

文章编号:1001-8166(2011)02-0235-10

干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对生态系统的 影响及碳氮耦合研究进展*

尹飞虎¹, 李晓兰¹, 董云社^{1,2,*}, 谢宗铭¹, 高志建¹, 何 帅¹, 刘长勇¹

(1. 新疆农垦科学院, 新疆 石河子 832000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 大气 CO₂ 浓度升高已成为全球备受关注的环境问题。CO₂ 排放量的增加加剧了地球表层的温室效应, 也对生态系统的结构和功能产生了重要影响。生态系统对 CO₂ 浓度升高的响应是一个长期的过程。在干旱半干旱区, CO₂ 浓度的升高对生态系统生产力、植物、土壤和微生物等都有影响, 尤其改变了生态系统中的碳循环, 并加剧了生态系统对氮的需求。碳循环是生态系统重要的能量流通渠道; 氮是生态系统最重要的营养元素之一, 也是生态系统固碳能力的限制因子。因此, 加强碳氮耦合关系的探讨对研究全球气候及生态系统变化具有重要意义。对干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合的研究进展进行了综述和讨论, 为进一步研究干旱半干旱区碳、氮循环提供参考。

关 键 词: 干旱半干旱区; CO₂ 浓度; 生态系统; 碳氮耦合

中图分类号: S153. 621 **文献标志码:** A

干旱区是干燥度小于 0.50 的生态气候区(干燥度 < 0.03 为极端干旱; 干燥度 0.03 ~ 0.20 为干旱区; 干燥度 0.20 ~ 0.50 之间为半干旱区)。这些地区一年中大部分时间雨水稀少, 强光照伴随着高温, 大气干燥, 多风, 水分蒸发强烈^[1]。全球约有 40% 的土地是干旱土地, 主要分布在干旱区^[2]。我国干旱半干旱土地面积占国土面积的 52.5%^[3]。无论从全球尺度还是区域尺度, 干旱区的环境变化问题都不容忽视, 更由于其对环境变化的敏感性高、变化过程快、幅度大等特点, 干旱区成为广大学者研究全球变化的重要场所。干旱地区由于严酷的自然条件和频繁的人类活动造成了土壤和植被退化, 从而加速了温室气体的排放^[4]。

近年来, 由于温室气体排放量的增加以及土地

利用方式的改变, 加剧了土地的干旱化, 植物受干旱胁迫的影响呈现加重趋势。陆生植物为了适应这些变化, 在生理生态过程、碳氮等元素在各器官中的分配、植物形态等方面发生着改变。CO₂ 是大气中最主要的温室气体之一。大气中 CO₂ 浓度已经由工业革命前的 280 μmol/mol 增加到现在的 372 μmol/mol, 并且每年还以 1 ~ 2 μmol/mol 的速度增加^[5]。CO₂ 浓度升高影响了陆地生态系统碳贮量和碳通量, 同时碳贮量和碳通量又受氮循环的密切调控^[6]。氮素会影响植物的光合作用、有机质的分解、同化产物的分配等过程。在大气 CO₂ 浓度增加的情况下, 大部分陆地生态系统均表现为氮匮乏^[7]。在干旱半干旱地区, 干旱灾害和 CO₂ 浓度升高是影响其生态系统发展的重要因素。在我国的西

* 收稿日期: 2010-05-12; 修回日期: 2010-08-27.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“CO₂ 浓度升高对新疆干旱区棉花—土壤系统的影响机制及其与氮素的耦合作用”(编号: 40973061); 国家高技术研究发展计划项目“新疆干旱区现代节水农业技术与集成”(编号: 2006AA100218); 兵团科技攻关计划项目“碳素对棉花生长及产量影响机制的试验与示范”(编号: 2006YD25) 资助。

作者简介: 尹飞虎(1954-), 男, 湖南平江人, 研究员, 主要从事植物营养方面研究。E-mail: nkyfth@sohu.com

* 通讯作者: 董云社(1961-), 男, 陕西武功人, 研究员, 主要从事陆地表层生命元素环境生物地球化学循环研究。

E-mail: dongys@igsnr.ac.cn

北、内蒙古西部和西藏北部等地区,干旱现象比较严重,这里的自然景观多为极端干旱的沙漠和戈壁。在干旱半干旱地区,自然降水是除农田生态系统外各类陆地生态系统的主要或者唯一的水分来源,而在农业生态系统中,人类为了应对干旱环境产生了灌溉农业和旱地农业。本文对干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合的相关研究进行论述,为干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响等相关研究提供参考。

1 CO₂ 浓度升高对干旱半干旱区生态系统的影响

在干旱半干旱区自然生态系统中,水分已成为制约该区生态系统可持续发展的主要限制因子。近些年来,众多学者一直在寻求能够提高干旱半干旱区生态系统生产力的有效方法。其中,通过增强植物的光合作用来改善干旱半干旱区植物生物量和土壤理化性质已成为研究的热点。CO₂ 是植物光合作用的底物,其浓度是影响植物光合强度的重要因素。大气 CO₂ 浓度升高会增强植物的光合作用,进而增加植物的生物量,使进入土壤的凋落物数量增多,由于凋落物的成分和数量决定着土壤微生物区系的种类和数量,所以可以给土壤中的微生物提供更多的营养和能源。同时,植物生长过程中根系的外排物和残体分解转化的产物会改变根际土壤的理化性质,也会对土壤微生物产生影响^[8]。

1.1 CO₂ 浓度升高对植物生长的影响

目前已有诸多学者^[9~12]对 CO₂ 浓度升高对植物的影响进行了综述,并一致得出结论:高浓度 CO₂ (一般是目前 CO₂ 浓度的 2 倍,即 700 μmol/mol 以上)对植物生长有促进作用,尤其对 C₃ 植物的促进作用更明显。Kimball 等^[13]研究表明,CO₂ 浓度倍增时,C₃ 植物的光合效率可提高 60%,而 C₄ 植物的光合效率仅提高 4%。Cure 等^[14]认为,短期高 CO₂ 浓度处理对 C₃ 植物光合速率和净光合产物量的影响就很大,光合速率平均提高约 52%。同时 CO₂ 浓度升高减小了气孔导度,降低了植物的蒸腾作用,提高了水分利用率,有利于光合产物的积累,增加植物的生物量。但不同光合途径植物的生物量增加幅度也有所不同,C₃ 植物的生物量将平均提高 41%,C₄ 植物平均提高 22%,CAM 植物平均提高 15%^[15]。由此可以看出,研究干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对植物影响的同时还应考虑水分的作用。

在自然生态系统中,草地生态系统和荒漠生态系统是干旱半干旱地区面积最大的 2 种类型。已有许多学者对这 2 种生态系统中的优势植物进行了高浓度 CO₂ 处理和干旱胁迫的模拟试验研究,并得出了相关结论。高素华等^[16]的研究结果表明,相同的土壤湿度下,高浓度 CO₂ 下羊草和贝加尔针茅的生物量比低浓度 CO₂ 的大;只增加 CO₂ 浓度时,其生物量、光合速率、气孔阻力和水分利用效率均增大,但蒸腾速率减小;相同的 CO₂ 浓度下,随着干旱程度的增加,羊草和贝加尔针茅的生物量、光合速率和蒸腾速率均下降,但气孔阻力增加;在高浓度 CO₂ 条件下发生干旱胁迫,随着干旱程度的增加,“CO₂ 的施肥效应”减弱,并且干旱胁迫程度越重,“CO₂ 的施肥效应”减弱越明显,但二者之间的变化趋势不完全成正比。草地生态系统中物种丰富度较高,不同光合途径的植物对 CO₂ 浓度升高的响应也不一致,一般在相同情况下 C₃ 植物的生物量增加要比 C₄ 植物的多^[17,18]。在 CO₂ 浓度升高时,大多数植物的光合速率都会增大、生物量都会增加;但也有特殊情况,有少数植物的光合速率出现了下降^[19];生物量变化不明显,甚至出现下降^[20,21]。高素华等^[22]通过研究荒漠生态系统的优势植物认为,CO₂ 浓度升高有利于荒漠植物根、茎、叶生物量的增加。随着荒漠生态系统土壤干旱程度的加剧,各植物的生物量明显下降;但是在相同的土壤湿度条件下,高浓度 CO₂ 时荒漠植物的生物量要高于本底水平处理,这说明荒漠生态系统同样存在“CO₂ 的施肥效应”。但无论是草原植物还是荒漠植物,就不同植物或者相同植物的不同品种而言,对 CO₂ 浓度升高和干旱胁迫的敏感程度不尽相同,即使是生存在相同环境下的植物,干旱和 CO₂ 浓度升高对它们产生的影响也可能存在较大的差异。

在现代干旱半干旱区的农田生态系统中,有灌溉农业和旱地农业 2 种。对于灌溉农业一般不会发生干旱灾害现象,但对于主要依靠降水来供给作物所需水分的旱地农业,干旱会对其产生一定的影响。虽然在灌溉农业中没有缺水所带来的影响,但旱地农业在整个农业生产中占有重要地位。世界耕地的 42.9% 位于干旱半干旱地区,旱作农业在世界农业生产中起着举足轻重的作用^[23]。我国旱地农业主要分布在昆仑山—秦岭—淮河一线以北的干旱、半干旱和半湿润易旱地区,占国土面积的 56%,其中的耕地面积占全国总耕地面积的 52%,没有灌溉条件的旱地约占这一地区耕地面积的 65%^[24]。很多

国家的粮食、棉花、大豆等作物主要产自旱作农业区。对这些地区的棉花、春小麦、冬小麦、大豆和玉米等在中等水肥条件下进行了 CO₂ 浓度升高的影响研究^[25~31], 一致认为在 CO₂ 浓度升高的情况下, 作物光合速率、叶面积指数、生物量和产量均呈现增加趋势; 当 CO₂ 浓度加倍时, 棉花产量可提高 50%、小麦产量可提高 10%^[12,14]。Wong^[32] 认为, 棉花在 640 μmol/mol CO₂ 时的非结构性碳水化合物含量比在 320 μmol/mol 时增加 15% ~ 35%。Nie 等^[33] 通过自由 CO₂ 气体施肥 (Free-Air-CO₂ Enrichment, FACE) 试验发现, 春小麦在 550 μmol/mol 高 CO₂ 浓度下生长一季后, 叶绿素 a/b 比率比对照提高 26%, RuBP 羧化酶含量比对照高 15%。

1.2 CO₂ 浓度升高对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤中重要而又活跃的部分, 是自然界物质循环不可缺少的成员, 担负着分解动植物残体的重要作用, 直接关系到土壤养分的有效性, 对植物生长和生态系统功能起到极其重要的作用^[34]。土壤微生物对大气 CO₂ 浓度升高的响应是全面评价大气 CO₂ 浓度变化对陆地生态系统影响的关键^[35]。大气 CO₂ 浓度变化通过影响植物生长间接影响土壤中的微生物^[36], 大气 CO₂ 浓度升高对土壤微生物群落结构、微生物区系及活性等方面都有不同程度的影响^[35], 对微生物总数量及生物量碳、氮含量均有促进作用^[8]。

在干旱半干旱区的农田和草地生态系统中, 大气 CO₂ 浓度升高对土壤微生物的影响主要表现在微生物呼吸、活性及生物量碳、氮含量等方面。Runion 等^[37] 发现 FACE 条件下土壤微生物的整体活性增加了 16%, 而根际微生物的呼吸增加了 29%。Zak 等^[38] 采用开顶式同化箱 (Open-Top Chamber, OTC) 试验发现, 高 CO₂ 浓度下与植物生长密切相关的微生物生理类群 (如解磷细菌) 的数量有所增加; 同时, CO₂ 浓度升高可使禾草状草本和木本植物种类的土壤微生物总碳和呼吸强度均有所增加, 其呼吸强度分别平均增加了 24% 和 13%。CO₂ 浓度升高对土壤微生物生物量碳、氮含量的影响同时还与土壤含水量有关。在干旱条件下, CO₂ 浓度升高时微生物生物量碳、氮含量会明显增加; 在湿润条件下, CO₂ 浓度升高不影响微生物生物量碳、氮含量, 但外加氮能增加微生物生物量碳、氮含量^[39]。但也有研究发现, 在施肥增加氮素 17% 的情况下, 微生物生物量碳含量既不受 CO₂ 浓度升高的影响, 也不受施

肥的影响^[40]。由此看来, CO₂ 浓度升高对土壤微生物生物量的影响受土壤水分状况和土壤养分情况等多种因素的制约。

土壤微生物结皮广泛存在于干旱半干旱区, 是沙地生态系统和荒漠生态系统中主要的生物表面特征, 在干旱区生态恢复中占有重要地位^[41]。微生物结皮可以作为荒漠化发生、发展和逆转的景观特征之一和指示生物。由于荒漠化现象已经严重影响了我国北方干旱半干旱地区, 微生物结皮在我国北方荒漠化地区有广泛的应用前景^[42]。生物结皮是干旱半干旱区生态系统中重要的碳源和氮源, 生物结皮中的地衣、苔藓、藻类等可以利用光合作用固定有机碳, 促使碳直接进入土壤生态系统^[43]。即使降雨量很少或在露水、雾水情况下, 生物结皮仍然可以保持最大的光合作用^[41]。同时生物结皮中的蓝藻、地衣等与藻青菌结合在一起, 可以固定大气中的氮^[44]。还有研究发现, 由于生物结皮中存在固氮酶, 当 CO₂ 浓度升高时可以提高固氮菌的光合作用, 所以生物结皮在增加土壤氮营养的同时, 还增大了碳汇^[45]。

1.3 CO₂ 浓度升高对土壤碳库的影响

CO₂ 的生物地球化学循环涉及大气圈、陆地生物圈、水圈和岩石圈。陆地生态系统碳循环主要通过植物和土壤在陆地生物圈中完成其循环过程, 从而形成了生物量并存贮了更多的土壤碳。干旱区是全球重要的生态区之一, 通过“大气—植被—土壤—水—沉淀”作用的碳转移系统构成了干旱区碳循环的主要机理和途径^[46]。由于干旱半干旱地区脆弱的生态环境使土壤有机碳和无机碳矿化, 影响了碳循环, 容易导致土地退化和荒漠化, 进而释放 CO₂、增加温室效应。

大气 CO₂ 浓度升高可能是通过生态系统中的各种生理过程来增加输入土壤的碳量。一方面, 输入土壤的碳量增加会使土壤成为一个潜在的碳汇, 进而有可能缓解大气 CO₂ 浓度的升高。但另一方面, 大气 CO₂ 浓度升高会使植物通过光合作用固定的同化物增加, 输送到土壤的碳量增加, 为微生物的生长提供了能量, 进而提高了微生物的活性, 使土壤呼吸增强、土壤碳输出增加^[47]。因此, 高浓度的 CO₂ 是否会导致土壤碳的积累, 不同学者的研究结果也不尽相同。Cardon 等^[48] 认为高浓度的 CO₂ 会导致土壤碳的积累。而 Lamborg 等^[36] 认为 CO₂ 浓度升高并不会引起土壤中碳的积累, 反而会导致有机质分解加快。Xie 等^[49] 则认为高浓度 CO₂ 下, 输入土壤

碳量的增加促进了土壤原有有机碳的分解。Hoosbeek 等^[50]经过5年的FACE试验发现,CO₂浓度升高可显著增加土壤全碳含量,但对所增加碳在地下的分配尚不清楚;CO₂浓度升高虽然不影响土壤中团聚体的形成,但却增加了粗微团聚体形成的稳定性和碳保护功能,从而提高了土壤碳的稳定性。

土壤是陆地生态系统中最大的碳库载体,其中有机碳储存量为1 550 Pg,无机碳储存量为750~950 Pg^[51]。全球无机碳库的92%分布在干旱、半干旱地区^[52]。无机碳在干旱区土壤中的储存量超过土壤有机碳储量的2~5倍,但土壤无机碳的重要性,尤其是对于干旱区土壤碳循环的贡献尚未得到充分的认识^[4,53]。在干旱、半干旱地区碱性和富含钙的地球化学环境下,土壤有机碳(SOC)的含量和矿化速率高,生成较多的CO₂,通过反应SOC→CO₂→HCO₃⁻→CaCO₃参与PIC的淀积结晶,增加土壤无机碳(SIC)总量,使无机碳得到沉积^[4,54]。我国土壤有机碳和无机碳储量分别为44.5^[55]和60 Pg^[54],土壤有机碳密度远远低于世界平均水平^[56],其中西北地区干旱半干旱区有机碳的分布面积所占比例最大(32.3%)^[57]。但由于我国西北地区面积较大,按平均分布计算,土壤有机碳单位面积储量较低;但无机碳储存量较高。这是由于干旱半干旱区有限的生物量生产与土壤水分含量和特殊的土壤理化性质决定了土壤有机碳的储存相对贫乏,而土壤无机碳的储量相对丰富^[58]。Hu^[59]在我国西部干旱半干旱区发现,当土层深度20 cm以下的活性方解石积聚时,土壤有机碳含量的70%(3~9 g/kg)很快被转化成土壤无机碳。

土壤有机碳库约占陆地有机碳库的2/3,在干旱气候区0~1 m土层内碳库约为30 t/hm²^[60]。土壤碳库的稳定、增长或释放都与大气CO₂浓度变化有紧密的联系,是揭示陆地生态系统净碳汇的重要理论基础^[61]。土壤通过呼吸作用对其释放的CO₂与大气CO₂进行交换^[62],以CO₂形式释放的碳量大约占土壤有机碳总量的4%^[63]。据估计,全球土壤每年向大气排放的碳量高达68×10¹⁵ g,约占全球总排放量的5%~20%^[64]。

2 CO₂浓度变化对氮素营养的影响及碳氮耦合

氮作为植物所必需的三大营养元素之一,对植物的生长发育起着至关重要的作用。近期研究表

明,大气CO₂浓度升高会影响植物—土壤系统中的氮素^[65]。在自然生态系统中,氮素营养经常成为系统生产力的限制因素。氮素供应不足,会使植物通过降低光合作用有关酶的表达、增加产物积累以及限制蛋白质合成等途径形成光合适应现象^[66]。同样,碳也是植物生长所必需的大量营养元素,对陆地生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)的限制非常明显,并且陆地生态系统碳贮量和碳通量受氮循环的密切调控^[6]。伴随着主要温室气体CO₂浓度的升高,氮素也会以氮沉降的形式进入到生态系统中,使生态系统中的C和N一起升高。近几十年来,CO₂浓度的升高加快,氮沉降也越来越严重,对陆地植被生产力会产生一定的影响。如果碳和氮能够有机结合,形成有利于生态系统的耦合,会使生产力在一段时间内保持上升状态。

2.1 CO₂浓度变化对氮素营养的影响

大气CO₂浓度与氮素营养共同影响着植物的生长。大气CO₂浓度升高对植物吸收氮素的影响与大气CO₂浓度、植物品种以及被吸收氮的形态等因素有关^[65]。在干旱半干旱地区的不同生态系统类型中,大气CO₂浓度升高时,植物体内和土壤中氮素的变化存在差异。尤其是外源氮的输入和CO₂浓度升高共同作用下,对植物—土壤系统的影响还存在不确定性。

在干旱半干旱区的草原生态系统中,一般认为CO₂浓度升高会减少植物组织中的氮素含量^[67,68];但也存在CO₂浓度升高对氮素含量没有任何影响现象^[68,69];还有少数研究表明CO₂浓度升高会增加植物和土壤有机质中氮的含量^[70]。因此在草原生态系统中,当CO₂浓度升高时,植物组织中氮素含量的变化可能会因植物群落或生态系统中物种成分的差异而不同。在CO₂浓度倍增条件下,输入外源氮素,如果氮素能够促进碳的固定,则会对生态系统生产力和土壤理化性质产生积极的影响。无论是植物或土壤中自身氮素的变化,还是输入外源氮素的氮循环过程,以及CO₂浓度变化引起的碳循环,其中碳、氮相互间的影响机理并不是很清楚。所以在草原生态系统中,对CO₂浓度升高和氮素循环之间的相互关系还有待于进一步探讨。

由于荒漠生态系统是极其脆弱的生态系统,CO₂浓度升高对荒漠生态系统的影响对全球气候变化起着至关重要的作用。目前,对荒漠生态系统中CO₂浓度升高条件下植物或土壤中氮素变化的研究还很少。在该系统中,干旱对植物生长的影响很大。

仅从对氮素的影响上看,干旱可以使植物的氮素代谢发生逆转,蛋白质合成受阻,致使植物在体内积累了较多的非蛋白氮^[71];当水分适宜时,非蛋白氮可以溶于水被植物吸收利用。

有关干旱半干旱地区的农田生态系统中氮素对 CO₂ 浓度升高的响应的研究较多。大气 CO₂ 浓度升高会影响土壤氮的浓度,顶层 10 cm 土壤中氮浓度下降 8%,土壤可交换氮下降^[72]。大气 CO₂ 浓度升高会影响植物叶片和根离体组织的分解速度,但其影响与氮含量密切相关。Gorissen 等^[73] 研究指出,大气 CO₂ 浓度升高时,生长于低氮条件下棉花叶片和根的离体组织分解速度不受影响;而生长于高氮条件下棉花的叶片和根分解速度明显下降。大气 CO₂ 浓度升高,棉花、小麦、高粱、大豆残体的降解受氮的限制,腐烂植物组织中氮的释放减慢^[74]。Rogers 等^[75] 发现,生长在高浓度 CO₂ (550 和 900 μmol/mol) 条件下的棉花叶片氮含量(以干重为单位)要低于正常 CO₂ 浓度的,最多可低 33%;当供氮量增加到 133 mg/(kg (soil) · week) 时,这种现象消失,说明供氮量增加会降低甚至抵消高浓度 CO₂ 对植物叶片氮含量的影响。并且,当氮供应充足时,CO₂ 浓度升高会导致小麦的生物量显著增加;当氮供应受到限制时,生物量的增加较少;氮的供应低到一定程度时,高浓度 CO₂ 对植物生长的促进作用会消失,表现为生物量不增加。Hocking 等^[76] 认为,虽然在高浓度 CO₂ 条件下植物组织中氮的浓度会下降,但植株氮的含量比对照升高,表现为植物对氮的吸收总量在增加。大气 CO₂ 浓度升高使植物对氮需求增加的主要原因是植物生长的加快^[13]。

2.2 CO₂ 浓度升高对碳氮耦合的影响

碳氮耦合过程可能会影响生态系统对大气和气候变化的响应,碳循环和氮循环是密切联系的过程,它们在叶片水平、整个植物水平和生态系统水平上都紧密耦合^[7]。陆地生态系统中的氮主要通过影响植物的光合作用、有机碳的分解以及同化产物在植物器官中的分配,和生态系统对气候变化的响应等影响碳循环过程^[7]。同时,陆地生态系统的碳循环过程为生物固氮、氮矿化、氮硝化和反硝化等过程提供了能量来源^[77]。

CO₂ 浓度升高会直接促进植物的光合作用。植物光合作用的提高、固定碳量的增加,相应的促进了植物对养分的吸收,特别是氮^[9]。Zerihun 等^[78] 指出在高浓度 CO₂ 条件下植物氮的吸收会降低 21%~29%,并且随着 CO₂ 饱和度的增加,光合作用中氮

的利用率也增加了近 50%。植物的光合作用与氮的供应状况^[79] 和叶片氮含量^[80] 密切相关。

土壤有机碳和氮素是土壤养分的重要组成部分,也是生态系统中极其重要的生态因子^[81]。对陆地生态系统而言,可利用氮主要来源于生物固氮和施氮肥。大气 CO₂ 浓度升高会使植物—土壤系统对氮的需求增加,使 C/N 比发生变化。大气 CO₂ 浓度倍增时,植物的 C/N 比可能上升。当植物残体的 C/N 比超过一定数值时,土壤有机碳的矿化过程会因氮素营养不足而受到抑制。植物残体中次生代谢物如酚类物质含量的上升会降低植物残体的腐解速率^[82],使土壤碳储存增加。当氮供应不足时,生态系统生产力会受到影响,进而影响植物及土壤中的 C/N 比。

Gorissen 等^[73] 研究不同 CO₂ 浓度下植物根系的降解率,发现 700 μmol/mol 浓度下生长的植物根系降解率比 350 μmol/mol 下的低得多,其原因可能是由于 CO₂ 浓度升高造成植株 C/N 比增加。Jastrow 等^[83] 研究指出,CO₂ 浓度升高时,地表 5 cm 的牧草根残体和微粒状有机质的 C/N 比增大,15 cm 粉砂质粘土土层 C/N 比有一个小而明显的增加,而地下茎和根的 C/N 比没有受 CO₂ 浓度升高的强烈影响。Roger 等^[84] 认为,大气 CO₂ 浓度升高时,植物活组织中 C/N 平均上升 15%。由此可以看出,大气 CO₂ 浓度升高时,植物及土壤的 C/N 比均升高。

在我国干旱沙区植被恢复区,土壤有机碳和氮含量以及 C/N 比随恢复时间的延长呈现出增加的趋势,在土层垂直方向呈降低趋势,说明在植被恢复过程中土壤碳和氮均存在固存效应,同时表现出植被恢复对碳的截存和延缓大气 CO₂ 浓度升高的贡献^[81]。

3 研究展望

CO₂ 浓度升高以及生态系统对其的响应机制是一个长期的复杂过程。未来的研究应注重 CO₂ 浓度变化与其他生态因子相结合,研究变化的环境条件下生物或者生态系统的适应机制,并且要适当加强研究过程的长期性和连续性。

干旱半干旱区占全球陆地总面积的比例较大,是气候变化最敏感的区域,对其碳循环过程、土壤碳库储量以及影响因素的研究显得更加重要。深入了解干旱半干旱区 CO₂ 浓度变化对生态系统的影响及生态系统对其变化的响应机制是全球气候变化研究的重要内容。笔者认为对于干旱半干旱区未来有关碳

循环的研究应主要集中在以下几个方面:

(1) 干旱半干旱区土壤碳循环过程、土壤碳库的演变特征以及生态系统恢复对陆地生态系统碳汇的贡献。

(2) 大气 CO₂ 浓度升高对植物地上和地下部分各种生理过程的影响机理,特别是地下部分对碳在土壤中的流通以及碳循环的影响,同时要注意植物对 CO₂ 浓度变化的响应机制,并加强对 CO₂ 浓度变化与其他环境因子共同对植物生理变化起作用的机理研究。

(3) 水分是干旱半干旱区主要的限制因子,它与其他影响因子共同对 CO₂ 浓度变化产生响应,应注重水分与其他因子共同作用的机理研究,加强水、碳、氮的耦合研究。

(4) ¹⁴C 同位素在土壤碳循环中的应用很广泛,可以利用该技术测定该区土壤碳库长、短期的变化情况以及土壤碳库的来源。值得重点强调的是,生态系统对 CO₂ 浓度变化的响应是一个长期的过程,对土壤碳的影响更是一个缓慢的过程,因此,对这方面的研究应基于历史,用发展变化的辩证思想进行长期追踪研究。这些研究对预测未来高 CO₂ 浓度下干旱半干旱区的植物生长动态、生态系统生产力演化及其对全球气候变化的响应具有重要意义。

虽然 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响还是研究的热点,但在全世界范围内节能减排政策的影响下,“低碳”已经是人们生活中的重要主题,减少 CO₂ 气体的排放已经成为每个人的责任。虽然每年 CO₂ 浓度还在不断增加,但随着人们认识水平和重视程度的提高,CO₂ 气体浓度保持在某个水平甚至降低都会成为可能。所以在未来的研究方向上,增加 CO₂ 浓度来提高生物量、增加土壤有机碳等方面的研究可能将不会成为重点。但在干旱半干旱地区,水分亏缺确实是影响该区植物生长发育和导致生理生化响应的主要因子,是限制植物生长的关键因素^[85]。为了降低干旱灾害对干旱半干旱地区生态系统的影响,我们要充分利用现有的植物资源来降低不利因素的负面影响。如在陆地生态系统中,C₄ 途径被认为是植物在高温、强光和干旱环境下优势生存的碳同化途径^[86]。C₄ 植物具有高光合速率、耐高温和干旱的特点,是很多 C₃ 植物无法拥有的。虽然 C₄ 植物较少,但其初级生产量约占全球陆地总量的 25% ~ 30%^[87]。所以重视并加强研究干旱区严酷环境条件下生长的 C₄ 植物特性,明确其适应高温、干旱条件的机理,甚至可以将 C₃ 植物通过转变

光合碳同化途径来提高光合效率,进而提高植物生物量,将会对荒漠区植被恢复、生态系统修复和减缓温室效应产生积极意义。

目前世界范围内农作物还是以 C₃ 植物为主,如何提高作物的光合作用效率以达到高产是一个世界性难题。云南生态农业研究所那中元开发的作物基因表型诱导调控表达技术(GPIT)已成功解决了提高作物光合作用效率这一难题,但是否能够将该技术应用于其他生态系统中还有待于进一步研究。目前全球的环境状况是大气 CO₂ 浓度增加、温度升高、干旱加剧。仅从大气 CO₂ 浓度升高的角度来看,对 C₃ 植物是有利的,CO₂ 浓度升高能使 C₃ 植物相对生长速率加快,但可能会对 C₄ 植物的生长产生一些不利的影 响。而从气候变暖和干旱化的加剧方面考虑,又有利于 C₄ 植物的生长。

干旱区生态系统的变化已经成为不容忽视的世界性难题。由于其对环境变化的敏感性高、变化过程快、幅度大等特点,干旱区成为广大学者研究全球变化的重要场所。但复杂的生态环境条件使目前的很多研究都具有片面性。因此,在以后的研究中要尽量考虑多个因素,使试验条件最大限度地接近真实的自然环境。并且,多因素试验还可以用于预测和模拟未来环境条件下各生态系统中生物的变化情况。总之,自然环境总是处于不断变化中,自然界的生物为了适应变化的环境,其本身也会发生一些本能的改变。这些过程不仅需要生物体自身的改变,还需要科研人员的不断努力,去寻求各种方法促进生物的进化和变异,使自然界、生物体、人类和谐、可持续地向更有利于人类生存的方向发展。

参考文献(References):

- [1] Huang Zichen, Shen Weishou. Study on Water Relationship and Tolerance in Arid Area[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2000. [黄子琛,沈渭寿.干旱区植物水分关系与耐旱性[M].北京:中国环境科学出版社,2000.]
- [2] Goudie A S. Techniques for Desert Reclamation[M]. New York: Wiley & Sons, 1990.
- [3] Zhou Weibo. Review on the study of water resources utilization efficiency in irrigation district in arid and semiarid areas of China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(5): 91-96. [周维博.干旱半干旱地域提高灌区水资源综合效益研究进展与思考[J].干旱区资源与环境,2003,17(5): 91-96.]
- [4] Lal R. Carbon sequestration in drylands [J]. *Annals of Arid Zone*, 2000, 39(1): 1-10.
- [5] Prentice I C, Farquhar G D, Fasham M J R, et al. The carbon

- cycle and atmospheric carbon dioxide [C] // Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, *et al.* eds. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 183-237.
- [6] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 87-115.
- [7] Ren Shujie, Cao Mingkui, Tao Bo, *et al.* The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle; A review [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 58-67. [任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 58-67.]
- [8] Pan Hongli, Zhao Xiulan, Xie Zubin, *et al.* Effect on soil micro-ecosystem from free air CO₂ enrichment [J]. *Yunnan Environmental Science*, 2005, 24(4): 6-9. [潘红丽, 赵秀兰, 谢祖彬, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对农田生态系统的影响 [J]. *云南环境科学*, 2005, 24(4): 6-9.]
- [9] Lin Weihong. Response of photosynthesis to elevated atmospheric CO₂ [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18: 121-128. [林伟宏. 植物光合作用对大气二氧化碳浓度升高的反应 [J]. *生态学报*, 1998, 18: 121-128.]
- [10] Ou Zhiying, Peng Changlian. Progress in studies on plant responses to elevated CO₂ [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(2): 190-196. [欧志英, 彭长连. 高浓度二氧化碳对植物影响的研究进展 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2003, 11(2): 190-196.]
- [11] Wang Weimin, Wang Chen, Li Chunjian, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on growth of plants [J]. *Acta Botanica Boreal-Occident Sinica*, 2000, 20(4): 676-683. [王为民, 王晨, 李春俭, 等. 大气二氧化碳浓度升高对植物生长的影响 [J]. *西北植物学报*, 2000, 20(4): 676-683.]
- [12] Jiang Gaoming, Han Xingguo, Lin Guanghui. Response of plant growth to elevated [CO₂]: A review on the chief methods and basic conclusions based on experiments in the external countries in past decade [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(6): 489-502. [蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响——国外十余年来模拟实验研究之主要手段及基本结论 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(6): 489-502.]
- [13] Kimball B A, Manuey J R, Nakayama F S, *et al.* Effects of increasing atmospheric on CO₂ vegetation [J]. *Vegetatio*, 1993, 104/105: 65-75.
- [14] Cure J D, Acock B. Crop responses to carbon dioxide doubling: A literature survey [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38: 127-145.
- [15] Poorter H. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration [J]. *Vegetatio*, 1993, 104/105: 77-79.
- [16] Gao Suhua, Guo Jianping. Responses of *Aneurolepidium Chinen-sis* and *Stipa Baicalensis* to high CO₂ concentration and soil drought [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(6): 12-14. [高素华, 郭建平. 羊草、针茅对高 CO₂ 浓度及土壤干旱的响应 [J]. *水土保持学报*, 2003, 23(6): 12-14.]
- [17] Morgan J A, Legain D R, Mosier A R, *et al.* Elevated CO₂ enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C₃ and C₄ grasses of the Colorado shortgrass steppe [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 451-466.
- [18] Stitt M. Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1991, 14: 311-317.
- [19] Huxman T E, Smith S D. Photosynthesis in an invasive grass and native forb at elevated CO₂ during an El Niño year in the Mojave desert [J]. *Oecologia*, 2001, 128: 193-201.
- [20] Joel G, Chapin F S, Chiariello N R, *et al.* Species-specific responses of plant communities to altered carbon and nutrient availability [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 435-450.
- [21] Grünzweig J M, Körner C. Growth, water and nitrogen relations in grassland model ecosystems of the semi-arid Negev of Israel exposed to elevated CO₂ [J]. *Oecologia*, 2001, 128: 251-262.
- [22] Gao Suhua, Guo Jianping. Responses of some dominant species in Maowusu sandland under high CO₂ concentration to drought stress [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(6): 116-118. [高素华, 郭建平. 毛乌素沙地优势种在高 CO₂ 浓度条件下对土壤干旱胁迫的响应 [J]. *水土保持学报*, 2002, 16(6): 116-118.]
- [23] Hou Shaoli. Mechanical equipment of foreign dry farming [J]. *Adviser of Peasant Families*, 2010, 3: 27. [侯少丽. 国外旱作农业机械化装备 [J]. *农家参谋*, 2010, 3: 27.]
- [24] Shangguan Zhouping, Chen Peiyuan. Future strategies for development of dryland farming in northern China [J]. *Exploration of nature*, 1995, 14(52): 86-89. [上官周平, 陈培元. 中国北方旱地农业发展的若干战略 [J]. *大自然探索*, 1995, 14(52): 86-89.]
- [25] Wang Xiulan, Xu Shihua, Liang Hong. The experimental study of the effects of CO₂ concentration enrichment on growth, development and yield of C₃ and C₄ crops [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(1): 55-61. [王修兰, 徐师华, 梁红. CO₂ 浓度增加对 C₃、C₄ 作物生育和产量影响的实验研究 [J]. *中国农业科学*, 1998, 31(1): 55-61.]
- [26] Gifford R M, Lambers H, Morison J I L. Respiration of crop species under CO₂ enrichment [J]. *Plant Physiol*, 1985, 63: 351-356.
- [27] Ainsworth E A, Leakey A D B, Ort D R, *et al.* FACE-ing the facts: Inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply [J]. *New Phytologist*, 2008, 179(1): 5-9.
- [28] Leakey A D B, Uribealrrea M, Ainsworth E A, *et al.* Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought [J]. *Plant Physiology*, 2006, 140: 779-790.
- [29] Egli D B. Comparison of corn and soybean yields in the United States: Historical trends and future prospects [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 79-88.

- [30] Castro J C, Dohleman F G, Bernacchi C J, *et al.* Elevated CO₂ significantly delays reproductive development of soybean under Free-Air Concentration Enrichment (FACE) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60:2 945-2 951.
- [31] Wu Gang, Chen Fajun, Sun Yucheng, *et al.* Response of cotton to early-season square abscission under elevated CO₂ [J]. *Journal of Agronomy*, 2007, 99:791-796.
- [32] Wong S C. Elevated atmospheric partial pressure of CO₂ and plant growth. II. Nonstructural carbohydrate content in cotton plants and its effect on growth parameters [J]. *Photosynthesis Research*, 1990, 23:171-180.
- [33] Nie G Y, Long S P, Garcia R L, *et al.* Effect of free-air CO₂ enrichment on the development of the photosynthetic apparatus in wheat, as indicated by changes in leaf proteins [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1995, 18:855-864.
- [34] Zhang Jiaen, Liu Wen'gao, Wang Weisheng. Effects of rhizosphere microbes and status of rhizosphere soil nutrients under different vegetations in south subtropical region [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 17(4):38-41. [章家恩, 刘文高, 王伟胜. 南亚热带不同植被根际微生物数量与根际土壤养分状况[J]. 土壤与环境, 2002, 17(4):38-41.]
- [35] Hu Junli, Lin Xiangui, Chu Haiyan, *et al.* A review on soil microbial responses to elevated atmospheric CO₂ concentration [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3):601-605. [胡君利, 林先贵, 褚海燕, 等. 土壤微生物对大气 CO₂ 浓度升高的响应研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(3):601-605.]
- [36] Lamborg M R, Hardy R W F, Paul E A. Microbial effects [C]//Lemon E R, eds. *The Response of Plants to Rising Levels of Atmospheric Carbon Dioxide*. Colorado: Westview Press, 1983:131-176.
- [37] Runion G B, Curl E A, Rogers H H, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment on microbial population in the rhizosphere and phyllosphere of cotton [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 70: 117-130.
- [38] Zak D R, Pregiter U A, Luseher A, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ fine roots and the response of soil micro-organisms a review and hypothesise [J]. *New Phytologist*, 2000, 147: 201-222.
- [39] Rice C W, Garcia F O, Hampton C O, *et al.* Soil microbial response in tallgrass prairie to elevated CO₂ [J]. *Plant and Soil*, 1994, 165:67-74.
- [40] Niklaus P A, Korner C. Responses of soil microbiota of a late successional alpine grassland to longterm CO₂ enrichment [J]. *Plant and Soil*, 1996, 184:219-229.
- [41] Fang Shibo, Feng Ling, Liu Huajie, *et al.* Responses of Biological Soil Crusts (BSC) from arid-semiarid habitats and polar region to global climate change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3 312-3 321. [房世波, 冯凌, 刘华杰, 等. 生物土壤结皮对全球气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3 312-3 321.]
- [42] Li Xinrong, Jia Yukui, Long Liqun, *et al.* Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semiarid regions [J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(1): 4-10. [李新荣, 贾玉奎, 龙立群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干进展 [J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4-10.]
- [43] Beymet R J, Klopatek J M. Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon- juniper woodlands [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1991, 5(2): 187-198.
- [44] Sedia E G, Ehrenfeld J G. Differential effects of lichens, mosses and grasses on respiration and nitrogen mineralization in soils of the New Jersey Pinelands [J]. *Oecologia*, 2005, 144(1): 137-147.
- [45] Deslippe J R, Egger K N, Henry G H R. Impacts of warming and fertilization on nitrogen 2 fixing microbial communities in the Canadian High Arctic [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, 53(3): 41-50.
- [46] Pan G, Guo T. Pedogenic carbonates in aridic soils of China and significance for terrestrial carbon transfer [C]//Lal R, Kimble J, Eswaran H, eds. *Global Climate Change and Pedogenic Carbonates*. USA: Lewis Publishers, 1999:135-148.
- [47] Chen Chunmei, Xie Zubin, Zhu Jianguo. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil carbon [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1):217-222. [陈春梅, 谢祖彬, 朱建国. 大气 CO₂ 浓度升高对土壤碳库的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1):217-222.]
- [48] Cardon Z G, Hungate B A, Cambardella C A, *et al.* Contrasting effects of elevated CO₂ on old and new soil carbon pools [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(3):365-373.
- [49] Xie Z, Cadisch G, Edwards G, *et al.* Carbon dynamics in a temperate grassland soil after 9 years exposure to elevated CO₂ (Swiss FACE) [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(7): 1 387-1 395.
- [50] Hoosbeek M R, Vos J M, Bakker E J, *et al.* Effects of Free Atmospheric CO₂ Enrichment (FACE), N fertilization and poplar genotype on the physical protection of carbon in the mineral soil of a polar plantation after five years [J]. *Biogeosciences*, 2006, 3: 479-487.
- [51] Schlesinger W I. An overview of the carbon cycle [C]//Lai R. *Soil and Global Change*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995:9-25.
- [52] Yang Lifang, Li Guitong, Zhao Xiaorong, *et al.* Profile distribution of soil organic and inorganic carbon in chestnut soils of Inner Mongolia [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(1): 158-162. [杨黎芳, 李贵桐, 赵小蓉, 等. 栗钙土不同土地利用方式下有机碳和无机碳剖面分布特征 [J]. 生态环境, 2007, 16(1):158-162.]
- [53] Schlesinger W H, Pilmanis A M. Plant-soil interactions in deserts [J]. *Biogeochemistry*, 1998, 42: 169-187.
- [54] Pan Genxing. Pedogenic carbonates in aridic soils of china and the significance in terrestrial carbon transfer [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, 22(1):51-57. [潘根兴. 中国干旱地区土壤发生性碳酸盐及其在陆地系统碳转移上的意义 [J]. 南京农业大学学报, 1999, 22(1): 51-57.]
- [55] Pan Genxing, Cao Jianhua, Zhou Yunchao. Soil carbon and its

- significance in carbon cycling of earth surface system [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4):325-334. [潘根兴,曹建华,周运超.土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义[J].第四纪研究,2000,20(4):325-334.]
- [56] Pan Genxing. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5):282-288. [潘根兴.中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J].气候变化研究进展,2008,4(5):282-288.]
- [57] Pan Genxing. Study on carbon reservoir in soils of China [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(5):330-332. [潘根兴.中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J].科学通报,1999,15(5):330-332.]
- [58] Fan Hengwen, Jia Xiaohong, Zhang Jingguang, et al. Influence of soil degradation and desertification on soil carbon cycling in arid zones [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(6):525-533. [樊恒文,贾晓红,张景光,等.干旱区土地退化与荒漠化对土壤碳循环的影响[J].中国沙漠,2002,22(6):525-533.]
- [59] Hu S X. The development of sierozem and environmental changes during Holocene in Lanzhou region [C] // Gong Z T. Environment Change of Soil. Beijing: China Science & Technology Press, 1992.
- [60] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304: 1 623-1 627.
- [61] Scholes B. Will the terrestrial carbon sink saturate soon [J]. *IG-BP Global Change New Letter*; 1999, 37:2-3.
- [62] Trumbore S E. Constrains on below-ground Carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 66: 1 930-1 946.
- [63] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emission from soil in response to global warming [J]. *Science*, 2000, 290:291-296.
- [64] Van Breemen N, Feijtel T C J. Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic system [C] // Bouwman A F. Soil and Greenhouse Effect. Chichester: John Wiley and Sons, 1990:195-224.
- [65] Yang Jianglong. The relationship between atmospheric CO₂ and plant nitrogen nutrition [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2):163-166. [杨江龙.大气 CO₂ 与植物氮素营养的关系[J].土壤与环境,2002,11(2):163-166.]
- [66] Pettersson R, McDonald A J S. Effects of nitrogen supply on the acclimation of photosynthesis to elevated CO₂ [J]. *Photosynthesis Research*, 1994, 39:389-400.
- [67] Xu Zhenzhu, Zhou Guangsheng. Progress in studies on terrestrial plant to global change [J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(2): 113-119. [许振柱,周广胜.陆生植物对全球变化的适应性研究进展[J].自然科学进展,2003,13(2):113-119.]
- [68] Zenetti S, Hartwig U A, Kesel C V, et al. Does nitrogen nutrition restrict the CO₂ response of fertile grassland lacking legumes? [J]. *Oecologia*, 1997, 112: 17-25.
- [69] Lüscher A, Hendrey G R, Nösberger J. Long-term responsiveness to free air CO₂ enrichment of functional types, species and genotypes of plants from fertile permanent grassland [J]. *Oecologia*, 1998, 113: 37-45.
- [70] John H M, Thornley, Melvin G R C. Dynamics of mineral N availability in grassland ecosystems under increased [CO₂]: Hypotheses evaluated using the Hurley Pasture Model [J]. *Plant and Soil*, 2000, 224:153-170.
- [71] Huang Zichen. Effects of aridity on water balance and N metabolism of sand-stabilizing plants [J]. *Acta Botanica*, 1979, 21: 314-319. [黄子琛.干旱对固沙植物的水分平衡和氮素代谢的影响[J].植物学报,1979,21:314-319.]
- [72] Roser M, Bert G D. The influence of atmospheric CO₂ enrichment on plant-soil nitrogen interactions in a wetland plant community on the Chesapeake Bay [J]. *Plant and Soil*, 1999, 210: 93-101.
- [73] Gorissen, Cotrufo M E. Decomposition of leaf and root tissue of three perennial grass species grown at two levels of atmospheric CO₂ and N supply [J]. *Plant and Soil*, 2000, 224: 75-84.
- [74] Torbert H A, Prior S A, Rogers H H, et al. Review of elevated atmospheric CO₂ effects on agro-ecosystems: Residue decomposition processes and soil C storage [J]. *Plant and Soil*, 2000, 224: 59-73.
- [75] Rogers G S, Milham P J, Thibaud M C. Interactions between rising CO₂ concentration and nitrogen supply in cotton. I. Growth and leaf nitrogen concentration [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1996, 23:119-125.
- [76] Hocking G P J, Meyer C P. Carbon dioxide enrichment decreases critical nitrate and nitrogen concentration in wheat [J]. *Journals of Plant Nutrition*, 1991, 14: 571-584.
- [77] Shen Yungang. The Most Important Chemical Reaction on Earth-Photosynthesis [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2000: 32-93. [沈允钢.地球上最重要的化学反应—光合作用[M].北京:清华大学出版社,2000:32-93.]
- [78] Zerihun A, Gutschick V P, Bassirrad H. Compensatory roles of nitrogen uptake and photosynthesis N-use efficiency in determining plant growth response to elevated CO₂: Evaluation using a functional balance model [J]. *Annals of Botany*, 2000, 86:723-730.
- [79] Li Weimin, Zhou Lingyun. Physiological and ecological responses of wheat leaves to soil water and nitrogen (I) Effects of soil water and nitrogen on wheat photosynthesis and water use efficiency [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(2):136-142. [李卫民,周凌云.水肥(氮)对小麦生理生态的影响(I)水肥(氮)条件对小麦光合蒸腾与水分利用的影响[J].土壤通报,2004,35(2):136-142.]
- [80] Anten N P R, Werger M J A, Medina E. Nitrogen distribution and leaf area indices in relation to photosynthetic nitrogen use efficiency in savanna grasses [J]. *Plant Ecology*, 1998, 138:63-75.
- [81] Jia Xiaohong, Li Xinrong, Li Yuanshou. Soil organic carbon and nitrogen dynamics during the re-vegetation process in the arid desert region [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(1):66-

74. [贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复中土壤碳氮变化规律[J]. 植物生态学报,2007, 31(1):66-74.]
- [82] Wang Xingfen, Bai Kezhi, Kuang Tingyun. Responses of plant dark respiration to doubled CO₂ concentration [J]. *Acta Botanica Sinica*,1997, 39(9):849-854. [汪杏芬,白克智,匡廷云. 大气 CO₂ 浓度倍增对植物暗呼吸的影响[J]. 植物学报,1997, 39(9):849-854.]
- [83] Jastrow J D, Miller R M, Owsby C E. Long-term effects of elevated atmospheric CO₂ on below-ground biomass and transformations to soil organic matter in grassland [J]. *Plant and Soil*, 2000, 224: 85-97.
- [84] Roger M G, Damian J B, Jason L L. The effects of elevated [CO₂] on the C/N and C/P mass ratios of plant tissues [J]. *Plant and Soil*,2000, 224:1-14.
- [85] Biehler F, Biehler K, Fock H. Evidence for the contribution of the Mehler-peroxidase reaction in dissipating excess electrons in drought stressed wheat [J]. *Plant Physiology*, 1996, 112:265-272.
- [86] Hatch M D. C₄ photosynthesis: An unlikely process full of surprises[J]. *Plant & Cell Physiology*, 1992, 33:333-342.
- [87] Gillon J, Yakir D. Influence of carbonic anhydrase activity in terrestrial vegetation on the ¹⁸O content of atmospheric CO₂ [J]. *Science*,2001, 291:2 584-2 587.

Effect of Elevated CO₂ on Ecosystem and C-N Coupling in Arid and Semi-arid Region

Yin Feihu¹, Li Xiaolan¹, Dong Yunshe^{1,2}, Xie Zongming¹,
Gao Zhijian¹, He Shuai¹, Liu Changyong¹

(1. *Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China;*

2. *Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)*

Abstract: Atmospheric CO₂ concentrations had increased from approximately 280 μmol/mol in the late 19th century to over 360 μmol/mol today. Elevated CO₂ not only pricked up global greenhouse effect, but also changed the C balance of global ecosystems, which led to the changes of ecosystem structure and function. Alterations in microbial mineralization and nutrient cycling may control the long-term response of ecosystems to elevated CO₂. Elevated CO₂ concentrations influenced carbon cycle, ecosystem productivity, plant, soil, microbe, and other environmental factors. The effects of elevated CO₂ on growth were highly dependent on interactions with N cycling. Particularly important was the effect of elevated CO₂ on N cycling and availability because shortages in N could eventually attenuate the increased plant biomass production seen in short-term elevated CO₂ studies. Changes in microbial biomass C and N, microbial activity and inorganic N could indicate the effects of elevated CO₂ on N dynamics. Increases in N-use efficiency tended to increase the C/N ratio of plant materials grown in elevated CO₂. The purpose of this paper is to summarize the changes of ecosystems and C-N coupling due to the increasing atmospheric CO₂ concentration in order to lucubrate to carbon cycle and nitrogen cycle in arid and semi-arid region.

Key words: Arid and semi-arid region; CO₂ concentrations; Ecosystem; C-N coupling.