

# 气候变化对农田生态系统碳氮过程的影响及其对生产的启示

熊正琴<sup>1,2</sup>, 邹建文<sup>1,2</sup>, 潘根兴<sup>1,2</sup>

(1.南京农业大学 农业与气候变化研究中心, 南京 210095; 2.南京农业大学 江苏省低碳农业与温室气体减排重点实验室, 南京 210095)

**摘 要:**从农田生态系统过程角度综合分析了气候变化([CO<sub>2</sub>] 增加、温度升高)对土壤碳库、氮供给生物化学过程的综合影响和长期效应。总结指出,[CO<sub>2</sub>]增加、温度升高对农田生态系统过程的影响具有明显的时间效应,短时间尺度上加快农田土壤养分周转,改变碳氮组分,长时间尺度上导致土壤养分有效性降低;[CO<sub>2</sub>] 增加、温度升高和养分管理对农田生态系统过程的影响具有显著的交互作用,土壤养分有效性制约着气候变化对农田生态系统生产力和碳汇功能的影响。因此,气候变化([CO<sub>2</sub>] 增加、温度升高)情景下对农业生产管理包括施肥运筹及秸秆还田策略等的启示在于: 根据气候变化背景下土壤养分的周转规律有效管理农田土壤养分、保持农田土壤肥力,从而保障农业高产的可持续性以及农田碳汇的生态服务功能。

**关键词:**氮素限制性;土壤呼吸;FACE;碳汇;时间效应

**中图分类号:**S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)09-1720-06

## Adaptation of Cropland Ecosystem Carbon and Nitrogen Process to Climate Change and Indication for Agricultural Managements

XIONG Zheng-qin<sup>1,2</sup>, ZOU Jian-wen<sup>1,2</sup>, PAN Gen-xing<sup>1,2</sup>

(1.Research Center for Agriculture & Climate Change, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Low Carbon Agriculture and GHGs Mitigation, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Impacts of climate change on cropland ecosystem carbon and nitrogen process have been comprehensively assessed and reviewed. However, climate change effects with regard to elevated CO<sub>2</sub> and increased temperature and their interactions on long-term scale basis are poorly understood. Results of this research showed clear time scale effects of climate change. On a short time horizon, elevated CO<sub>2</sub> and increased temperature speeded up the turn over of nutrients, changed the composition and ratio of soil carbon and nitrogen. However, on long term scale, elevated CO<sub>2</sub> and increased temperature decreased the nutrients availability, leading to progressive nitrogen limitation. Results also showed substantial interactive effect of elevated CO<sub>2</sub> and increased temperature and nutrient managements on ecosystem carbon and nitrogen cyclings. Significant interactions existed between elevated CO<sub>2</sub> and increased temperature on soil carbon sequestration, leading to insignificant change of soil carbon sequestration. Moreover, the effects of nutrients management on crop ecosystem were depended on elevated CO<sub>2</sub> and increased temperature and their interaction. The availability of soil nutrients limited the productivities of agricultural ecosystem, and consequently soil carbon sequestration. Principally, relatively higher rate of fertilizer, particularly N fertilizer, than usual recommended dose under the current scenario was required for sustainable high crop yield. Additional N could be compensated with straw return under climate change scenario for the purpose of ecosystem functioning of soil carbon sequestration. Therefore, fertilizer management and straw amendment practices should be improved based on the soil nutrients dynamics under elevated CO<sub>2</sub> and increased temperature.

**Keywords:** progressive nitrogen limitation; soil respiration; FACE; carbon sequestration; time scale

收稿日期:2011-03-19

基金项目:公益性行业农业科研专项(200903003);教育部新世纪人才支持计划(NCET-10-0475);国家自然科学基金项目(40971139)

作者简介:熊正琴(1973—),女,重庆涪陵人,教授,主要从事农田碳氮循环与环境效应研究。E-mail:zqxiong@njau.edu.cn

农田生态系统有别于自然生态系统,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,其关键生态系统过程总结如图1所示。生态系统过程就是生物和环境要素之间各种物理的、化学的、生物的反应和联系,主要研究气候因子、管理措施和养分生物地球化学循环之间的交互作用。

作物经过光合作用吸收大气中  $\text{CO}_2$  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,这在土壤-作物生态系统尺度上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  $\text{N}_2$  外,其余作物还包括化学肥料N的投入。

本文从生态系统角度出发,研究农田碳氮物质循环对不同的气候变化因子( $[\text{CO}_2]$  增加、温度升高)和不同管理措施及其交互作用的响应及其响应程度,关

注在长时间尺度上农田生产力的可持续性和农田碳汇生态服务功能。

## 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

### 1.1 气候变化下农田生态系统碳汇效应不显著,具有明显的时间效应

在气候变化下,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,只有通过长期田间试验才能验证 $[\text{CO}_2]$ 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 $[\text{CO}_2]$ 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C库通常很大且变化缓慢,需要几十年到几千年不等的时间积累C、N来达到新的平衡, $\text{CO}_2$ 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。

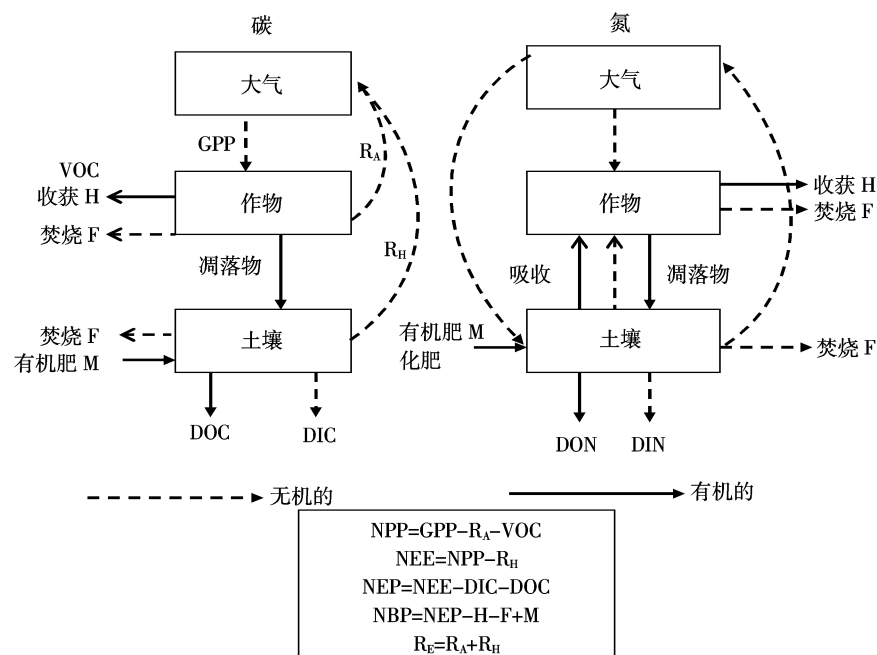


图1 农田生态系统碳、氮过程示意图

Figure 1 Scheme of ecosystem process of carbon and nitrogen cycle in cropland

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结果。绝大多数报道认为, $[\text{CO}_2]$ 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, $[\text{CO}_2]$ 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<sup>[1]</sup>总结 $[\text{CO}_2]$ 增加试验表明, $[\text{CO}_2]$ 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。Langley等<sup>[2]</sup>认为, $[\text{CO}_2]$ 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<sup>[3]</sup>和Niklaus等<sup>[4]</sup>表明,长期 $[\text{CO}_2]$ 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。

## 1.2 气候变化对土壤氮素有效性的影响具有明显的时间效应

普遍认为, $[\text{CO}_2]$ 升高影响土壤生态系统氮循环,在 $[\text{CO}_2]$ 升高长期试验条件下土壤氮素有效性逐年降低。 $[\text{CO}_2]$ 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<sup>[5]</sup>。在 $[\text{CO}_2]$ 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C/N增大,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低的土壤有机质库转移到C/N高的木材生物质库。 $[\text{CO}_2]$ 增加下N在不同C/N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 气候变化促进农田土壤养分周转,改变碳氮组分

### 2.1 $[\text{CO}_2]$ 升高加快土壤呼吸,促进农田土壤养分周转

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<sup>[6]</sup>。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, $[\text{CO}_2]$ 升高增加土壤有机碳的输入,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<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>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 $[\text{CO}_2]$ 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 $[\text{CO}_2]$ 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。 $[\text{CO}_2]$ 升高对土壤中微生物群体结构的影响是多方面的<sup>[9]</sup>,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。

### 2.2 温度升高加快土壤呼吸,促进土壤养分周转

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 $[\text{CO}_2]$ 增加。已有研究表明,土壤呼吸随着温度的增加而增加,但其他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<sup>[10]</sup>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 a内的生态系统增温试验(0.3~0.6℃),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<sup>[11]</sup>总结表明,自然生态系统土壤呼吸在1989至2008年间以每年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。

### 2.3 气候变化改变生态系统碳氮组分,施肥促进土壤有机质分解

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 $[\text{CO}_2]$ 升高条件下,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<sup>[1]</sup>总结 $[\text{CO}_2]$ 增加试验表明, $[\text{CO}_2]$ 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分别增加了5.8%和3.8%,推测 $[\text{CO}_2]$ 升高有利于短期土壤碳固定。Feng 等<sup>[12]</sup>用PLFA方法在分子水平上表明,在 $[\text{CO}_2]$ 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 $[\text{CO}_2]$ 升高导致长时间尺度上土壤养分限制性

$[\text{CO}_2]$ 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。如前所述, $[\text{CO}_2]$ 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 $[\text{CO}_2]$ 升高下土壤氮循环能力下降而下降<sup>[13]</sup>。在 $[\text{CO}_2]$ 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 cm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 $6.3 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,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。 $[\text{CO}_2]$ 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<sup>[14]</sup>研究表明, $[\text{CO}_2]$ 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。

$[\text{CO}_2]$ 升高下,土壤C/N增加<sup>[13]</sup>,生物固氮效率也逐年降低<sup>[5,15]</sup>;在不施肥处理中由于微生物固持作用植物产生了对 $[\text{CO}_2]$ 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<sup>[13]</sup>。根据Hartwig和Sadowsky<sup>[16]</sup>总结报道,在 $[\text{CO}_2]$ 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 $[\text{CO}_2]$ 增加下叶中Fe、Mo含量降低有关。为综合验证土壤养分限制性,需要在大田 $[\text{CO}_2]$ 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

### 4.1 $[\text{CO}_2]$ 和养分管理对农田生态系统过程的影响存在交互作用

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更为重要。如前所述,个别研究报道认为, $[\text{CO}_2]$ 升高下调落物分解速度加快,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 $[\text{CO}_2]$ 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, $[\text{CO}_2]$ 升高与氮肥施用存在交互作用。 $[\text{CO}_2]$ 升高并供应氮可加速碳循环,而在低氮和高 $[\text{CO}_2]$ 下,土壤碳库周转变慢。Ni-boyet 等<sup>[17]</sup>研究表明, $[\text{CO}_2]$ 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 $[\text{CO}_2]$ 和高氮水平的正向交互促进作用,总矿化速率也受到 $[\text{CO}_2]$ 和高氮水平的显著促进作用,但是硝化总量并不受到 $[\text{CO}_2]$ 和氮肥施用的影响。在高氮条件下 $[\text{CO}_2]$ 增加促进植物生长作用更加显著,在氮胁迫时高 $[\text{CO}_2]$ 对植物生长的促进作用消失。de Graaff 等<sup>[1]</sup>总结表明,高氮水平下, $[\text{CO}_2]$ 增加使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含量则每年增加了2.2%;但在低氮水平下, $[\text{CO}_2]$ 增加使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;只有高氮供给条件下,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, $[\text{CO}_2]$ 增加处理中氮的生物固持作用才增加。

$[\text{CO}_2]$ 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<sup>[18]</sup>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, $[\text{CO}_2]$ 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%。

### 4.2 $[\text{CO}_2]$ 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

$[\text{CO}_2]$ 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<sup>[19]</sup>。 $[\text{CO}_2]$ 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<sup>[20]</sup>。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<sup>[21]</sup>。温度、水分和 $[\text{CO}_2]$ 各因素之间对植物生长

发育的影响具有复杂的交互作用<sup>[22]</sup>。

绝大多数报道认为, $[\text{CO}_2]$ 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。光合作用和氮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 $[\text{CO}_2]$ 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,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、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,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<sup>[23]</sup>,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气候变化下农田碳汇和生产力功能

由于 $[\text{CO}_2]$ 升高使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<sup>[24]</sup>从生态系统学角度提出了用于研究 C-N 相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。当生态系统暴露在 $[\text{CO}_2]$ 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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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,从而制约土壤碳汇和农田生产力功能的长期发挥。

## 6 科学问题及对农业生产的启示

气候变化背景下 $[\text{CO}_2]$ 升高、温度升高)土壤养分的周转规律如何?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?

$[\text{CO}_2]$ 升高直接改变了土壤作物系统碳氮平衡。土壤养分限制性的理论框架有望解释各种不同的试验结果,并有助于将模型和试验数据有机结合。Luo 等<sup>[24]</sup>提出用氮素限制性概念来研究陆地生态系统中 C 和 N 的交互作用,虽然主要讨论的是 N 素亏缺,但是也适用于生态系统中亏缺的如磷等其他元素。为了验证土壤养分限制性,必须综合测定大田 $[\text{CO}_2]$ 长期试验中各种 C-N 过程的动态变化。由于陆地生态系统 C、N 库具有不同的周转时间, $[\text{CO}_2]$ 升高下 C-N 相互作用涉及到在不同时间尺度上发生的很多过程。试验和模型研究相结合对于理解复杂的碳氮交互作用是十分有效的手段,也可以判断在给定的环境条件下,养分限制性是否发生或者将在何种时间尺度下发生。总结 $[\text{CO}_2]$ 试验中各种响应的普遍性规律和模型也显得十

分必要。加入氮反馈效应来校准模型、将碳固定作用和营养循环联系起来,准确预测全球碳库,通常预测光合作用和植物生产促进作用在长期时间尺度上将逐步下降。

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。

农田生态系统是受人为影响最为强烈的生态系统,尤其是我国氮肥大量施用,严重影响了农田生态系统碳氮平衡,对生态环境造成很大的压力。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在气候变化情景下相应的需肥规律,从而及时合理运筹分配肥料,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。因此,在气候变化[CO<sub>2</sub>]升高下,根据前述 C-N 相互作用原理以及养分有效性逐渐亏缺的规律,适当增加氮输入有利于维持农田生态系统碳氮平衡,也有利于从长时间尺度上维持土壤养分有效性,氮肥增加的幅度和比例则需要根据不同的气候变化情景和不同生态系统的实际需求进行调控。在气候变化背景下,由于生物量增加秸秆还田量也相应增加,但还田比例并未增加,仍然不足以从长时间尺度上保持土壤养分有效性。同时,养分限制性规律表明需要维持秸秆一定的 C/N 才能保障土壤碳汇的长期效应。总的来说,根据气候变化情境下养分运转规律,保证生态系统养分的高效利用以及可持续供给,确保土壤碳汇生态服务功能以及农田生产力的可持续性。

#### 参考文献:

- [1] de Graaff M, van Groenigen K, Six J, et al. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO<sub>2</sub>: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 2077–2091.
- [2] Langley J, McKinley D, Wolf A, et al. Priming depletes soil carbon and releases nitrogen in a scrub-oak ecosystem exposed to elevated CO<sub>2</sub>[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 54–60.
- [3] Xie Z, Cadisch G, Edwards G, et al. Carbon dynamics in a temperate grassland soil after 9 years exposure to elevated CO<sub>2</sub> (Swiss FACE)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1387–1395.
- [4] Niklaus P, Leadley P, Schmid B, et al. A long-term field study on biodiversity × elevated CO<sub>2</sub> interactions in Grassland [J]. *Ecological Monographs*, 2001, 71: 341–356.
- [5] Hungate B, Stiling P, Dijkstra P, et al. CO<sub>2</sub> elicits long-term decline in nitrogen fixation[J]. *Science*, 2004, 304: 1291.
- [6] de Graaff M, van Kessel C, Six J. Rhizodeposition-induced decomposition increases N availability to wild and cultivated wheat genotypes under elevated CO<sub>2</sub>[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1094–1103.
- [7] Zak D, Pregitzer K, King J, et al. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub>, fine roots and the response of soil microorganisms: A review and hypothesis[J]. *New Phytologist*, 2000, 147: 201–222.
- [8] Pendall E, Leavitt S, Brooks T, et al. Elevated CO<sub>2</sub> stimulates soil respiration in a FACE wheat field[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2001, 2: 193–201.
- [9] Drigo B, Kowalchuk G, van Veen J. Climate change goes underground: Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on microbial community structure and activities in the rhizosphere[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44: 667–679.
- [10] Rustad L, Campbell J, Marion G, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126: 543–562.
- [11] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464: 579–582.
- [12] Feng X, Simpson A J, Schlesinger W H, et al. Altered microbial community structure and organic matter composition under elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization in the duke forest[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 2104–2116.
- [13] Oren R, Ellsworth D, Johnsen K, et al. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere[J]. *Nature*, 2001, 411: 469–472.
- [14] Niklaus P, Alphei J, Ebersberger D, et al. Six years of in situ CO<sub>2</sub> enrichment evoke changes in soil structure and soil biota of nutrient-poor grassland[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 585–600.
- [15] Reich P, Hobbie S, Lee T, et al. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO<sub>2</sub>[J]. *Nature*, 2006, 440: 922–925.
- [16] Hartwig U, Sadowsky M. Biological nitrogen fixation: A key process for the response of Grassland ecosystems to elevated atmospheric [CO<sub>2</sub>][J]. *Ecological Studies*, 2006, 187: 325–336.
- [17] Niboyet A, Barthes L, Hungate B, et al. Responses of soil nitrogen cycling to the interactive effects of elevated CO<sub>2</sub> and inorganic N supply[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327: 35–47.
- [18] Kimball B, Morris C, Pinter Jr P, et al. Elevated CO<sub>2</sub>, drought and soil nitrogen effects on wheat grain quality[J]. *New Phytologist*, 2001, 150: 295–303.
- [19] Cao M K, Prince S D, Tao B, et al. Regional pattern and interannual variations in global terrestrial carbon uptake in response to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Tellus B*, 2005, 57: 210–217.
- [20] Robredo A, Pérez-López U, de la Maza H S, et al. Elevated CO<sub>2</sub> alleviates the impact of drought on barley improving water status by lowering stomatal conductance and delaying its effects on photosynthesis[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59: 252–263.
- [21] Ottman M J, Kimball B A, Pinter P J, et al. Elevated CO<sub>2</sub> increases sorghum biomass under drought conditions[J]. *New Phytologist*, 2001, 150: 261–273.
- [22] Qaderi M M, Reid D M. Crop responses to elevated carbon dioxide and temperature [M]// Singh S N. *Climate Change and Crops*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2009: 1–18.
- [23] Long S, Ainsworth E, Leakey A, et al. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations[J]. *Science*, 2006, 312: 1918.
- [24] Luo Y, Su B, Currie W, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide[J]. *Bioscience*, 2004, 54: 731–739.