

大气 CO₂ 浓度上升和全球气候变化对我国农业生产的影响

Potential Impact of Increasing [CO₂]_a and Global Climate Change on Agricultural Production in China

邓西民

(北京农业大学, 北京 100094)

一、大气中 CO₂ 浓度([CO₂]_a)上升和全球气候变化

据联合国环境计划署下属的政府间气候变化委员会(IPCC)的报告,大气中二氧化碳浓度(以下用[CO₂]_a表示)已经从工业革命前(1800年)的280 ppmv(微升/升)上升到1990年的353 ppmv,大约增长了26%,近40年间增长了13%。目前,[CO₂]_a正以每年1.8 ppmv的速率继续增加。[CO₂]_a增加的主要原因是人们使用化石燃料和砍伐森林(尤其是热带雨林)释放出大量的CO₂进入大气层。IPCC的科学家们预测即使把人为的CO₂释放速率控制在1990年的水平,到2050年[CO₂]_a仍将会增加到415~480 ppmv,到下世纪末[CO₂]_a将会上升到460~560 ppmv。如果我们不能有效地控制CO₂的释放,到2100年[CO₂]_a将可能达到825 ppmv。

大气中的CO₂能够吸收从地球表面发出的长波辐射,假如没有它和其它产生这种温室效应的气体,地球表面温度会比现在的温度低33℃。如果[CO₂]_a上升,地球可能变得更暖和些。IPCC报告在过去100年间,全球年平均地表气温大约升高0.3~0.6℃,本世纪80年代有5年是全球平均气温最高的年份。1980到1990间的温室效应增强,[CO₂]_a上升所起的作用占55%。根据IPCC科学家们的最优估计,如果我们继续照常排放温室气体,到下世纪末,由于温室效应全球年平均气温可能上升3℃,变化范围在2~5℃之间。陆地表面气温比海洋表面气温上升得更快些,北半球高纬度的冬季气温可能会高于全球平均气温。

气温变化可能改变年降雨量及其分布。从本世纪70年代迄今,北半球冬季积雪覆盖面已经减少8%。近来,有人把欧洲发生的世纪洪水同全球气候

变暖联系在一起。IPCC的科学家们预测尽管全球平均年降雨量有可能增加,将来一些国家和地区夏季降雨量会减少,土壤含水量会降低,在植物生长季节出现干旱灾害的频率和旱灾程度都可能增大。全球气候变化速度和幅度在不同时间和地域可能会有差异。我国地域辽阔,未来的区域气候变化有可能高于或者低于同时间全球气候变化的平均数值,但可以肯定变化将是不可避免的。事实上,过去几十年间我国一些地区的年平均气温和降雨量已经发生了一些值得注意的变化(见慈龙骏文,《科技导报》1995年1期)。

二、[CO₂]_a和气候变化对植物的主要影响

植物通过绿色叶片光合作用固定CO₂,把大气圈和生物圈紧密地联系在一起。[CO₂]_a上升提高叶肉细胞内的CO₂浓度,增强了CO₂同O₂竞争戊糖二磷酸羧化酶的能力,抑制C₃植物(这些植物的光合碳循环为C₃途径,CO₂同五碳糖结合首先生成三碳有机化合物)的光呼吸,提高C₃植物单位叶面积净光合速率。[CO₂]_a从350 ppmv上升到700 ppmv,C₃植物叶片净光合速率增长40%,C₄植物(它们的叶片固定CO₂后首先形成四碳有机化合物)增长5%左右。C₄植物先固定CO₂形成含4个碳原子的化合物,然后再把固定的CO₂送到进行碳同化的细胞内合成糖,这样提高了细胞内的CO₂浓度,减少光呼吸消耗,提高光合同化速率。在低[CO₂]_a条件下,C₄植物光合速率高于C₃植物。在高[CO₂]_a条件下,C₃植物光呼吸也受到抑制,又因为它固定和同化CO₂的途径比C₄植物的更直接和简捷,所以光合作用增益效应更高些。高[CO₂]_a促进叶面积增大和叶片早期迅速完成发育以及晚期延迟衰老脱落,进一步提高一棵植株整个生长季的总光合产量。不过,有些植物长期处于高[CO₂]_a环境中,叶片

光合能力反而会逐渐降低。

植物在高 $[\text{CO}_2]$ 环境中提高光合速率增加的碳同化物主要用于自身的器官生长发育和形态结构建成。在高 $[\text{CO}_2]$ 条件下,植物的根茎长度增加,叶片面积和厚度增大,营养器官如叶片、枝条和根系以及生殖器官如花、果实和种子的数目增多,体积增大。高 $[\text{CO}_2]$ 也加速植物器官的发育,缩短器官完成生长发育需要的时间。但是,多数植物的额外碳同化物分配向根系的增长百分数高于向地上部的,分配向枝条和茎干的大于向叶片的。

$[\text{CO}_2]$ 上升直接促进光合同化物的生产,间接提高植物获得光、水和养分资源的能力,加速植物的生长,结果使植物的生长量明显增加。鲍特尔(Poorter, 1993)总结许多试验结果后指出,和对照相比, $[\text{CO}_2]$ 增加一倍,按干物质积累增加计算,植物生长量平均提高37%, C_3 植物平均提高41%, C_4 植物平均提高22%,CAM(景天酸代谢途径)植物(这类植物夜间吸收固定 CO_2 ,白天同化还原 CO_2 合成糖)平均提高15%。 $[\text{CO}_2]$ 增倍,栽培的 C_3 禾本科作物和野生植物的平均生长量分别提高58%和35%。在充分提供光照、水分和养分的试验条件下,酸橙实生苗在高 $[\text{CO}_2]$ 环境中生长,干物质积累在三年内比对照增加了1.7倍。高 $[\text{CO}_2]$ 对生长的促进效应在植物种间差异很大,而且这种促进效应和其它环境条件密切相关。

温度上升促进高 $[\text{CO}_2]$ 对植物生长的增益效应。在高 $[\text{CO}_2]$ 环境下, C_3 植物的光合适宜温度也升高,温度在一定范围内升高,叶片光合速率增大。在比较高的温度条件下,高 $[\text{CO}_2]$ 对植物生长的增效作用更大些。如果温度偏低,一些植物的 CO_2 增益效应会降低为零甚至出现负值。但是,温度升高也会加速叶片和植株整体的呼吸消耗,高温对呼吸的促进作用大于对光合的促进作用;温度变化还会影响植物器官尤其是生殖器官的生长发育。

$[\text{CO}_2]$ 上升减小叶片气孔开度,增大水蒸气通过气孔的阻力,降低单位叶面积的水分蒸腾速率,又因为单位叶面积净光合速率的提高,显著地提高叶片水分利用效率(WUE)。 $[\text{CO}_2]$ 增倍,植物叶片WUE也会增加一倍。 C_3 植物的叶片WUE增加主要是由于净光合大幅度增长的结果,而 C_4 植物的叶片WUE提高主要是因为蒸腾减少的缘故。 C_3 和 C_4 植株的平均日WUE随 $[\text{CO}_2]$ 增倍(350到700 ppmv)分别增加35%和72%。一个生长季节,植物总WUE增长范围可能在22%到44%之间。生长季植物总的WUE提高,主要是干物质产量增加的结果,总的用水量也许不会减少。因为 $[\text{CO}_2]$ 上升增加植物叶片面积,降低叶片蒸腾速率导致叶片温度上升,都会增加植株的水分用量。

不过,高 $[\text{CO}_2]$ 可以缓解许多植物的水分亏缺

伤害。在干旱环境条件下,高 $[\text{CO}_2]$ 会使植物积累更多一些生物产量,补偿干旱胁迫带来的损失;降低水分蒸腾速率,可以减少水分损失,提高叶片和整个植株的水势;它还促进一些植物的根系生长发育,也可能增加根系吸收和利用土壤水分的能力,增加水分供应,使得植物在缺水胁迫条件下维持比较长时间的生长和同化物生产,增强植物的耐旱能力。高 $[\text{CO}_2]$ 增加植物体内的非结构碳水化合物含量,降低细胞的渗透势,也可能提高植物对于干旱胁迫的主动渗透调节能力。

在养分不足条件下,许多植物的 $[\text{CO}_2]$ 生长增益效应变化不大。高 $[\text{CO}_2]$ 促使植株积累比较多的碳同化物,提高养分利用效率。但是,严重养分不足会降低植物的高 $[\text{CO}_2]$ 生长增益效应,增加植物需要的矿质元素供应有可能提高 CO_2 的生长促进作用。在高 $[\text{CO}_2]$ 环境中,豆科植物的固氮作用增强,非豆科植物的氮素利用效率提高。

三. $[\text{CO}_2]$ 和气候变化对农业生产的影响

农业生产的目的是提高大面积栽培植物的经济产量。国外许多科学研究工作已经肯定高 $[\text{CO}_2]$ 对农作物产量的增益效应。 $[\text{CO}_2]$ 增倍,水稻、玉米、大豆、小麦和棉花经济产量分别提高15%、19%、29%、35%和80%。近几十年来,全世界谷物单产年相对递增率2.3%(1959年1400公斤/公顷,1986年2600公斤/公顷), $[\text{CO}_2]$ 增加带来的肥料效应所起的作用大约占5~10%。

水稻在高 $[\text{CO}_2]$ 条件下生长时间长了,叶片光合能力会下降,叶片羧化酶的含量和活性都降低。 $[\text{CO}_2]$ 超过500 ppmv后,水稻群体光合速率、干物质重量和产量都不再提高。比较高的 $[\text{CO}_2]$ 增加水稻的分蘖,因而使穗数增加,提高了干物质和籽粒产量,稻谷千粒重的变化不大。 $[\text{CO}_2]$ 上升和温度升高会缩短水稻的营养生长发育期,作物的生长季可能缩短10~12天。但水稻花期日平均气温超过26℃,气温每升高1℃,水稻将会减产10%,因为过高的温度会导致花序不育。水稻的日WUE可能因为 $[\text{CO}_2]$ 翻番(从330到660 ppmv)增加27%,温度升高会增加用水量,降低水分利用效率。

玉米和高粱、甘蔗都是栽培的 C_4 植物。在高 $[\text{CO}_2]$ 条件下,它们的光合速率提高幅度低于 C_3 植物,所以产量的增益效应也比较低。但是,高 $[\text{CO}_2]$ 减小玉米叶片气孔开度,增大水分散失阻力,减少叶片的水分蒸腾消耗,提高叶片水势和作物的耐旱能力,将会有利于在我国部分干旱和半干旱地区栽培种植,适应未来可能出现的高温和少雨气候变化。

随 $[\text{CO}_2]$ 上升,小麦的产量明显提高。在目前相同或者相近似的试验条件下,小麦在高 $[\text{CO}_2]$ 下增产幅度比玉米大,如果栽培地区温度适宜,水肥条件能够满足需要,将来小麦单产有可能超过玉米单产。但是如果日平均气温超过最佳温度 4°C ,小麦籽粒产量会降低37%。

大豆的籽粒产量在过去100年间已经随 $[\text{CO}_2]$ 上升大约增加了15%。高 $[\text{CO}_2]$ 增加种子数量而不是种子的千粒重量,虽然提高了产量,但降低了收获指数。如果能够保证水分供应,高 $[\text{CO}_2]$ 对大豆生长和产量的增益效应在比较高的温度下将会更明显。温度上升增加种子数量,但减轻了种子的千粒重量,对产量的影响也不显著。 $[\text{CO}_2]$ 上升增加大豆的产量,同时减少水分蒸腾消耗,明显地提高水分利用效率。温度升高则可能增加用水量,降低水分利用效率。

$[\text{CO}_2]$ 上升对棉花的干物质产量和经济产量的增益效应近来已经在大田试验中得到进一步的证实。美国科学家控制棉田开放空间的 $[\text{CO}_2]$ 高于自然浓度48%,结果干物质产量提高37%,棉花产量提高43%。增产的主要原因是叶片和冠层的光合速率提高、前期叶面积迅速扩大、开花数量增多和果实棉桃延迟衰老脱落。棉田的水分利用效率因为干物质产量增加而提高,但整个生长季作物的总用水量并没有减少多少。

全球气候变化将影响大范围的农业生产。美国科学家布尔(Buol)等人推测年平均气温上升 3°C 可能延长农作物的生长季节,把北半球玉米和小麦栽培区域向北推移,我国适宜栽培玉米的土壤面积可能增加65%(大约1100万公顷),小麦的栽培面积变化不大。高 $[\text{CO}_2]$ 和比较高的气温促进作物发育,提前种子成熟收获期,在我国一些地区可通过提高复种指数,增加单位土地面积上的粮食产量。

但是,我们必须注意气候变化的负面效应,温度升高会增加水分的地面蒸发和植物蒸腾,可能给遭受干旱危害的农作物火上浇油。冬季平均气温上升会影响北方地区栽培的温带落叶果树解除休眠的需冷量要求。在一些已经处在极端环境条件下的地区,微小的气候变化负面效应可能会毁灭当地当时的农业生产。例如,作物因为冬暖过早恢复旺盛生长,很可能遭遇突然出现的晚霜冻害全部死亡。

我国国家气候变化协调组第二工作组的科学家预测,到2030年 $[\text{CO}_2]$ 将达到600ppmv,超过1900年的300ppmv一倍。 $[\text{CO}_2]$ 增加30%带来的肥料效应将可能使 C_3 农作物增产10%。届时,全球年平均气温可能会上升 $1\sim 2^\circ\text{C}$,但我国西南和西北地区气温升幅大于 3°C ,其它地区气温上升 $2\sim 3^\circ\text{C}$,将程度不同地提高各地等于和大于 10°C 的有效积温,平均延长作物的有效生长期一个月,使农

业增产2%。一些作物可在比较高的纬度和海拔地区栽培。东北和华南因为雨量充沛,农业生产可能得益于气候变化。升温将使我国华北和西北地区的地表水分蒸发损失增加20%,大量雨养农业区域的耕地(估计3亿亩农田)可能因为水分不足、盐碱危害受损失,各地区的春旱、伏旱、秋旱会使农业减产10~20%。北方大部分地区栽培的粮食作物可能因为干热风减产5%。沿海地区增加的风灾和暴雨洪涝灾害将会使得1000万亩农田减产50%。如果现有生产条件不能得到调整改善,气候变化的综合效应会使我国农业生产能力下降5%以上。

中国农业科学院组织的气候变化对农业影响及其对策课题组专家们认为,过去40年间,我国华北、东北地区和西北部分地区已经有变暖和变干的趋势,西北地区东部变冷变湿,华南地区变暖变干,西南和长江中下游地区变冷变干。我国作物复种指数已经提高了25个百分点,相当于增加播种面积3~4亿亩,气温变化将导致我国农作物的种植界限北移150~250公里,栽培海拔高度上升150~200米,水稻三季和双季栽培面积扩大,小麦栽培区域增大可能受到水分供应的制约,玉米栽培面积将因为间作套种复播明显增加。我国东北和华南沿海地区将会因为降雨量增大变暖变湿。东北地区气温上升,有效积温增加有利于扩展农田,提高复种指数,如能保证满足水分条件,作物单产和总产可望明显增长。华南地区的农业也可能得益多于受害。长江中下游地区夏季农作物可能增产,但高温和伏旱可能危害作物生产。西南地区农业受未来气候变化的影响可能不大。华北、华中地区和西北大部分地区气温将会升高,高温加上少雨会降低土壤含水量,频繁发生干旱灾害,导致农作物减产。气候变化还可能促使土壤温度升高,加速土壤有机质的降解,使得土地肥力下降更快,也可能有利于杂草生长、作物病虫害的发生。

不过,人们对气候变化的预测仍有很大的不确定性。各地区不同年份温度和降水的变化可能明显偏离预测的平均变化值。研究气候变化对农业生产的长期影响除了根据不同模式模拟分析推测外,还需要田间试验验证,我国还缺少在典型农业生态环境条件下直接观察研究气候变化影响作物生长和农业生产的数据资料。

四. 结束语

$[\text{CO}_2]$ 上升会使作物得到无偿的肥料供应,各种作物的生长和经济产量都有较大幅度增长潜力。但是,如果其它肥料不足, CO_2 的增效作用会变小;如果严重水分短缺限制作物生长, CO_2 的增益

(下转第19页)

三、社会生产力演变历程

人和一切生物一样,最本质的自然特征是求生存,人和生物不仅要在自然环境中选择并改造自己的存在空间,而且还在同类间开展各种形式的竞争或竞赛,以获取与保持生存优势。人类的生存竞争导致了人类社会的演变与进步。这些演变与进步是由许多变革的细流汇成的。但是从技术角度看,工具则是进步的最本质的综合表征。历史上人类已经历了“石器”和“铁器”等工具文明时代,现在正面临着由硅芯片引起的信息革命,因此可称之为“硅器”文明时代。在工业社会中,钢铁是国力的标志,是发展生产力和振兴经济的支柱。现在,半导体硅工业则已替代钢铁工业的社会地位,成为社会进一步发展的基础工业。铁是工业社会的“骨骼系统”,是人类的体力的延伸;而硅则是信息社会的“神经系统”,成为人类脑力的延拓。根据人类文明的这一发展趋势,可以相信,人类在掌握了金属(铁)、非金属(硅)材料之后,有可能进而掌握更复杂的有机材料,而相应的有机物器具的开发则将使人类从延伸体力、延拓脑力发展到仿制生命。这就是说,生命工程应该成为人类下一个“猎物”。生命工程研究生命机理与仿生机器两个相互联系的主题,后者主要涉及分子电子学科,其中包括有机材料、生物芯片和生物装置等。

四、结论及其思考

上述分析表明,硅微电子技术经历了分立功能器件、功能机械集成之后向“功能物理集成”(生物芯片)发展;终端装置,即电子整机则由分立零件堆积仿形、零件集成仿形向“功能自然仿真”(生物装置)发展;人类在掌握了金属铁器、非金属硅器等时代工具后,将向掌握有机物器具方向过渡。三个不同层次的分析,得到了互不相悖的前景:零件向生物芯片方向演变,为创造低耗能、自修复、超性能的生物装置创造条件,从而有可能使人类进入一个创造生命的发展阶段,而生命机理的探明又为仿生

芯片与仿生装置的制造奠定基础。微电子学从“集成”的逻辑发展将促使目前的半导体微电子学发展到生物或分子电子学,而生物电子学的崛起则将把人类工具文明推向一个崭新的生物或生命工程时代。

以上分析了学科和人类工具的发展逻辑。另一方面,从工具技术及其文明的地域聚集效应上分析,我们看到与技术突破相对应的人类文明中心的转移嬗变也遵从一定的规律。在明朝前,我国曾长期处于技术经济的领先地位,成为以农业技术为标志的文明中心。中世纪后,这种文明沿着古丝绸之路由西安经罗马西传英国,酝酿并形成了人类第一次工业革命。19世纪末,这种以工业技术为标志的文明,又绕过大西洋传到北美东海岸,并使铁器文明达到峰极的地步。本世纪50年代末,在美国新泽西州发明的半导体技术西行传到加州,形成了世界著名的技术密集城——硅谷。80年代,这种以信息技术为标志的硅器文明又渡过太平洋西行到了日本。从这些历史嬗变中,我们看到了两个重要的史实。一是,技术经济文明的扩散与传递是不以社会制度、人文背景和地域为转移的,但是只有很少一些地区(中、英、德、美)演变成了文明的中心,在那里人类文明得到了升华。二是,这些近代文明中心总是沿着35°上下的一个纬度带,自东向西,单向转移。

根据上述历史逻辑,可以推测下一轮文明中心要么按历史轨迹复归中国,要么越过中国西渡欧洲(德国?)。显然,全人类都期待前者成为现实,否则人类延误的将是一个大循环周期。中国是古生物技术、古人体科学的发祥地,太平洋地区又是未来经济中心,1986年飞越太平洋的航运开始超过大西洋,历史与现实可能为我们提供了某种机遇。因此,我们中华民族必须同舟共济,奋起直追,通过引种硅器文明,在硅微电子技术高度发达的进程中,孕育以生物芯片为标志的新一代微电子技术,继而促进生物技术、生命工程世纪的来临,为人类文明在新形态下复归中国做出伟大的贡献。

(责任编辑 肖庆山)

(上接第35页)

作用也会消失。大范围温度和降雨变化也可能在一些区域造成严重的农业灾害。英美科学家罗森思威格和帕瑞(Rosenzweig 和 Parry)在1994年预测,到2060年低纬度地区的温度变化即使低于全球平均值,作物仍可能减产;高纬度地区气候变化同CO₂肥料效应一起可能促使作物增产,增产幅度在欧美发达国家可能超过30%,但在发展中国家增产不到10%,甚至不增产反而减产。增产多少取决于

能否对农业生产进行适当的调整,包括改变播种日期、增施肥料、扩大灌溉面积和作物品种改良等。我国未来的农业生产需要考虑[CO₂]。上升和全球气候变化对各种农作物的综合影响,以科学研究试验数据为基础,调整栽培生产技术措施,充分利用CO₂的增产效应和各种农业资源,提高作物产量,满足人口增长和生活水平不断提高的需要。

(责任编辑 孙立明)