

中国农田和草原温室气体减排的技术选择¹

Dali Nayak¹, 程琨², 王雯³, Frank Koslowski⁴, 颜晓元⁵, Miao Guo⁵, Jamie Newbold⁶, Dominic Moran⁴, Laura Cardenas⁷, 潘根兴², Pete Smith¹

¹University of Aberdeen, ²南京农业大学, ³Paris-Dauphine University 及中国农业科学院, ⁴Scotland's Rural College, ⁵中国科学院, ⁶Aberystwyth University, ⁷Rothamsted Research

执行摘要:

- 采用由下而上的减排潜力评估方法，即对通过专家评审的期刊论文中发表的中国资料的元分析的方法评价了不同管理措施对降低中国农业系统中温室气体排放的技术潜力；
- 水稻农业最大的减排潜力包括节水灌溉、改生育中期排水为间歇灌溉，保护性耕作、鱼稻或稻鸭共作、硝化抑制剂使用、硫酸铵代替尿素，控制灌溉的牲畜粪便和沼渣等有机肥还田、秸秆不还田或作为生物质炭还田等。减少稻田的施氮量仍然是一个关键的举措，虽然减排潜力不算最大，但减少工业间接排放和降低环境污染风险负荷；
- 旱地农田的巨大减排潜力在于化肥和有机肥配施，保护性耕作，减少氮肥施用，硝化抑制剂和应用生物炭等。尽管秸秆还田在旱地可能有减排潜力，但由于植保和劳动力投入增加而变得日益困难；
- 对园艺土壤来说，减少氮肥用量和施用硝化抑制剂具有极大的减排潜力，园地过量施用氮肥已经造成作物品种和环境质量的许多不利影响；
- 由于过度放牧或土地利用转换而引起的草原退化是中国草地土壤碳库损失的重要原因。必须通过重播植草、减轻放牧强度、禁止放牧或将低产农田转变为草地等退化草地的恢复显得是具有巨大减排潜力的有效措施。

¹该简报基于中英合作项目“未来中国农业温室气体排放评价与减排措施”的研究结果。该项目由英国环境食品及乡村事务部（Defra）和中国农业部的资助。该项目为中英可持续农业创新协作网（SAIN）的一部分(见 www.sainonline.org)

一、前言

中国是全球最大的人类源温室气体 (GHG) 排放国, 目前全球大约 20% 的排放来自中国 (Leggett et al., 2008)。尽管已有相关减排政策, 但中国的温室气体排放仍然日益增加, 预计至少将持续到 2030 年。据估计, 农业温室气体排放量占全国总人为源排放的 17% 左右 (IEA 2007)。中国实施了一批主要集中在绿色能源领域的减排计划, 还期望在农业领域在维持满足其巨大人口需求的食物安全的同时实现减排。因此, 农业温室气体减排必须以满足食品安全和提高肥料利用效率为前提。本期政策简报介绍通过定量中国农业不同措施选项的基础资料分析得出的减排技术潜力评价结果。关于这些减排措施的经济潜力和实施因素已在 *政策简报第八期* 中反映。本文的减排潜力按不同农业产业中的已有的减排技术措施具体表述为, 如农田 (稻田和旱地) 以及农业草地, 畜牧业减排潜力在另一期政策简报阐述。

二、农田的减排技术措施及其潜力

在一年生作物农业生产中, 差不多 90% 的减排潜力在于减少温室气体 (CH_4 - 甲烷、 N_2O - 氧化亚氮或者 CO_2 - 二氧化碳) 净排放量或固定 CO_2 成为矿质土壤中的土壤有机质 (Smith et al., 2007a; 2008)。而稻田或旱地的 CH_4 和 N_2O 排放主要取决于管理措施的实施, 但改变管理措施也为减排提供了可能。然而, 当选择一个减排措施时, 最重要的是考虑其带来的不同温室气体排放引起的全球变暖效应 (GWP), 因为一种管理措施往往会影响到不止一种温室气体排放, 或者改变不止一种温室气体过程, 因此其净效应取决于所有温室气体排放的综合结果。减排对作物产量的影响也是不容忽视的, 因为大多数发展中国家的农民都是小户经营, 他们不得不考虑最大程度确保其食物生产和生计 (Smith and Eva, 2012)。

2.1 稻田的减排措施和潜力

减排措施的选择基于其对 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放的影响及它们的综合 GWP 效应。 CO_2 减排代表土壤碳库的净改变, 反映出 CO_2 被植物吸收输入到土壤的累积量与其分解释放量的差异。在水稻生长时期的减排主要通过水分和养分管理、耕作管理和种植制度管理和集约农作方法来减少温室气体排放。而在非生长季节或休耕时期, 最好的减排是保持土地排水干燥, 尤其是中国南方冬浸田。以下是关于稻田温室气体减排的具体建议措施:

2.1.1 节水灌溉或控制灌溉: 在水稻的生长季节时期, 习惯灌溉管理主要是生育期排水和排水后再进行淹水 (F-D-F)。这比稻田持续淹水在减排上要好。如果将中期排水后的灌溉控制在保持土地湿润 (F-D-F-M) 而不是淹水状态, 可以比持续淹水降低总 GWP 的两倍以上。如果把中期排水转变为间歇式灌溉排, 也就是排水间隔要么使土面浸水, 要么就是保持土壤潮湿, 可以减排 $1.25 \text{ t CO}_2\text{-eq/ha/yr}$ 。当使用有机粪肥或秸秆还田的时候, 节水灌溉的好处十分可观, 因为在持续浸水的情况下, 有机物质的添加会显著增加 CH_4 排放。

2.1.2 停止稻田秸秆还田: 与只施化肥 (氮磷钾) 比较, 秸秆还田提高 108% 的 CH_4 排放, 同时也抑制 21% 的 N_2O 排放。秸秆还田可以减少 N_2O 排放和增加土壤碳汇 $0.73 \text{ t CO}_2\text{-eq ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, 但却大大增加 CH_4 的排放, 因而大大超过由 N_2O 排放减少或土壤碳固定带来的温室气体减排效益。因此, 停止稻田秸秆还田应该是稻田减排的有效措施。不过, 间歇灌溉结合秸秆还田的使用却可以减排因为其排放是 $0.88 - 1.43 \text{ t CO}_2\text{-eq ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, 而持续淹水而又秸秆还田的排放可达到 $3.80 \text{ t CO}_2\text{-eq ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。

2.1.3 减少化学氮肥施用：与空白试验组对照，施用氮肥每季每公顷 100 - 250 kg 时显著降低 27%的甲烷排放和增加 42% - 170%的 N₂O 排放。当氮肥分别是单施、氮磷配施和氮磷钾配施 时，每年分别增加 0.06%、0.23%和 0.44%的土壤碳汇。然而，随着氮肥的过度施用及其环境影响日益受到关注，需要明确减少氮肥对减少稻田温室气体的作用。中国水稻平均氮肥用量是 150 - 250 kg N ha⁻¹，高于全球平均水平 67%以上 (Peng et al., 2010)。只要不减产，减少氮肥用量是一个有效的减排措施，这不仅可以减少 N₂O 的直接排放，且通过减少氮肥需求量而减少氮肥工业的间接排放。事实上，减少氮肥施用并不显著影响 CH₄ 的排放，而减少 10% - 70%的氮肥却降低 8% - 57%的 N₂O 排放。就中国目前的水稻平均施氮量来看，降低 1/3 的施氮量 (即平均施氮量 231 kg N ha⁻¹，Li et al., 2010)，将减少 27%的 N₂O 排放，产生 -0.12 t CO₂-eq ha⁻¹yr⁻¹ 的减排潜力。减氮尤其适用于水稻种植面积大且施氮量高的省份，如辽宁、江苏、广东、福建、湖北和四川等地区 (Chai et al., 2013)。

2.1.4 硫酸铵替代尿素：将尿素替换为硫酸铵 (AS) 可以减少 40%的 CH₄ 排放但增加 34%的 N₂O 排放。假设这种替代对土壤碳固定没有任何影响，其整体减排能力约为 -1.12 t CO₂-eq ha⁻¹yr⁻¹，可能成为一项良好的减排措施。

2.1.5 使用硝化抑制剂或缓释肥料：硝化抑制剂或缓释氮肥料是一种双赢的措施，因为其同时减少水稻田 CH₄ 和 N₂O 排放。例如使用脲酶抑制剂、硝化抑制剂或脲酶+硝化抑制剂，可分别减少 21% (11 - 29%) 的 CH₄ 排放和 24% (8 - 37%) 的 N₂O 排放。尽管数据少，仅是基于 10 个 CH₄ 数据点和 9 个 N₂O 数据点，结果依然表现出硝化抑制剂能显著降低 CH₄ 和 N₂O 排放。

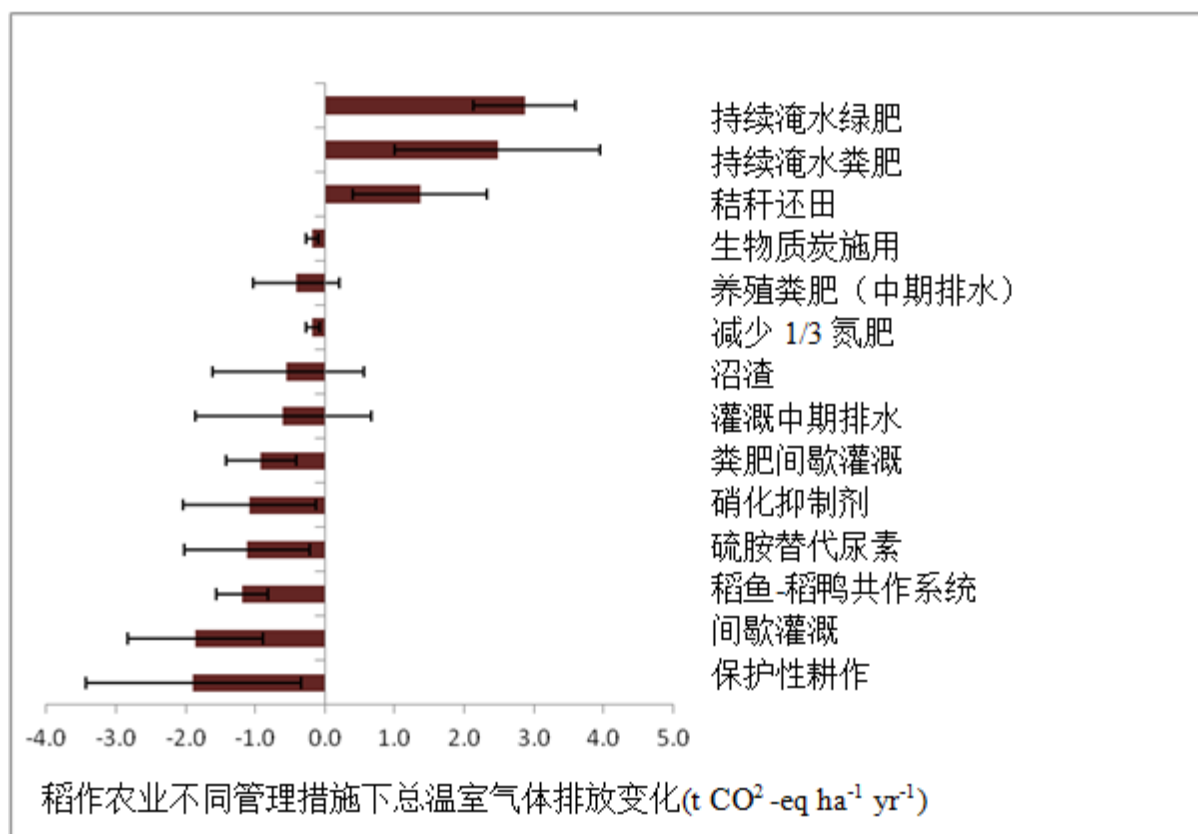
2.1.6 稻田施用生物炭：与未使用生物炭的农田相比较，施用作物秸秆热解的生物炭每年能增加 22%的土壤碳汇，也就是 6.14 t C ha⁻¹yr⁻¹，不过这也只是短期实验所得到的效益。生物炭的施用增加了 39%的 CH₄ 排放，同时减少 35%的 N₂O 排放。由于缺少长期生物炭使用对土壤有机碳影响的研究，这里在计算生物炭使用的技术潜力时忽略了生物炭对农田碳平衡的影响。由于生物炭的添加对土壤碳库具有明显的正效应且大幅度降低 N₂O 排放，因此它的总体减排潜力达 - 0.18 t CO₂-eq ha⁻¹yr⁻¹。生物炭添加可能是减少温室气体排放过程中最应该采取的行动。但生物炭的长期使用对土壤的物理性质、化学性质和土壤有机碳固定还不很清楚的，因此在相关政策公布前，应该有进一步的相关研究。

2.1.7 常规耕作转向保护性耕作：常规耕作转变为保护性耕作旨在减少水稻作耕作和土壤扰动，比如水稻 - 小麦或水稻 - 油菜种植模式保护性耕作可以封存 0.78 t CO₂-eq ha⁻¹yr⁻¹。实施保护性耕作的实践，相比传统耕作，CH₄ 排放会有 17%的下降，但 N₂O 排放增加 48%。但保护性耕作总体减排能力仍为 - 1.89 t CO₂-eq ha⁻¹yr⁻¹，因此采用水稻基种植制度中可能是一个很好的减排选项。

2.1.8 稻鱼或稻鸭共作系统：与单独水稻耕作比较，稻鱼或稻鸭共作系统农业可以减少 23%的 CH₄ 排放量，仅增加 4%的 N₂O 排放。再综合其它协同效应进行分析，例如提高产量、病虫害和杂草的有效控制、抗病性和提高氮效率等，提示稻鱼或稻鸭共作系统农业耕作可以带来较大温室气体减排效益以及经济效益。

2.1.9 施用有机肥：由分析可知，沼渣发酵应用仅仅增加 42%的 CH₄ 排放，但堆肥或发酵肥料却增加了近 112 - 138%的 CH₄ 排放。除了沼气替代常规化石燃料能源所获得的额外碳效益外，沼渣应用于稻田也能提高土壤肥力而减少 CH₄ 排放。养殖粪肥的使用能减少大约 46%的 N₂O 排放，而绿肥作物能增加 56%的 N₂O 排放。粪肥使用对 CH₄

排放的增加取决于水分情况。养殖有机肥明显降低 N_2O 排放，而提高 CH_4 排放但增加土壤有机碳封存，持续淹水，中期排水和间歇灌溉等不同水管理下的技术减排潜力分别为 2.48、- 0.41 和 - 0.92 $t CO_2\text{-eq ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。



2.2 旱作农田减排措施和潜力

管理旱地以达到最大土壤碳库和最小 N_2O 排放对未来气候变化有显著的作用。旱地减少温室气体排放总量可行性措施包括：

2.2.1 旱地秸秆还田：旱地农田秸秆还田在循环是提高土壤有机碳储存量的重要途径。与单施化肥 (NPK) 的相比，秸秆还田每年显著增加 0.73% 的土壤碳库，碳固定速率达到 $0.294 t CO_2\text{-eq ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。秸秆还田减少小麦或玉米田 8% 的 N_2O 排放，这个效果并不明显。由于固碳能力为 $-0.294 t CO_2\text{-eq ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 旱地秸秆还田仍是一个较好的减排选项。然而，由于集约种植制、植物保护投入和劳动力的缺乏等因素，旱地秸秆还田日益困难。

2.2.2 生物炭应用：生物炭对碳封存效率影响的短期研究显示，施用生物炭土壤可以积累近 $5.268 t C ha^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。旱地生物炭应用可以降低约 15% 的 N_2O 排放，从而可能使生物炭施用成为可能的减排选项，其潜力达到 $-0.122 t CO_2\text{-eq ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。生物炭在小麦和玉米作物中的应用减少了约 40% 的排放。由于缺少生物炭长期使用对土壤有机碳影响的数据研究，计算其减排技术潜力的时候只考虑生物炭对 N_2O 排放的影响，而未考虑碳平衡变化。生物炭与化肥的复合肥能够减少施氮量且又减少应用农

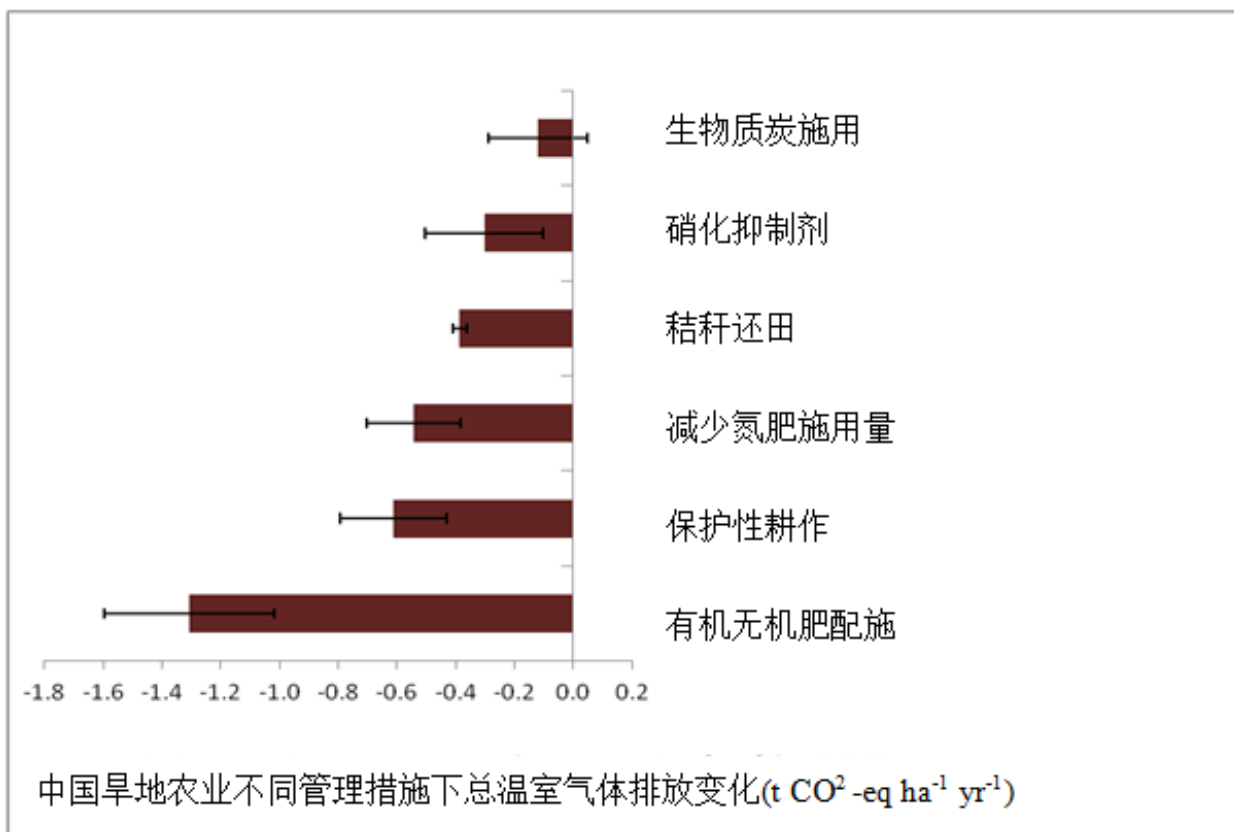
田的 N_2O 排放，因而显著贡献了净温室气体减排，因为避免了部分氮肥生产中导致的排放和减少农田的直接 N_2O 减排。

2.2.3 减少化学氮肥施用量：过度和低效施用化学氮肥会造成一系列的负面影响，如增加温室气体排放、加重水污染、土壤酸化、降低国家能源效率和减少农民净收入（SAIN 政策简报 No.5）。小麦和玉米的农民常规施氮量约高于推荐量的 60% - 150%（Norse et al., 2012）。与不施氮相比，氮肥用量为 0-150kg、150-300kg 和 300kg 以上的旱地分别增加了 93%、244%和 400% N_2O 排放。从 1998 年到 2009 年，中国的粮食产量增加了 10%，而氮肥的销量却增加了 49%，这表明在此十年期间肥料养分投入的大量增加并未得到相应的产量增加。将施氮量减少到一个能得到可持续利益的最佳水平，以此得到温室气体减排效益是中国旱地作物减排的重点。温室蔬菜的传统肥料投入多于作物养分吸收的 2 - 8 倍（Fan et al., 2010）。基于线性回归方法，分别以氮肥投入减少百分数和 N_2O 排放减少百分数为自变量和因变量，得出减少氮肥 10 - 30%将会降低 11% - 22%的小麦 N_2O 排放、17% - 30%的玉米 N_2O 排放和 27% - 45%的蔬菜作物 N_2O 排放。从当前平均施氮量来看，小麦、玉米、大田蔬菜和温室作物分别减少 18%、16%、10%和 15%的氮肥量，即 229kg、273kg、315kg 和 656kg $N\ ha^{-1}$ （Li et al., 2010），将依次有 0.155、0.267、0.387 和 0.939 $t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ 的总体减缓能力。这个结果分析不包括由于肥料生产、其他通过氨挥发或硝态氮淋溶损失所造成的温室气体排放的减少。

2.2.4 化肥和有机肥配施：与单独施用氮磷钾化肥相比，氮肥与有机肥配施每年能固定碳 1.435 $t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}$ 和但增加 75%的 N_2O 排放。较高的碳固定中和了有机肥带来的 N_2O 排放效应，净技术潜力达 - 1.306 $t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ ，因此这项技术可成为一种重要的减缓选项。

2.2.5 硝化抑制剂或缓释氮肥的使用：无论是物理改性（包膜或胶囊肥料）、化学改变（脲甲醛或亚异丁基脲基肥料）或生化反应修饰（硝化抑制剂），推荐缓释肥（SRF）替代传统氮肥，因为可以提高氮肥利用率来获得高收益。对玉米进行 DCD，NBPT 和 HQ 等硝化抑制剂的使用与单施尿素处理比较可以减少 50%的 N_2O 排放。玉米种植过程中使用化学缓释肥可以降低 44%的 N_2O 排放，而包膜缓释肥则对 N_2O 的排放没有明显降低。

2.2.6 实施保护性耕作：旱地进行保护耕作显著提高了土壤碳含量，其碳固定速率可达 0.915 $t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ 。保护性耕作与传统耕作相比， N_2O 的排放增加了 46%。因而这项技术的总体减排潜力仅为 -0.612 $t\ CO_2\text{-eq}\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ 。但采用保护性耕作也是一个潜在的减排措施。



2.3 农业草地的减排措施和潜力

在 1980 年到 2000 年期间，中国草地的土壤有机碳储量已经下降了 3.56Pg，而退化草地面积增加是造成碳储量损失的主要原因 (Xie et al., 2007)。草场退化主要是由于过度放牧、土地利用变化（例如草地改为农田）以及其它各种生态系统管理策略变化。反过来，通过良好的管理措施方法修复退化的草地可以有效地增加土壤有机碳储量和减少温室气体的排放。

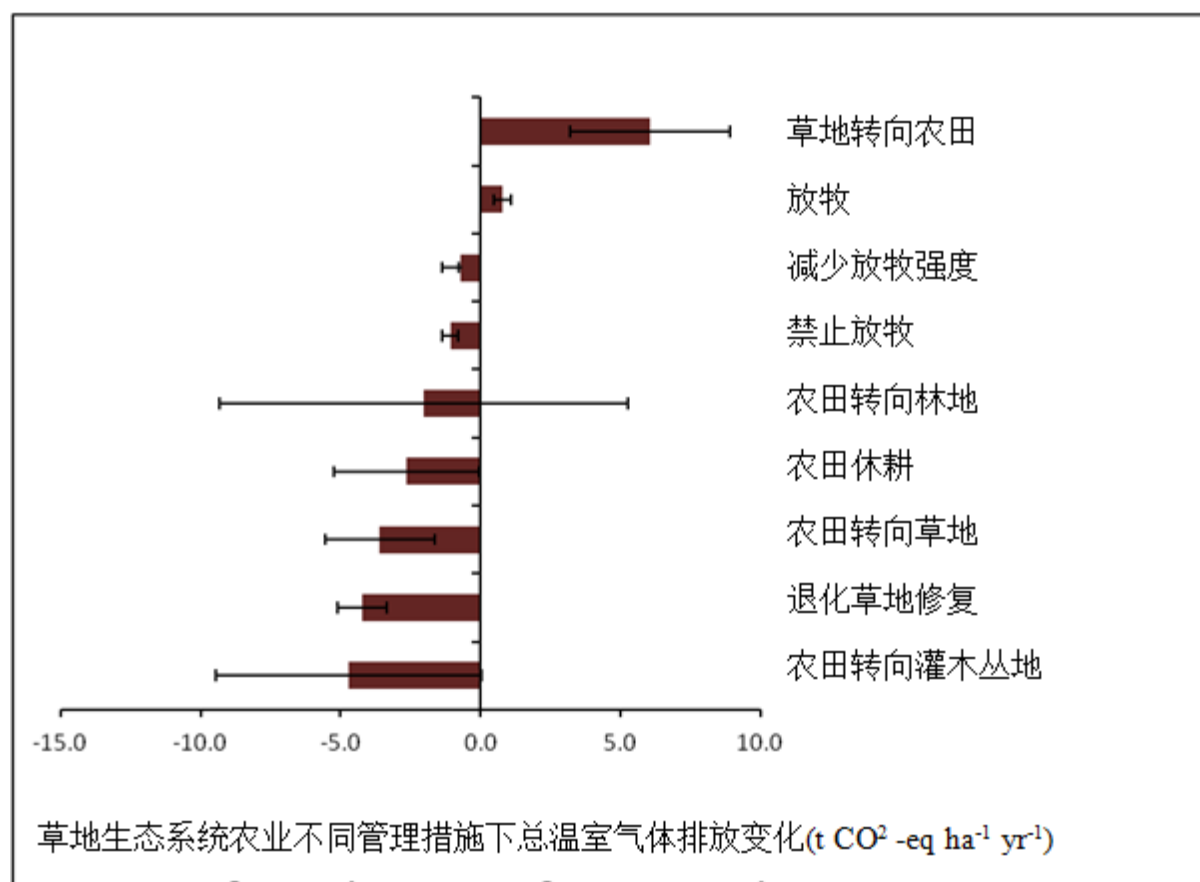
2.3.1 减少放牧强度：虽然适当的放牧被认为可以增加土壤有机碳贮存量，但总体来说，放牧已经降低了中国草地土壤有机碳的贮量、甲烷的吸收以及增加 N₂O 的排放。放牧强度在土壤有机碳损失上起着决定性的作用；重度放牧会显著减少土壤有机碳含量。分析表明，轻度放牧到中度放牧对土壤有机碳含量没有显著影响，但当放牧强度由重度降低到轻或中度放牧时，土壤有机碳含量增加了 0.771t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹。将重度放牧转变为轻度放牧 (LG)、中度放牧 (MG) 和自然草地 (WG) 分别能固定 0.825 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹、0.656 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹ 和 0.363 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹。重度放牧变为中轻度放牧可以减少 N₂O 排放和增加 CH₄ 吸收。所以减轻放牧强度或者禁止过度放牧不仅可以提升土壤有机碳库，还能减少温室气体排放。因地制宜降低放牧密度的将获得净的温室气体减排效益。

2.3.2 禁止放牧：禁牧每年能够提高土壤有机碳含量约为 1.48%，抑或说能够封存 1.06 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹。碳固定的量取决于实施禁牧措施的具体条件。在重度放牧造成草地退化的地方采取禁止放牧行动可以得到最大减排和环境利益。重度退化草地禁止放牧可以修复严重退化的草地，不过必须考虑粮食安全得到保障。

2.3.3 土地利用改变：土地利用决定着土壤碳水平和土壤温室气体源汇特征。草地转为农田每年会减少土壤有机碳含量 1.50%，即损失 6.05 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹。农田转

换为草地、灌木丛地和林地则能分别固定 3.94、4.74 和 2.03 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹。农田闲置每年能增加土壤有机碳含量 1.60%和固定 2.99 t CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹。低产农田，特别是在山丘地区坡耕地转化为灌木地或草地能够储存更多的碳，也是减轻土壤侵蚀的有效选择。

2.3.4 草原退化的恢复：利用禁止放牧、重播或者植树造林的途径来修复退化的草地平均每年可以固定 4.22 吨 CO₂ 或提高 SOC 含量约 10%。轻中度退化草地可以通过禁止放牧而回复到起始状态，但对于原生植被已被破坏的重度退化草地，只能使用重播和植被栽种的方式来得到植被恢复。在已退化的草地上培育稀疏林或防护林可以提高 44%的土壤碳封存。其中通过重播当地植物，如垂穗披碱草、冷地早熟禾和中华羊茅，土壤有机碳的固定可以提高 3.63%。



三、结论

基于上述分析的所有技术减排方法，对于水稻农业来说，具有良好减排潜力的管理方法有控制灌溉、保护性耕作、硫酸铵替代尿素、硝化抑制剂使用、稻鱼或稻鸭共作和减少氮肥应用。化肥和有机肥配施、保护性耕作和减少氮肥用量可能是旱地作物总温室气体减排的有效措施。草地农业的最主要减排途径之一应该是将低产土地，尤其是山丘地区坡耕地转变为灌木地或者草地，也可能是未来解决土壤侵蚀的有效措施。禁止放牧不仅能修复退化的草地，也能提高土壤碳汇和减少总温室气体的排放。本文结果是基于技术本身的减排潜力，未考虑经济因素或者技术推广的障碍因素。在另一份已经出版政策简报（SAIN 政策简报 No 8）中阐述了这些减排措施的实际减排

潜力及其对生产能力的影响、实施过程中的社会和经济限制以及改变政策在实现减排成效中的作用。

参考文献：

1. Cai, Z C., Tsuruta H., Minami K, 2000. Methane emission from rice fields in China: Measurements and influencing factors. *J. Geophys. Res.* 105(D13):PP. 17,231–17,242.
2. Chai R, Niu Y, Huang L, Liu L, Wang H, Wu L, Zhang Y (2013) Mitigation potential of greenhouse gases under different scenarios of optimal synthetic nitrogen application rate for grain crops in China.
3. IEA, World Energy Outlook 2007: Focus on China and India, November 2007.
4. Leggett, J. A., J. Logan, A. Mackey, 2008. China's Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Policies, CRS Report for Congress, Congressional Research Service, <http://www.fas.org/sgp/crs/row/RL34659.pdf>.
5. Norse, D., Powlson, D. and Lu, Y, 2012. Integrated nutrient management as a key contributor to China's low-carbon agriculture. In *Climate change mitigation and agriculture*. Earthscan publisher, London, ISBN: 978-1-84971-392-4.
6. Peng, S., Buresh, R., Huang, J., Zhong, X., Zou, Y., Yang, J., Wang, G., Liu, Y., Hu, R., and Tang, Q. (2010). Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 649–656.
7. Smith, P. and Wollenberg, E, 2012. Achieving mitigation through synergies with adaptation. In *Climate change mitigation and agriculture*. Earthscan publisher, London, ISBN: 978-1-84971-392-4.
8. Zhang, F. and Powlson, D, 2012. Policies and technologies to overcome excessive and inefficient use of nitrogen fertilizer: delivering multiple benefits. SAIN Policy brief no. 5.