3. Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;
4. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 101314, China)

Abstract: Globally, mankind is facing an increasingly severe challenge of climate change, and the vast majority of countries are making sustained efforts to solve the problem. Agroecosystem is not only an important source of greenhouse gas emissions, but also has a large potential of carbon sink, so research on greenhouse gas mitigation and carbon sink in agroecosystems is an important initiative to address the challenge of climate change. However, the current domestic research on carbon sinks mainly focuses on forests, grasslands and oceans, and there are relatively few studies on carbon sinks in agroecosystems. Studies on greenhouse gas emission reduction is also mainly concentrated in the fields of industry, energy and lacks the attention in the field of agriculture. Therefore, the research on greenhouse gas mitigation and carbon sink in agroecosystems needs to be carried out urgently. This paper systematically reviewed the research progress to reduce greenhouse gas emissions and increase carbon sinks in agroecosystem, and focused on the role of a series of agricultural management measures, such as agricultural waste disposal, fertilizer management and soil improvement in reducing emissions and increasing sinks in agroecosystem, and put forward relevant suggestions and prospects for the measures to reduce emissions and increase sinks in agroecosystem and the future research direction, with a view to providing useful reference for agricultural practice and realize green and sustainable agricultural production.

Keywords: Agroecosystem; greenhouse gas mitigation; carbon sink; ecosystem sink enhancement; agricultural management measures

DOI: 10.48014/pceep.20230914001

Citation: WANG Jiachen, LIU Ziyan, YIN Zheyu, et al. Review on greenhouse gas mitigation and carbon sink in Agroecosystem[J]. Progress in Chinese Eco-Environmental Protection, 2023, 1(3): 22-35.

Copyright © 2023 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

