



应对气候变化是我国经济发展中面临的主要挑战，气候变化对农业生产的影响及其应对已经列为稳定我国农业生产的主要战略任务。迄今为止，国内外对气候变化与中国农业发展有较多的研究报道，主要是气象学界对气候变化造成的农业灾害和气候变化情景下作物生长发育及产量变化的影响，结合气候变化的作物生产模型对中国粮食生产的影响分析提出了迥异的结果，例如美国国际观察研究所和我国学者采用模型对未来气候变化对我国粮食生产的影响的评估结果就迥然不同。这种矛盾的认识严重制约对将来我国农业受到气候变化影响的幅度的判断和应对气候变化战略途径的选择。

气候变化与农业的问题涉及气候变化科学、农业/生命科学和作物生产管理、农业与农村经济科学等多学科交叉问题，需要利用一个开放的平台进行充分的交流和碰撞，围绕国家目标和农业行业特点，科学探讨认识气候变化对中国农业生产的整体影响，并从减排与生产共赢的角度探讨应对气候变化的农业发展战略和提出技术发展方向。

为提出可行的应对气候变化对农业影响的对策和途径奠定科学基础，通过不同学科和不同领域科学家，特别是气候变化领域的地球科学家和农业/生命科学领域与农业实践专家的充分交流、讨论和碰撞；多角度认识气候变化对农业生产影响的特点和主要因素；多学科探讨由气候变化对农业生产系统过程的影响和农业资源环境过程的影响的交互作用，并从农业生产—经济管理—乡村发展的系统角度上审视气候变化对农业生产的可能影响及其区域性分布和行业性特点。从而科学评估气候变化与我国农业发展关系，凝练气候变化与农业研究的核心科学问题和研究的国家策略。本刊结合380次香山科学会议的召开，邀请与会专家撰文在本刊进行更进一步的深入探讨，以飨读者。

本选题策划人：

南京农业大学资源环境学院 潘根兴

本刊编辑部

王继红

参加讨论的作者：



南志标，中国工程院院士，教授，博士生导师，兰州大学草地农业科技学院院长，甘肃草原生态研究所所长，兼任国家自然科学基金委员会畜牧兽医学科评审组成员。研究领域包括牧草与草坪草病理学、牧草种子学、禾草内生真菌学、草地农学及牧草驯化与选育学等。

潘根兴，南京农业大学资源环境学院教授，土壤学国家重点学科带头人，农业资源与生态环境研究所所长，南京农业大学农业与气候变化研究中心主任，国务院第六届学科评议组农业资源利用学科组召集人。长期从事农业资源与环境科学研究，近年来主要从事农业与气候变化研究。



林而达，全国政协常委、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员，农业部农业环境与气候变化重点实验室主任；兼任国家气候变化专家委员会委员、国际全球环境变化人文因素计划中国国家委员会委员等职。曾任中国农业科学院农业气象研究所、农业环境与可持续发展研究所所长。

马世铭，中国农科院农业环境与可持续发展研究所气候变化研究室研究员。2001年于德国尤斯图斯-李比希-吉森大学获博士学位。长期从事农业生态学和农作制度等相关领域的教学和研究工作。研究领域和研究方向：气候变化影响与适应对策、农业生态。



任国玉，研究员，博士生导师，国家气候中心首席专家，中国气象局气候研究开放实验室学术委员会副主任，中国气象学会气候变化委员会副主任委员。德国哥廷根大学洪堡学者，兰州大学和南京信息工程大学兼职教授。目前从事气候变化和古气候方面的研究和教学。

邹建文，南京农业大学引进海外杰出人才，特聘教授，博士研究生导师，南京农业大学资源与环境科学学院副院长，中国土壤学会青年工作委员会副主任，第六届国务院学位委员会学科评议组（农业资源利用）秘书。主要从事农田碳氮循环与全球变化研究。



气候变化对畜牧业的影响值得高度重视

南志标 侯扶江 朱伟云 汪诗平 佟建明 等

我国畜牧业发展在国民经济和人民生活中具有举足轻重的战略地位。我国畜牧业分为草地畜牧业和设施畜禽养殖业，一方面其生产中的温室气体在我国温室气体总排放中占据较大份额，另一方面无论是草地畜牧业还是设施养殖业都受到气候变化的严峻挑战。

我国天然草地面积大、类型多，是重要的碳库。通过科学合理的利用，可以达到维持现有碳库、增加退化草地碳汇功能、降低温室气体排放的目标，其潜力巨大。我国天然草地碳贮量为56.26Gt，土壤碳占93.3%。其中，亚高山草地类组占27.5%，斯太普草地类占21.6%。全国草地有机碳与热量负相关，在相同热量带内，草地土壤有机碳汇随降水增加而上升，草地0—20cm土层有机碳汇随湿润度K值呈凸抛物线变化。如果CO₂倍增，我国天然草地面积将减少3.6%，草地碳贮量下降4.9%。其中，植物碳量减少8.3%，土壤有机

碳损失4.7%。若不考虑草地面积变化，降水增加20%，气温升高2℃时，草地植被碳量、土壤碳量和草地总碳量分别增加37.3%、53.8%和52.7%；气温升高4℃，则分别增加42.8%、61.9%和60.6%。冷荒漠草地类组增幅在两种情景下分别达到62.9%和69.4%；萨王纳草地类增幅分别为46.2%和51.7%。认为我国草业系统碳汇扩增战略应在保证草地碳汇总量的基础上，提高单位碳排放的畜产品产量。需要建立碳汇扩增的草地农业系统分区模式、加强放牧草地管理、加大优质栽培牧草种



植、改善国民食物组成、调整家畜生产结构、降低单位畜产品碳排放、参与利用清洁发展机制、重视草原灾害监测与预警等。

畜牧业温室气体排放占全球温室气体的18%，其中分别占人类总活动温室气体为9%CO₂、35–40%甲烷、65%N₂O。因此，减少畜牧业温室气体排放将对国家降低单位GDP温室气体排放发挥重要作用。畜牧业温室气体减排的可能途径，通过调整牛羊猪禽比例调整养殖结构，通过规模化、饲料资源来改善饲养方式，通过品种、饲料技术、饲养技术、畜舍环境控制来提高养殖效率，同时加强粪便处理，提高循环利用。

气候变化可能从多个方面影响畜牧业生产。在气候变化背景下，草地退化、农业饲料作物生产能力的可能下降，将对草地畜牧业的发展规模或畜产品质量造成严重影响，极端天气或气候灾害对养殖业特别是设施养殖业的冲击十分严重的。气候变化对我国草地畜牧业影响不确定性大。总体上，对高寒草地而言，短期内由于延长了生长季、提高了生物量，因而“利可能大于弊”；但对于温带草地而言，可能“弊大于利”。我们认为，气候变化对畜牧业的影响主要是表现为不利影响，并且将影响畜产品奶产品的质量和竞争力。草地将表现为退化和承载力下降的趋势，畜牧业温室气体释放可能增加，养殖成本将明显升高。气候变化对设施畜牧业具有直接、多方面和显著的影响。在不同地区、不同海拔和不同季节的情况下，气候条件明显不同。已有研究证明，气候条件对动物机体的内分泌、采食量、生活习性都会产生不同程度的影响。受气候条件的影响，在正常自然条件下，不同地区具有适宜养殖的畜禽品种，比如奶牛适宜在北方地区养殖，在比较炎



热的地区生产性能较低。如果想改变自然规律，就必须人为创造适宜的条件，增加设施上的投入。近年来气候研究的结果表明，极端气候现象的发生频率明显增加。这为养殖设施条件和装备不仅增加了成本而且增加了难度。

由于气候变化下温度带和雨量分布的影响，宜牧面积和地区分布可能会有较大程度的变化，因此需要重新审视气候变化下我国草地畜牧业的区域分布，调整农牧区域布局和产业结构性比例。气候变化对我国草地畜牧业影响不确定性较大，草地畜牧业是受气候变化影响最大的产业之一，也是最脆弱的产业。我国草地畜牧业主要分布在生态脆弱地区和气候变化敏感地区。气候变化对脆弱地区产业的影响，通过生产能力下降而影响农民收益和收入，进而影响农民民生。极端性天气事件对养殖户的生产可能造成毁灭性损失，从而严重关系到农民的生活和生存状况。我国贫困地区农民对气候变化适应的脆弱性明显加大，特别是生态脆弱区的贫困人口将面临生存和发展的更大挑战。

为了保证畜牧业的健康发展，有

必要系统开展气候变化对畜禽的影响研究。而目前我国在气候变化对畜牧业的影响研究方面还很薄弱。亟待解决和加强的问题：现有土壤碳库的大小及其空间异质性如何？如何准确监测？气候变化和人类活动如何影响土壤碳库？不同状态草地的固碳潜力及其技术措施，能否实现增汇减排的同时，兼顾发展草地畜牧业？固碳减排成本核算和补偿标准的制定原则和方法；未来变化情景及关键影响因素如何？草地畜牧业是受气候变化影响最大的产业之一，也是最脆弱的产业，如何适应？

由于气候变化下温度带和雨量分布的影响，宜牧面积和地区分布可能会有较大程度的变化，我国需要重新审视气候变化下我国草地畜牧业的区域分布，调整农牧的区域布局和结构性比例。在南方，寓农于草，利用有利的温度条件冬季生产牧草，发展营养体农业的潜力很大。同时，在气候变化或土地资源临界的地区，例如南方喀斯特山区，发展草地农业，以牧补农，农牧互动可能也是克服气候变化对大田农作物生产制约的一大潜在途径。**科**

农业与气候变化的若干科学问题

潘根兴

一、如何认识气候变化对农业的影响？

认识气候变化影响农业的特征是探索应对和适应的可能途径的科学基础。尽管有一些影响报道和模型的影响的估计，但气候变化对农业的影响的具体机制对不同产业的影响特点和趋势仍然很不清楚。气候变化通过光温水的分配和



分布的变化而直接影响作物的生长，但也可能通过这些条件的改变而改变了病虫害/杂草和其它生物的生存和发展以及演替，从而间接危害作物的生长或产量的形成；最近几年的气候变化，还常常表现出短期的突发性事件对某种作物/动物的不利影响，而严重影响生产能力，成为灾害性影响，而另一些气候变化，通常只表现为环境条件的趋势性变化，例如持续的降雨减少的干旱化，大气温度和CO₂浓度的升高，造成了作物/动物生长发育和生活的环境条件的胁迫性影响，这些直接影响和间接影响，长期影响和短期影响，胁迫性影响与灾害性影响，这些影响是如何相互作用的，其综合影响在不同的产业和不同地区将表现出什么特点？这些事决定我们筛选，哪些是技术能够应对，哪些是技术只能规避的？哪些只能合理减缓的？只有认识这些影响和清楚这些影响的严重性，我们才能做好因地制宜的应对。我们对于气候变化对农业的影响，至今还没有从对产量的终极影响走向这些交互作用影响的分析和评价，这是真正能够走向理性认识气候变化对农业影响的最为基础和最为关键的科学问题。但严重的是，因为这些问题目前还不能有完善的试验方案来研究，还不能有足够的时间来认识，而要得到气候变化对我国农业的影响的结论是十分局限和有风险的。

因此，实地的和长期的农业观察和试验是必不可缺少的，与模型研究不可或缺一样，农业生产系统的实地和长期的监测和试验是必须尽快完善和补充的。

二、如何认识气候变化对我国耕地农业和粮食安全的影响？作物生产潜力抑或资源有效潜力？两者孰重孰轻？

讨论气候变化对农业的影响，尤其是对耕地农业和粮食安全的影响，较多地关注气候变化下作物生产潜力的变化，但是如何动态地和相互影响地关注气候变化对整个国家的粮食生产能力而不是具体田块的生产能力，是一个估计气候变化对我国粮食安全长远影响的极为关键的问题。根据作物光合模型估计气候变化对作物

生产的影响，是未考虑其它条件变化的影响。对于一个国家而言，气候变化对粮食作物生产力的影响和气候变化对能够生产粮食的耕地资源供应的影响，这两方面的影响的综合结果将决定气候变化下粮食安全的走势。而这方面的研究还远远不够。例如，升温和CO₂浓度增高提高作物生产潜力，温带地区作物生长温度适宜性提高；作物带北移和西移，这与我国经济发展中耕地重心位移较为符合；但是，农作物生长的光合潜力增强，需要更为充足的农业资源有效供给，特别是水资源，降水不匹配将严重制约本来不高的生产潜力，光合潜力增长地区降水减少，春旱、秋旱加剧，特别是气候变化强烈的东北、西北地区，尽管温度等趋势性变化可能利于生产，但土壤肥力和土壤墒情的下降反而可能产生更大的粮食生产减产风险。这些是已有的模型研究还没有充分考虑的问题。另外，优质耕地资源日益紧缺，生产中心的西移和北移可能会加剧我国粮食生产的脆弱性，据国土资源部的估计，我国中低产田比例至今仍然居高不下，在1990年占71.3%；到2009年其比例还高达67.1%。特别是在南方，高产稳产稻田面积急剧下降，最近10年粮食播种面积东中部强烈下降，而西南—西北—东北面积扩大增大趋势，但是过去60年的统计证明，这些地区的产量对气候的影响一致十分脆弱，特别是湿润地区季节性干旱突出，气候变化下高生产力地区的生产潜力可能受到严重遏制。例如2010年西南大范围和长时期的持续干旱。因此，我们认为，气候变化下我国未来粮食生产将面临更大的不确定性。

因此，需要探讨气候变化对我国未来粮食生产及食物安全的决定性影响是来自农田生产过程还是来自气候变化下我国农业资源（耕地—水—土壤肥力资

源）有效供应，两者孰重孰轻？如何通过保护和发展优质农业资源供应达到稳定农业生产系统或适应气候变化的对农业生产系统的影响？这些对中国这样气候变化具有明显区域特色，而农业资源分布存在严重区域不平衡的国家是至关重要的。

三、农业减缓气候变化与应对气候变化的关系，能否协同？

在适应和应对气候变化的影响中，我国同样需要面对的问题是农业减排。国家要实现40—45%的单位GDP减排。当前我国耕地农业的排放规模达到每年每公顷达到0.67±0.08tCE，较高于欧美国家，特别是肥料的碳排放，上个世纪90年代末以来是美国的2倍多。我国农业减排任重道远。因此，我们必须面临的挑战是：能否在减排中实现适应和应对气候变化？或者说农业减排是否会削弱或遏制适应和应对气候变化的影响？如何在生产系统实现减排，能否创新我们的农业减排技术和低碳农业系统，达到在适应和应对气候变化上减排？反之亦然。

首先，农业生产系统的减排，其最大潜力来自肥料的合理使用与减少单位产量的肥料投入。粮食生产中肥料碳排放成本不断加大，上个世纪90年代末以来近50TgC/yr，减排具有巨大空间。根据我们的研究，农业生产碳足迹中肥料占绝大部分：英国和中国氮肥碳成本分别占75%和66%；中国施肥碳成本：旱地，75—80%；稻田，约50%，通过养分定量配施或者配方施肥而减少施肥量减肥，可能是减排和适应气候变化达到和谐的重要方面。2005年我国氮肥施用量3000万吨，减1000万吨，按照我国化肥生产的能耗，约减排60TgCE/yr。在这个方面，减肥与减排节本不谋而合，农业生产技术与减排技术的可能达到真

实和谐。

在面对气候变化挑战中，农业科学面临的问题：如何实现低碳适应和低碳应对？农业与工业的不同是，生产过程的控制并不只是工艺的函数，生产过程的减排技术是否会影响生产的结果是需要认真研究的问题，我们对农业减排技术的野外试验进行了初步的分析，大约有60%的减排技术没有实现产量的提高，有30%的技术可能引起减产。因此，在农业上需要的是增产减排或至少是稳产减排技术，因此，如何减排和增产，是发展低碳农业并适应和应对气候变化的重要科学问题。

如何考虑投入减排—过程减排和增产减排等多种途径的减排来建立低碳农业体系是适应和应对气候变化中的至关重要的应用基础科学问题。

四、农业减缓与应对气候变化，农村经济发展/农民民生改善与农业经营现代化

无论是农业减排还是适应和应对，农业问题牵涉乡村地区的民生问题和乡村经济发展的问题，同时也可能农村产业化和经济系统的运行机制。一个突出的问题，中国农户经营机制在减排和适应上都是脆弱的，我们的研究估计，改变经营机制，散户改规模，可以实现农业减排潜力的30—40%。因此，适应和应对气候变化，可能不仅仅是科学技术的问题，经济政策与鼓励，碳补偿与津贴，优化运行和管理机制，都是在世界上影响农业适应和减排的外部机制和动力问题。只有解决这些问题，使适应农村和农民的吁求，农业减排和适应气候变化才能为乡村带来发展的动力和民生的福祉。在这方面，社会科学/经济科学和农业科学的多学科结合的实际研究，特别是案例研究，才是农业—气候变化研究真正解决问题的契机。^[科]

气候变化与农业产业、农村发展及农民民生

马世铭 林而达 马姗姗

一、气候变化与农业产业

气候变化已经对中国农业产生了重大影响。温度升高将使中高纬度地区热量资源增加,农作物生长季延长,农业种植界线向北移动,而气候变化给我国农业生产布局和结构带来的影响,今后还将进一步增加农业的生产成本(林而达,2001)。

自20世纪80年代以来,中国的春季物候期提前了2—4天。由于秋季增温,冬小麦播种期20世纪90年代比20世纪80年代推迟了4—8天。由于春季温带升高,冬小麦春季提前返青,营养生长期提前4—7天,生殖生长期提前5天左右,全生育期缩短了6—9天。 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 负积温逐渐减少,冬小麦越冬死亡率大大降低,弱冬性甚至春性品种面积扩大,但冬季和春季冻害风险增加。变暖已导致我国华北地区一直以来广泛种植的强冬性冬小麦品种,因冬季无法经历足够的寒冷期以满足春化作用对低温的要求,不得不被半冬性、甚至弱春性小麦品种所取代。此外,温度的升高使我国大部分地区冬小麦生育期和越冬期缩短,提前进入拔节期和成熟期,因此,常常会受到倒春寒的侵袭,从而严重影响小麦产量。

由于冬暖,我国冬小麦种植的北界出现了北移西扩(云雅茹等,2007)。

辽宁省东部平均向北移动120km,西部平均向北移动80km;河北省平均向北移动50km;山西省平均向北移动40km;陕西省东部变化较小,西部平均向北移动47km;内蒙古、宁夏一线平均向北移动200km;甘肃西扩20km;青海西扩120km(杨晓光等,2010)。

近年来东北地区水稻面积扩大与气候变暖有直接关系。初步估计,黑龙江省水稻总产增产量中有大约29—57%的份额是由于气候变暖及其适应行为产生的(王媛等,2004),一般情况下,气候变暖对黑龙江省水稻提高产量潜力会产生有利影响(矫江等,2008)。

国家“十一五”科技支撑计划课题“气候变化影响与适应的关键技术研究”(2007BAC03A02)及国家自然科学基金(NSFC)—国际应用系统分析研究所(IIASA)重大国际合作项目“全球气候变化和高强度人类活动影响的中国农业生态系统承载力研究”资助。

双季稻三熟制是以双季稻为基础和一季旱作物(包含冬绿肥)的一年三熟制。世界上主要分布在北纬 20° — 32° 雨热同季的东南亚稻区。中国长江以南的亚热带,正好处在这一地区的中心地带,是双季稻三熟制的主要分布地区。近年来由于气候变暖,积温增加,如果仅考虑气候要素的影响,使双季稻的适种范围发生了变化。浙江省境内平均向

北移动47km;安徽省境内平均向北移动34km;湖北省和湖南省境内平均向北移动60km(杨晓光等,2010)。

气候变化,尤其是极端气候条件对粮食生产的冲击强度在加大。据1990—2006年数据统计,近17年来中国大陆每年因气象灾害造成的直接经济损失达1859亿元,占GDP的比例平均为2.8%(中国网,2008)。特别是近年来在全球气候变暖的背景下,超强台风、高温、特大干旱、雷电、局地强对流以及强降雨等极端天气气候事件发生的频率和强度呈增加趋势。其中影响最大的是旱灾,其次是洪涝和风雹灾害。极端气候是造成我国农业大幅度减产和粮食产量波动的重要因素,对畜牧业生产会产生更加严重的损失。我国牧区在一般年份牲畜死亡率在5%左右,但在极端气候条件下如寒潮、暴风雪、急剧降温等灾害年份的死亡率可高达24%。

冬暖造成中国主要农作物病虫害基数增加、越冬死亡率降低、次年病虫害发生加重;冬暖造成中国大部分地区病虫害发生期提前、为害期延长、为害程度加重;气候变暖使农作物病虫害的发生界限、越冬北界北移;气候变暖使农作物病虫害繁殖代数增加;气候变化对作物害虫迁飞也产生影响(叶彩玲等,2001)。

水稻生长期间,平均夜间最低温度

每升高1摄氏度，水稻产量就下降10%（Peng et al., 2004）。夜间增温可以显著缩短作物前期生育期，使稻麦始穗期分别提早2.5天和11.5天；夜间增温也使小麦成熟平均提早9.5天；夜间增温使水稻平均减产4.51%，但小麦增产18.30%（张彬等，2010）。

温度增高将促进作物的生长发育，提早成熟，从而影响作物籽粒灌浆和饱满，造成作物籽粒物理成分和化学组分发生改变，降低作物营养物质含量和品质。大气中浓度升高会提高碳水化合物转化效率，作物产量将增加30%左右。而浓度升高产生的正效应只有在光照、水分、营养状况等条件满足时才能体现，C3作物产量将因此约提高20%左右，C4作物可提高0—10%。从总生物量来说，大豆的增长率最高为87.4%，棉花和冬小麦次之，分别为48.0%和37.4%，谷子最小为6.1%。从产量来说，CO₂浓度增加，大豆增加最多，增长率为67.1%，冬小麦和棉花增长率为相近，为27—28%，玉米、春小麦和谷子增长率为相近，为20—23%（王春乙，2004）。

未来气候变化对中国农牧业的影响主要表现在：一是农业生产的不稳定性增加，如果不采取适应性措施，小麦、水稻和玉米三大作物均以减产为主。二是农业生产布局和结构将出现变动，种植制度和作物品种将发生改变。三是农业生产条件发生变化，农业成本和投资需求将大幅度增加。四是潜在荒漠化趋势增大，草原面积减少。气候变暖后，草原区干旱出现的几率增大，持续时间加长，土壤肥力进一步降低，初级生产力下降。五是气候变暖对畜牧业也将产生一定的影响，某些家畜疾病的发病率可能提高（气候变化国家评估报告，2007）。

气候变化对中国种植制度的影响

将使一年二熟、一年三熟的种植北界有所北移，主要农作物的种植范围、产量、质量都会有所变化，因而影响粮食作物等的作物布局与结构。气候变化也带来一些不利影响，作物病虫害增多，投入增加；有的作物品质下降，含水量增加，特别对喜凉作物带来较大冲击，进而将对农业产业结构调整、农业产业化、农业生产方式等产生影响。

二、气候变化与农村发展

中国农村的发展离不开我国正面临的发展经济、消除贫困和减缓温室气体排放的多重压力背景。应对气候变化的形势严峻、任务繁重。农村发展也应从提高农业自身应对全球气候变化能力、降低农业温室气体排放、增加农业温室气体碳汇、提高农产品产量及农业效益等问题入手，采取调整农业结构、加强农业产业化进程；进一步加强对农业的投入、加强农村环境建设和农业基础设施建设，推广和普及农业可持续发展模式，以增强农业应对自然风险和市场风险挑战的能力；提高中国农民的科技文化水平和素质，让他们更自觉地应用科学技术应对挑战和负面影响；建立农业社会化服务体系，多元化地对农业进行帮助和支持，促进农村更多的社会公益事业的发展，提高农村与农业的综合生产能力；建立起一套完整的低碳农业生态补偿技术体系，为我国在全球气候变化背景下的农业政策制定和行动提供科学决策依据。

农村的可持续发展成为应对气候变化的主要方面。其中，农村环境建设是农村发展的重要方面，也是一项长期的任务，目前仍存在诸多问题，如：农药、化肥、农膜过度使用导致的农业面源污染；部分农机高能耗、高排放；焚烧秸秆、污染大气；畜禽粪便等畜牧业废弃物处理等。要彻底解决这些问题，

需要推广低碳农业技术，包括：减少化肥、农药、农膜的使用，用农家肥替代化肥，用生物防治替代化学农药，使用可降解农膜，开展平衡施肥等；还要推广保护性耕作、节水灌溉技术，改造落后的机电排灌设施，提高水资源和能源利用率；提高农业废弃物、农产品加工废弃物循环利用比例。构建区域产业循环模式，用低能耗、低污染、低排放、高效益的农业经济模式取代高能耗、高污染、高排放、低效益的农业经济模式，是实现整个农业生产系统低碳发展目标的基本途径之一。

不断改进气候变化可能导致灾难的规模和速度的评估，加强对社区防灾减灾培训的支持。开发区域气候变化监测系统应进行灾难的早期预警。各部门和地方政府都应落实中央要求，在设计发展战略和行动计划时引入适应气候变化的内容。

资金和技术是支撑农村应对气候变化的两个支柱。政府应向所有的农村人口提供补贴、保险和信用以达到农村应对气候变化的目标，尤其是在生态脆弱地区和农民人口多的地区。土地利用温室气体减排项目能够通过市场和交易形成减排，这类项目将能达到减少空气中二氧化碳和增加农民和土地管理者收入的双赢效果，应予以积极探索和鼓励。

建议政府在各个层面提供咨询服务，以保证农民获得低成本的节能技术和低碳耕作的信息。推广再造林、减少耕作、改善草场管理、改良饲料和动物种类、以及测土施肥等碳汇和碳减排操作技术。

调整农业生产结构和居民农产品消费结构。在保证粮食自给的前提下，对资源利用效率比较低的农产品，如大豆、玉米实行部分进口，减少对国内资源和环境的可能压力。要把适应气候变化纳入各级发展规划，改善地方救灾

规划工作。将生物多样性分布与不同气候变化模式匹配起来，制定国家保护战略，加强生物多样性信息的国家和国际基因库建设。

推广和普及农业可持续发展模式、饲养方式和养殖技术，提高农业可持续发展的能力和水平，减少气候变化造成的农业损失；应进一步加强对农业的投入，加强农业基础设施建设，增强农业应对自然风险和市场风险挑战的能力；提高中国农民的科技文化水平和素质，让他们更自觉地应用科学技术应对挑战和负面影响；应制定更多支持农业、保护农业的政策。建立农业社会化服务体系，多元化地对农业进行帮助和支持，比如提供优良的品种，优质的农业机械和装备，对农民进行更好的培训，促进农村更多的社会公益事业的发展，提高中国农业的综合生产能力。总之，从提高农业自身应对全球气候变化能力、降低农业温室气体排放、增加农业温室气体碳汇、提高农业效益及农产品产量等问题入手，建立起一套完整的低碳农业生态补偿技术体系，不断提高适应气候变化能力。

统筹考虑经济发展和生态建设、推进能源节约，优化能源结构；加强生态建设和保护，推进科技进步，加快建设资源节约型、环境友好型社会；努力控制和减缓温室气体排放，提高适应气候变化能力都是农村发展的努力方向。

三、气候变化与农民民生

我国现阶段的民生问题，其内涵是指各级政府有责任解决的与广大人民群众生存与发展直接相关的基本的问题。各级政府应当是解决民生问题的主体，有责任保障广大人民群众的基本生存和生活状态以及基本的发展机会、基本的发展能力、基本的权益等。在孙中山先生的理想中，民生主义是国事由国民

直接参与，国家福利由国民全体享受的一种制度，最终进入幼有所教、老有所养、分业操作、各得其所的理想社会。

民生就是民众的生计，具体地说，就是社会全体成员的衣食住行用和生老病死。在当下的中国，民生问题是一个热点问题、焦点问题和难点问题。目前，我国改革发展进入了一个关键时期，就业、社会保障、收入分配、医疗卫生、教育、住房、安全生产、社会治安等关系群众切身利益的问题比较突出。

民生的主要内容包括：一是保障生存权，使广大人民群众享有最基本的生活资料并随着社会发展不断有所提高；二是保障最基本的受教育权，为未成年人提供免费的义务教育；三是保障劳动权，为适龄劳动人群提供就业岗位，以解决其基本的“生计来源”问题；四是保障最基本的健康权，为人民群众提供基础性的公共卫生环境和条件；五是提供基础性的住房保障，对城市中低收入家庭居住条件的改善提供帮助；六是提供基础的出行条件，使广大人民群众用得上、用得起普通的交通工具。

保障和改善农民的民生是改善全国民生的基础。党的十七大提出改善民生的六大任务，即优先发展教育、扩大就业、增加城乡居民收入、建立覆盖城乡居民的社会保障体系、建立基本医疗卫生制度和完善社会管理（中共中央，2006）。这为改善民生指明了方向。

气候变化对农民民生的影响更多地是对贫困地区农民民生的影响。贫困地区与生态脆弱区高度重合，由于生态脆弱区对气候因素的高度敏感性，气候变化对生态脆弱区的影响更大（许吟隆等，2009）。贫困地区最容易受到气候变化的威胁，因为它们的农业和生活更依赖于自然降水，对水资源变化的适应能力更脆弱，适应气候变化的财政、技术和制度的能力也较弱。因此，气候

变化将对扶贫工作带来更大的挑战。气候变化将直接或间接影响贫困。直接的影响是指极端气候事件对农业、人民的生命财产、生计、基础设施等造成的损失，间接影响来自于对经济增长的影响。应该将贫困人口的民生放在应对气候变化的首要位置。

中国生态脆弱区气候变化的特点：冰川退缩，干旱加剧；森林植被萎缩，水土流失加剧；极端气候事件频发，灾害加重。因此，贫困地区从自然条件来说对气候变化非常敏感，极端气候事件旱涝灾害和自然灾害发生频率高，影响更大。气候变化对贫困地区的各个领域和生活、生计的各个方面产生了严重影响。我国的贫困地区与生态与环境脆弱地带具有高度的相关性，而生态脆弱地带因处于不同生态区的边缘交替地带，生态系统的稳定性差，各要素的相互作用强烈，抗干扰能力弱，对人类活动的承受力低下，人们不合理开发利用更容易造成生态与环境的恶化。如北部的干湿交替带和沙漠边缘带，土地开发利用的不合理容易造成荒漠化；在南方的生态脆弱的山区，植被森林被破坏后极易形成水土流失和洪涝灾害。国内研究表明，贫困与脆弱的生态与环境具有一定的相关性。李周（1997）的研究结果显示，在生态敏感地带的人口中，74%生活在贫困县内，约占总人口81%。刘燕华和李秀彬（2001）也认为，我国贫困地区的分布与生态与环境脆弱区具有较高的地理空间分布上的一致性——地理耦合。这些区域将受到气候变化的影响更大。

气候变化进一步加剧了贫困地区生态环境的恶化和自然资源的可利用，从而加剧了地方农业生产和农村经济的不稳定性。贫困的农民难以脱贫，脱贫的农民可能随时返贫。贫困地区和贫困人口是气候变化和极端天气事件的弱势群体。所以应对气候变化与扶贫建设密切

结合，相互促进。

根据国务院扶贫办农村贫困线划分标准，家庭人均纯收入低于785元的属于绝对贫困人口；家庭人均纯收入在786—1067元的属于低收入贫困人口；2008年年底，我国宣布上调扶贫标准，

把绝对贫困标准与低收入标准合二为一，取消将农村绝对贫困人口和低收入人口区别对待的政策。开始实施的人均纯收入1196元的新扶贫标准，是在2007年1067元低收入标准的基础上，根据2008年度物价指数做出的最新调整。据

国家统计局统计，2008年在这个标准以下的扶贫对象为4007万人，比2007年绝对贫困标准以下的1479万人增加了2528万人。这部分人群应该是也应对气候变化的重点人群，解决贫困地区及贫困人口的生计应该是解决农民民生的重点。^[4]

现代气候变化及其对我国粮食生产的可能影响

任国玉

粮食生产与气候条件密切相关。自然和人为因素导致的区域气候变化，可以引起粮食生产基本环境条件的改变，影响作物生长发育，并进而影响粮食产量和质量。

一、气候要素均值变化

近年的研究指出，1951年以来中国地区近地面气候要素发生了一定趋势性变化，其中与地面气温相关的气候要素和相关气候指数变化比较明显。在过去的60余年，全国年平均地面气温增加幅度约为 1.3°C ，增温速率接近 $0.25^{\circ}\text{C}/10$ 年，比全球或半球同期平均增温速率明显偏高。地面气温增加主要发生在最近的20多年，其时间和空间特征主要表现为：冬季和春季变暖明显，夏季和秋季变暖微弱，但青藏高原变暖最明显的季节是冬季和秋季，春季和夏季变暖较弱，大部分地区地面气温年较差明显变小；夜晚变暖明显，白昼变暖很弱，绝大多数地区气温日较差显著减小；北方和青藏高原地区变暖更突出，南方特别是西

南地区的春季和长江中下游的夏季没有经历变暖，多数台站甚至记录到变凉趋势。

研究还发现，城市化过程对我国气象台站观测的地面气温变化具有重要影响，全国平均来看，大约有接近三分之一的年平均地面气温上升是由于城市化因素引起的，其对夜间气温和平均最低气温以及气温日较差的影响更加明显。从评价气候变化对农业生产影响的角度看，城市化对地面气温观测记录的影响需要作为系统偏差予以订正。

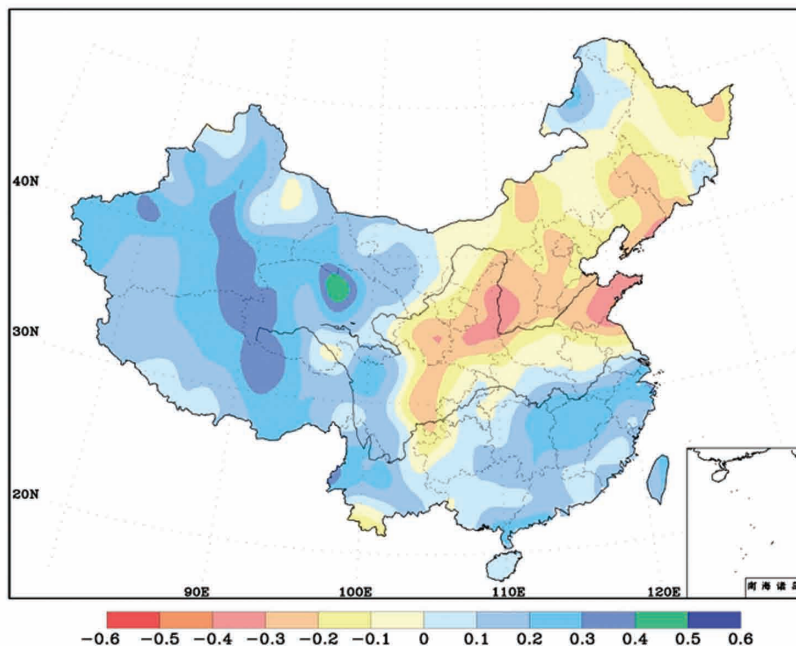


图1 1956—2002年中国年降水量变化趋势系数。橘黄和黄色指示降水减少，蓝色指示降水增多。

过去60年左右中国地区年降水量没有出现明显的趋势性变化。1951年以来,全国平均降水量变化趋势不明显,但1956年以来略有增多。年和夏季降水量变化的空间特征明显而且相对稳定,东北北部、长江中下游地区、东南地区和西部广大地区年降水量有比较明显的增加,而华北地区、东北南部、西北东部和西南部分地区降水量明显减少(图1),其中1999–2003年华北和东北地区降水量连续极端偏少,创60年最低记录。记入新世纪以来,我国东部降水异常分布图式发生了变化,主要表现为长江中下游地区初夏梅雨偏少,年降水量也偏低,淮河流域夏季降水增加,东部夏季雨带已经明显向北移动。

近60年来全国平均的日照时数(太阳辐射)、平均风速、水面蒸发量等气候要素均呈显著下降趋势,积雪地带的最大积雪深度有所增加。全国日照时间(太阳辐射)和水面蒸发量变化的空间分布特征很相似,减少最明显的地区均发生在华北和华东,新疆次之。

二、极端气候事件变化

全国范围来看,过去半个多世纪主要类型极端气候事件发生频率有增有减。极端气温出现了空间上比较一致的变化,异常偏冷事件,包括寒潮、春夏季低温、春秋霜冻等事件频率明显减少、强度减弱,而异常偏暖事件有所增多和增强,但没有异常偏冷事件变化显著;暴雨或强降水事件频率变化具有明显的区域性,并与年降水量变化的区域特点基本一致,但全国多数地区强降水事件强度似有一定增加趋势;气象干旱事件影响范围有一定程度增加,北方地区尤其显著;登陆和影响中国东南沿海地区的热带气旋(台风)频数呈现一定减少趋势,但趋势性不明显;北方地区的沙尘暴事件、全国平均的强风事件和东部季风区的雷暴事件发生频率趋于减少、减弱。

因此,现有的研究指出:在全球气候明显变暖的半个多世纪内,全国总体上看多数类型极端气候事件频率和强度出现减少和减弱的趋势,或者在趋势性上保持相对稳定态势,只有少数类型极端气候事件频率和强度表现出增加或增强趋势。从全国范围来看,对社会和经济具有重要影响的主要类型极端气候事件没有表现出总体增多或增强的趋势变化。

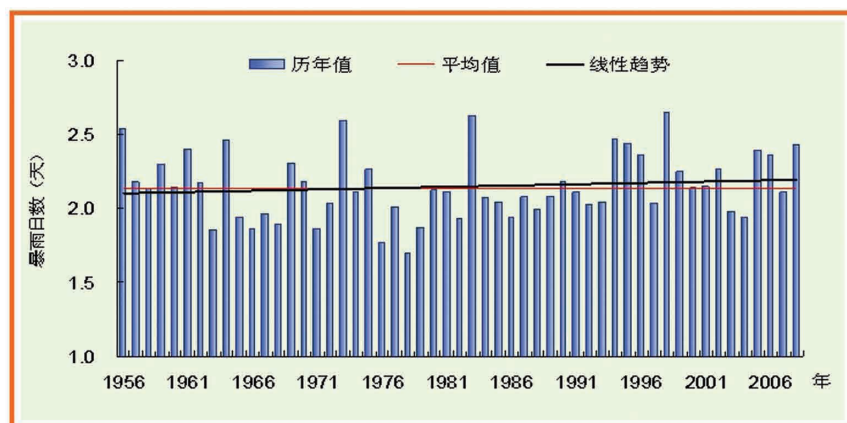


图2 1961–2008年全国平均暴雨日(24小时降水量大于等于50mm)数变化情况。

三、气候变化可能原因

过去60年左右中国地区气候变化的原因还没有研究清楚。消除城市化对地面观测记录的影响,保留的全国平均增暖分量可能主要与人为因素(温室气体排放)导致的全球气候变暖和年代以上尺度气候系统自然变异性有关,但人为因素引起的区域性土地利用变化和大气中气溶胶浓度增加可能也有一定影响。

中国东部表现为年代尺度振荡的降水量和极端降水事件频率变化,很可能是东亚季风气候系统内部自然变异过程的结果。造成东亚季风气候系统年代以上尺度自然变异性的主要因子是海洋环流和海表水温。

中国东部大部分地区日照时间(太阳辐射)和水面蒸发量减少可能主要起源于人为排放的气溶胶影响,南方一些地区云量增加加剧了光照和蒸发的下降趋势,同时近地面平均风速减弱也是水面蒸发量下降的重要气象影响因子;西部地区云量和降水量的变化可能是水面蒸发量减少的主要原因。大范围地面平均风速减弱现象可能主要与局地气象观测环境变化以及全球气候变暖的地带性差异及其大气环流变化有关。

四、气候变化对粮食生产影响

与上述观测到的平均和极端气候变化相对应,我国的农业气候资源条件和农业气象灾害发生频率也发生了一定变化。例如,全国多数地区反映热量资源条件的生长期和积温呈不同程度增加;全国多数地区、特别是北方农业区气温年较差和日较差趋于变小,可能有利于病虫害的发生,不利于粮食品质提高;冬季积雪地带春季融雪提早,春汛可能提前,有可能在仲夏雨季来临之前形成相对干旱时期,不利于作物生长;我国西部特

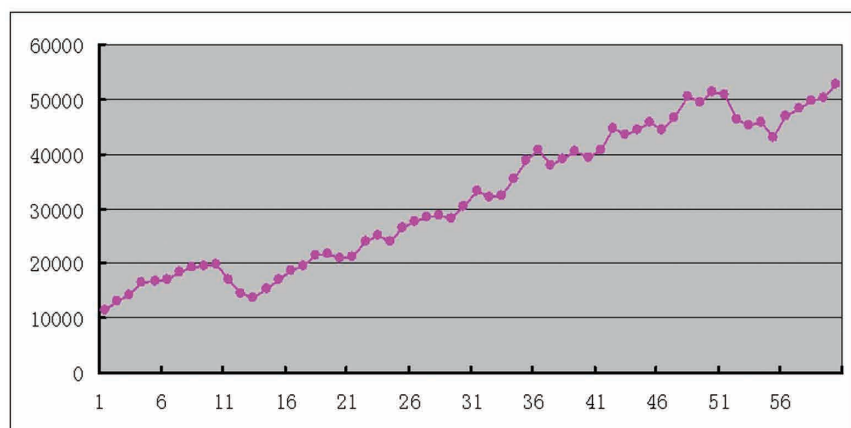


图3 1949—2008年全国粮食总产量(万吨)。图中横坐标1对应1949年,60对应2008年。1999—2003年期间的总产下降可能与北方粮食产区严重干旱有关。

别是西北地区降水量有所增加,山地冰川融水也有一定增多,在一定时期内可能有助于山麓地带绿洲农业生产;东部地区特别是华东和华北地区光照条件趋于恶化,太阳直接辐射和总辐射明显下降,而散射辐射一般有所增多,可能不利于作物生长发育。

从农业气象灾害的角度看,中国大部分农业区、包括东北平原的农业区,过去60余年作物生长期的低温冷害现象减轻了,有利于多数地区农作物生长;由于大气降水减少,华北和东北地区土壤含水量一般降低、干旱现象加重,而南方及淮河流域降水和强降水事件频率一般增多,洪涝灾害变得更频繁,总体不利于农业生产。1999—2003年期间,华北和东北大部分地区经历了1950年以来最严重的多年干旱,可能是造成北方和全国粮食减产的重要原因(图3);西北、华北和东北农业

区春季的风灾和风沙危害有所减轻,东南沿海地区登陆的台风个数减少,对于这些地区作物生长应该是有利的。

因此,不考虑大气中 CO_2 浓度上升对作物生长的作用,现代气候变化可能已经对我国各地区农业特别是粮食生产造成了一定影响,但这种影响具有明显的区域性和复杂性,今后需要结合各种统计和数值模拟技术进行深入研究。

五、结语

过去的近60余年,我国地面气候确实发生了一些变化,其中气温、热量以及光照资源的变化具有较明显的趋势性,而降水量及其相关的极端气候事件频率仅表现出年代或年代代变异性。农业气候资源和气候灾害频率的变化显然已对粮食生产造成了影响,但定量评价这种影响的性质和程度还十分困难,今后需要加强气候变化对粮食产量影响的检测研究。^[4]

气候变化对农田生态系统碳氮过程的影响

邹建文 熊正琴

气候变化包含地球历史上发生的各种或冷或热的变化,但目前所讨论的气候变化主要是指自18世纪工业革命以来,人类大量排放二氧化碳等气体所造成的全球变暖现象。全球变暖问题是指大气成分发生变化导致温室效应加剧,使地球平均气温异常升高并由此引发的一系列环境、经济等问题。大气温室气

体浓度增加与陆地生态系统碳氮等元素生物地球化学循环过程紧密关联。农田生态系统是人为干预下的生态系统,是以大量物质能量投入的集约化生产为特征,每年从生态系统内移出收获物,同时施入有机肥和化学肥料,因此具有额外的碳氮循环途径和通量,其受气候变化的强烈影响。本文旨在总结有关气候

变化对农田碳氮循环影响研究的已有认识,并在此基础上提出我国进一步开展气候变化对农田生态系统过程影响研究的几点建议。

一、农田生态系统碳氮过程

作物经过光合作用吸收大气中

CO₂成为初级总生产力(GPP), 其中一部分通过作物暗呼吸作用(R_A)和挥发性有机碳(VOC)损失成为初级净生产力(NPP)。土壤有机质降解形成的土壤异养呼吸进一步损失NPP中的部分C, 在土壤-作物生态系统尺度上, 这就是生态系统净交换(NEE)。一部分可溶性C随着水分运移而损失即DIC和DOC, 从而形成生态系统净生产力(NEP)。由于作物收获H、焚烧F等管理措施从农田生态系统带走大量C, 同时部分秸秆还田等有机肥M施用带入C, 最终形成生物群落净生产力NBP, 在长期时间尺度上就表现为土壤有机碳SOC的改变量。N循环与C循环相偶联, 多了从土壤中吸收N这个途径。除了豆科作物和共生固氮作物可以部分吸收利用大气N₂外, 其余作物还包括外源化学N肥和有机N肥的投入。

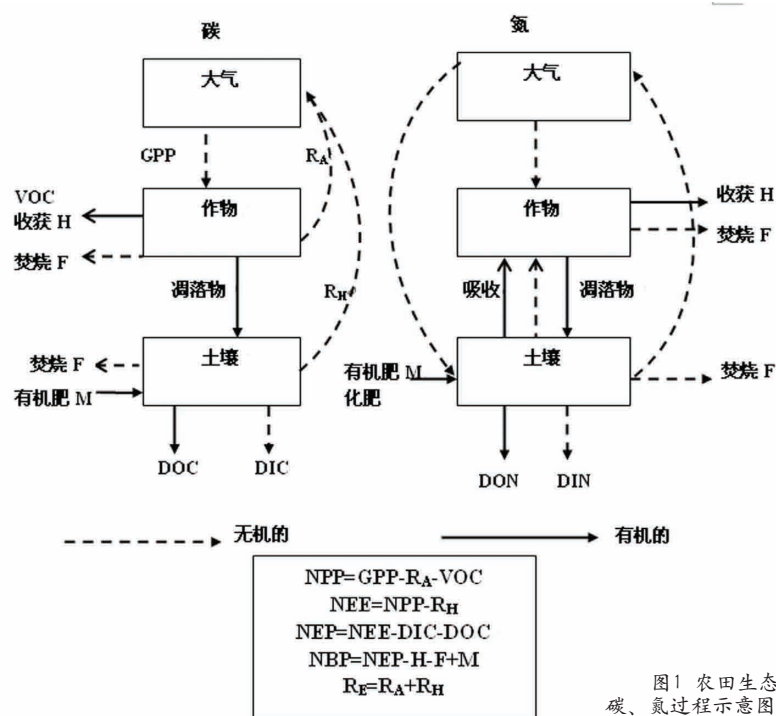


图1 农田生态系统碳、氮过程示意图

二、几点认识

1、气候变化对农田生态系统过程的影响具有明显的时间效应

一般认为气候变化导致土壤有机碳输入和土壤呼吸都会有所增加, 两者引起土壤有机碳库的变化。因此, 土壤有机碳库的变化取决于两者的相对强弱, 当土壤碳输入量的增加超过土壤呼吸时, 土壤有机碳库增加。土壤有机质积累与降解之间需要几十年甚至更长的时间达到新的平衡状态, 因此只有通过长期田间试验才能验证[CO₂]升高下土壤有机质是否真实积累。生态系统中C、N库大小是逐步改变的, 包含重要的时间要素。在[CO₂]升高下即使光合作用不变, 生态系统C积累速率也会随着呼吸作用的逐渐加快而逐渐减少。呼吸作用通常与C库大小成比例: 微生物和根毛等C库周转速率快, 且库小, 短时间就可达到新的平衡; 木质素和土壤中老腐殖质等生命周期长的库, 库通常很大且变化缓慢, 需要几十年到几千年不等的积累C、N来达到新的平衡, CO₂短期试验很难发生统计上显著的改变。因此, 库的大小和生命周期的长短对土壤碳库和养分有效性的动态过程起着决定作用。

关于气候变化下自然生态系统净碳汇效应, 很多研究观察到不同的甚至相反的研究结果。绝大多数报道认为, [CO₂]升高碳固定增加, 但是温度升高导致土壤呼吸加快, 有机质矿化增加, 二者相互抵消, 净碳汇效应不显著。有许多研究表明, [CO₂]升高直接促进植物光合作用, 光合产物的20–50%便通过根系分泌与凋落物输入土壤, 根际沉淀及植物残体增加引起土壤SOM库增加。de Graaff 等总结[CO₂]增加试验表明, [CO₂]升高下, 微生物生物量C和土壤呼吸分别增加了7.1%和17.7%, 但是同时植物地上部和地下部生物量分别增加了21.5%和28.3%, 因此由于C输入增加引起土壤C含量仍以每年1.2%的速率增加。据Langley等普遍认为, [CO₂]增加对土壤碳库表现出初始激发效应, 由于微生物活性增加加速SOM分解, 土壤碳减少。Xie等和Niklaus等表明, 长期[CO₂]升高下土壤碳库通常没有明显改变。关于农田生态系统净碳汇效应研究极少, 尤其是长期田间试验, 缺乏气候变化各因子综合作用下的研究报道。

普遍认为, [CO₂]升高影响土壤生态系统氮循环, 在[CO₂]升高长期试验条件下土壤氮素有效性逐年降低。[CO₂]促进植物吸收氮素的作用随着时间的推移而下降, 土壤氮固持作用最初增加继而下降。在[CO₂]升高下, 生态系统会发生一系列短期和长期机制来阻止或减缓土壤养分限制性现象。短期机制包括N在各库之间的再分配, 在植物组织和土壤有机质中增加C:N比, 增加根毛和菌根对土壤N的攫取。长期机制包括增加N生物固定、减少N淋失和土壤中气态N损失, 增加对大气沉降N吸收, 从而影响N供给总量。土壤氮素有效性的长期动态可能被短期过程所掩盖, 例如改变N生产效率, 或N从C:N比低的土壤有机质库转移到C:N高的木材生物质库。[CO₂]增加

下N在不同C:N比库间重新分配就可增加生态系统中单位N的C固定量。因此需要长期试验来证明生态系统碳氮过程的土壤养分限制性是否发生。

2、气候变化加速农田土壤养分周转, 改变碳氮组分

土壤呼吸作用强度反映土壤有机质分解及土壤养分有效性。已有研究表明, 土壤生物大部分都是异养型, 依赖于植物源有机碳的输入, $[CO_2]$ 升高增加土壤中有机碳的输入, 为土壤微生物提供更多的可降解底物, 促进微生物活性, 因而土壤呼吸作用增强。据Zak等报道, 微生物呼吸强度对于禾草状、草本和木本植物土壤分别增加34%、34%和20%。据Pendall等等报道, 在春小麦旺盛生长期, FACE处理下土壤呼吸增加了40–70%; 通过稳定性同位素法进一步鉴定在作物生长前, 土壤呼吸100%来自原有有机质分解, 而在作物旺盛生长期只占35–40%。

土壤呼吸作用强弱不仅取决于向地下的C输入, 还受到土壤N有效性的影响。大气 $[CO_2]$ 升高可以加速地上植被对氮的吸收, 同时也增加微生物可利用碳量, 导致土壤可利用氮含量降低, 从而增强了土壤氮素对微生物的限制性, 降低微生物呼吸作用。而土壤C、N供应充足, 土壤呼吸作用会增强、N矿化速率增加。因此, 提高大气 $[CO_2]$ 可以改变植物与土壤微生物间的交互作用, 可以通过提高植物对氮的吸收来限制土壤微生物的分解作用。土壤呼吸作用强度可以作为土壤微生物总的活性指标。 $[CO_2]$ 升高对土壤中微生物群体结构的影响是多方面的, 短期效应由于植物凋落物和根际沉淀增加了土壤微生物底物供应可能表现为促进作用, 但长期效应由于土壤养分亏缺会表现为抑制效应。

生态系统增温对于农田生态系统过程的影响研究十分有限。模型研究表

明, 增温对生态系统过程影响的时空变异性将显著高于 $[CO_2]$ 增加。已有研究表明, 土壤呼吸随着温度的增加而增加, 但其它生态过程比如甲烷产生率、甲烷氧化率、氮转化率、氮损失率、净碳通量、植物生产力等对温度升高的响应还没有明确结论。Rustad等综合了全球变化和陆地生态系统系统增温研究网络(GCTE-NEWS) 2–9年内的生态系统增温试验(0.3–0.6°C), 发现土壤呼吸增加20%, 净N矿化速率增加46%, 植物净初级生产力增加19%。Bond–Lamberty和Thomson总结表明, 自然生态系统土壤呼吸在1989–2008间以每年0.1%的速度递增, 温度升高引起了明显的正反馈效应, 但尚不能区分土壤呼吸的增加是来自植物根系呼吸还是土壤原有有机质分解。

不同组分土壤有机质之间周转周期差异很大, 因此在土壤中的稳定性和生命周期差异显著。在大气 $[CO_2]$ 升高下, 植物组织的化学组成和物理结构发生改变, 植被凋落物质量下降, 含氮量降低, C/N升高, 单宁、木质素类化合物含量增加, 分解速度减缓。de Graaff等总结 $[CO_2]$ 增加试验表明, $[CO_2]$ 升高下, 总N固持作用增加了22%, 而总和净N矿化速率则保持不变, 微生物量N和土壤C:N比分别增加了5.8%和3.8%, 推测 $[CO_2]$ 升高有利于短期土壤碳固定。Feng

等用PLFA方法在分子水平上表明, 在 $[CO_2]$ 升高和氮肥施用共同影响下, 微生物群落组成改变, 施氮后短期效应促进了有机质分解。

3、长时间尺度上 $[CO_2]$ 升高的施肥效应受土壤养分的限制

$[CO_2]$ 升高下土壤–植物系统之间的养分循环是否会改变, 或者将如何改变, 以及这种改变对土壤碳汇的生态服务功能有何指示意义, 对此国际上许多学者进行了研究。如前所述, $[CO_2]$ 升高在短期内促进土壤呼吸, 加快养分周转, 土壤养分有效性提高。但许多试验表明, 生态系统净生产力由于 $[CO_2]$ 升高下土壤氮循环能力下降而下降。在 $[CO_2]$ 试验中火炬松森林冠层光合作用升高40%, NPP增加20–32%, 木质生物量升高4%, 有机质层及地表30厘米矿质土壤碳含量上升24%, 长周期植物生物量和SOM库中碳固定的大量增长使得这些库中氮的吸收和固定增加, 两库氮量比对照多了6.3gN/m², 大于该时间段内氮的大气沉降及生物固定, 导致森林中氮素明显亏缺。 $[CO_2]$ 升高下总N固持作用和植物吸收增加, 但微生物N不变, 说明土壤微生物氮周转速度加快可以补偿总N固持作用对土壤氮素有效性的影响。Niklaus等研究表明, $[CO_2]$ 增加加快土壤氮循环以缓解土壤可利用氮对微生物活动的限制作用。



[CO₂]升高下，土壤C:N比增加，生物固氮效率也逐年降低；在不施肥处理中由于微生物固持作用植物产生了对[CO₂]升高的适应性，只有额外施用养分才能在长时间尺度上发挥土壤碳汇的作用。根据Hartwig和Sadowsky总结报道，在[CO₂]升高下生物固氮作用通常随着植物氮需求的增加而增加，继而受到土壤氮素有效性的限制而减少，具有明显的时间效应，主要与[CO₂]增加下叶中Fe、Mo含量降低有关。综合验证土壤养分限制性需要在大田[CO₂]升高长期试验中反复测定生态系统碳氮供求的动态变化。

4、气候变化和养分管理对农田生态系统过程的影响具有交互作用

对于每年带走大量收获物的农田生态系统，开展养分有效性的研究和管理就更为重要了。如前所述，个别研究报告认为，[CO₂]升高下凋落物分解速度加快，生态系统养分循环加快，土壤养分有效性升高。多数研究者认为[CO₂]升高下碳输入增加主要用于土壤有机质的积累，从而土壤养分有效性降低，施用

外源氮肥则可以抵消养分有效性降低的影响，[CO₂]升高与氮肥施用存在交互作用。[CO₂]升高并供应氮可加速碳循环，若在低氮和高[CO₂]下，土壤碳库周转变慢。Niboyet等研究表明，[CO₂]和氮肥施用对农田氮循环存在明显的交互作用，尤其是土壤硝化潜势，受到[CO₂]和高氮水平的正向交互促进作用，总矿化速率也受到[CO₂]和高氮水平的显著促进作用，但是硝化总量并不受到[CO₂]和氮肥施用的影响。在高氮条件下[CO₂]增加促进植物生长作用更加显著，在氮胁迫时高[CO₂]对植物生长的促进作用消失。de Graaff等总结表明，高氮水平下，[CO₂]增加植物地上部和地下部生物量分别增加了20.1%和33.7%，土壤C含量则增加了2.2%yr⁻¹；但在低氮水平下，[CO₂]增加植物地上部和地下部生物量分别增加了8.8%和14.6%，土壤C含量则没有改变；只在高氮供给条件下，土壤C、N都增加，微生物活性、微生物生物量C和微生物呼吸都增加更多；只有供应其他养分，[CO₂]增加处理中氮的生物

固持作用才增加。

[CO₂]增加下养分状况对作物的影响在生长后期表现更加显著，同时受到土壤水分状况的影响。Kimball等发现在土壤N和水分充足时FACE处理小麦谷物N含量平均降低3%，在土壤水分不足时降低约4%，在土壤低N条件下降低9%。在水分和养分充足下，[CO₂]升高使禾本科C3植物叶片N含量平均减少9%，但土壤含N量低时，叶片N含量平均降低16%，FACE圈内盆栽试验黑麦草地上部分营养生长期N含量减少9%，生殖生长期却减少了近20%。

[CO₂]升高、温度升高、养分管理等对生态系统过程的影响具有显著的交互作用。植物生物量在全球各大洲均随气候变暖而增加，但在水分和营养物质不足时这种响应程度降低。[CO₂]升高后降低植物蒸腾速率，植物气孔开度减小，水分利用效率提高，土壤湿度增加，尤其是当生态系统处于季节性干燥环境中时。在水分胁迫条件下FACE圈内禾本科C4植物高粱产量要比对照高约25%，在水分充足条件下产量反而略有降低。温度、水分和[CO₂]各因素之间对植物生长发育的影响具有复杂的交互作用。

绝大多数报道认为，[CO₂]升高碳固定增加，但是温度升高导致土壤呼吸加快，二者相互抵消，因此净碳汇效应不显著。同时植物生长则受到养分有效性的制约，因此碳汇的大小和方向主要取决于土壤养分的有效性。光合作用和微生物固持作用之间具有明显的相互依存关系。总体而言，大气[CO₂]升高下植物光合作用增强。全球变暖下植物光合作用速率加快，植被生物量提高，同时土壤呼吸作用增强。氮肥水平通过改变植物C/N比、改变凋落物分解速率，进而影响土壤呼吸。土壤有机碳库的变化取决于土壤有机质积累与降解之间两者的相对强弱，需要几十年甚至更长的时间



达到新的平衡状态，因此只有通过长期田间试验才能验证气候变化下土壤有机质是否真实积累。

关于未来气候变化升温和 $[\text{CO}_2]$ 升高同时存在下土壤生态系统碳氮过程的研究十分有限。升温和 $[\text{CO}_2]$ 升高同时存在加剧了与之相关的温度和降水地区分布差异，对不同地区的影响甚至完全不同，尤其是对中高纬度地区的影响将更加复杂，气候变化下正确理解区域差异显得十分重要。

5、土壤养分有效性制约着气候变化背景下农田碳汇和生产力功能

$[\text{CO}_2]$ 升高由于植物生物量增加向土壤输入的C增加，从而决定了土壤碳汇作用大小，而植物生长则受到养分有效性的强烈制约。土壤氮素供给对陆地碳汇的调控作用仍然是全球生物地球化学领域中一个非常有争议的话题，这将影响对陆地生态系统生产力、大气 $[\text{CO}_2]$ 和气候变化的反馈调节等的正确认识。Luo等从生态系统学角度提出了用于研究C-N交互作用的基本理论框架即N素限制性(PNL)，可更好地预测土壤N素调控土壤C固定。在此以土壤氮素供给为典型代表来阐述土壤养分有效性的影响，提出养分限制性理论框架。许多试验研究已经观察到，在气候变化条件下N供给限制了生态系统C吸收。 $[\text{CO}_2]$ 升高下，生态系统C流入量增加，通过激发两个关键性过程来调节生态系统的长期N素动态。一是为满足植物生长增加的N需求增加；二是长生命周期植物质和土壤有机质N库增加。后者降低了植物生长所需土壤N的有效性，在PNL机制中起着关键作用。N需求增加导致短期、中期或长期N供给机制改变，由此决定PNL是否最终出现。当生态系统暴露于 $[\text{CO}_2]$ 升高的大气中时，光合作用由于C固定酶有效性加强而增加，生态系统中C流入量增加，用于生产植物质、

贮存土壤有机质以及通过自养呼吸和异养呼吸返回大气的C通量增加，导致长生命周期植物质和土壤C贮存增加，N以有机态形式被固定，植物可吸收利用的有效矿质态N则将日益减少。与常规 CO_2 水平相比较，若没有新的N输入或N损失没有减少，有效矿质态N将随着 CO_2 水平增加而减少。 $[\text{CO}_2]$ 增加后，若可以增加N固定和减少N损失，使得生态系统可以长期获得N，就可以避免PNL出现。

模型研究表明， $[\text{CO}_2]$ 升高下，随着C贮量增加，不管N的初始有效性如何，N有效性总是减少。不是土壤初始N水平，而是N有效性逐渐减少限制了NPP和C贮存的长期响应。总的说来，当 $[\text{CO}_2]$ 升高引起了生命周期长的植物质和土壤有机质积累，大量的C、N固定到长期库中时，氮素限制性就发生了。C、N初始积累增加越大，后继氮素限制性发生可能性越大。如果固定在生命周期长的植物质和土壤有机质中的N被外源N供给所补偿，N就有可能完全不会限制C积累。因此，生态系统中N的不同供给机制及肥料运筹决定着氮素限制性是否出现以及在何种程度上表现。如果氮素限制性发生， $[\text{CO}_2]$ 增加所引起的生态系统C固定量的增加会随着时间的推移而逐渐减少，从而制约着土壤碳汇和农田生产力功能的长期发挥。

三、几点建议

1、加强气候变化多因子对农业综合影响的试验观测研究

在过去的十几年中，我国相继开展了一些田间模拟气候变化对农业影响的观测试验研究，这些研究对于认识气候变化对我国的影响提供了基础数据，但这些模拟试验主要侧重于某一气候变化因子的影响，如FACE平台的 CO_2 浓度升高、红外加热试验的温度升高等。全面认识气候变化对农业的影响，需要综

合考虑气候变化多因子的综合效应，因此，我国在今后的观测试验研究中以下几个方面值得重视：（1）开展多因子的开放式模拟试验，如温度和 CO_2 浓度升高的T-FACE平台试验；（2）影响、减排、应对研究三者的紧密结合，在典型农田生态系统中同步开展气候变化对农业的影响、农业温室气体减排和农业应对气候变化技术等研究；（3）自然驱动过程与人为干预调控研究相结合，在明确气候变化对碳氮过程驱动的主要因子基础上，加强人为干预调控研究，筛选和优化调控技术和调控效果；（4）气候变化的科学问题与应对技术研究相结合。

2、同步开展多尺度数据整合分析和情景预测

国内外大量模型预测分析了气候变化对农业的影响，但这些预测结果存在很大不确定性，甚至一些结果迥异。因此建议加强开展多尺度数据整合分析和情景分析：（1）模型、Meta-分析和情景分析相结合，力求对同一对象做到交叉验证，提高结果科学性和可信度；（2）将气候变化对农业影响的事实分析与未来预测相结合，做到基于过去和现在事实分析，科学预测未来；（3）立足长期变化反应，辨析短期影响。

3、加强气候背景下农田养分管理策略研究

农田土壤肥力（土壤养分有效性）将如何保持？如何有效管理农田土壤养分从而保障农业高产的可持续性和农田碳汇生态服务功能？因此，对农业管理的启示集中体现在施肥运筹管理策略和秸秆还田管理策略。根据气候变化情境下土壤养分的周转动态规律，同时需要分别研究不同作物类型和种类气候变化情景下相应的需肥规律，从而及时合理分配肥料运筹，促进作物干物质积累和产量提高，保障生态系统生产力的可持续性。科