

地质封存 CO₂ 泄漏对农田生态系统的影响评估及耐受阈值

伍 洋^{1,2}, 马 欣^{1,2*}, 李玉娥^{1,2}, 万运帆^{1,2}, 张九天³, 仲 平³, 贾 莉³

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081; 3. 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038)

摘 要: 碳捕获与封存 (carbon capture and storage, CCS) 是全球碳减排的重要战略性技术, 但封存 CO₂ 泄漏对地表生态系统的严重威胁是 CCS 活动的重要障碍之一。该研究选择受封存 CO₂ 泄漏威胁的农田生态系统作为研究对象, 通过运用人工控制手段模拟地质封存 CO₂ 泄漏到达地表的系列情景, 监测农田生态系统主要指标变化, 评估和确定封存 CO₂ 泄漏对农田生态系统的影响和耐受阈值。研究结果表明, 不同泄漏情景下玉米均受到不同程度的不利影响, 并且泄漏通量越大, 影响程度越深: CO₂ 泄漏情景下的玉米出苗受到严重阻碍, 株高和叶片数随泄漏通量增大而呈逐渐减小的趋势, 地上部和地下部生物量较对照情景明显减少, 光合作用受到干扰, 土壤 pH 值降低。500~2 000 g/(m²·d) 范围内的泄漏情景为玉米对地质封存 CO₂ 泄漏的耐受阈值。

关键词: CO₂, pH 值, 地质, 碳捕获与封存, 农田生态系统, 影响评估, 耐受阈值

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.035

中图分类号: P618.13, S181

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-02-0196-10

伍 洋, 马 欣, 李玉娥, 等. 地质封存 CO₂ 泄漏对农田生态系统的影响评估及耐受阈值[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 196-205.

Wu Yang, Ma Xin, Li Yu'e, et al. Impact assessment and tolerable threshold value of CO₂ leakage from geological storage on agro-ecosystem[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 196-205. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

碳捕获与封存 (carbon capture and storage, CCS) 作为一项新兴的、具有大规模碳减排潜力的技术, 有望成为未来全球应对气候变化、实现低碳经济转型的重要环节, 是全球减排的重要战略性技术^[1]。2010 年 12 月, 在墨西哥坎昆举行的联合国气候变化谈判大会通过了《将地质形式的 CCS 作为 CDM 项目活动》的协议, 预示着 CCS 将进入快速发展期。中国作为世界上最大的发展中国家, 正处在快速工业化和城市化的关键发展时期, 特别是以煤炭为主的能源结构短期内难以改变, 面临着发展经济和积极应对气候变化的双重压力^[2]。而 CCS 具有对经济发展影响较小、减排效果显著的特点, 开展 CCS 项目的技术研发与示范, 形成战略性技术储备, 对中国具有非同寻常的意义^[3]。但是目前的 CCS 工程存在 CO₂ 泄漏的风险^[4], 如果封存在盐水层或废弃油气矿床等地质构造中的 CO₂ 通过断层、断裂或人工钻探口泄漏到地表, 将会抵消 CCS 对于减缓气候变化的贡献^[5], 更重要的是鉴于 CCS 项目的空间规模, 短期或长期的泄漏都可能会对当地的健康、安全和环境造成显著的影响^[6-8]。同时,

由于中国生态环境脆弱、气象和地质灾害频发, CCS 技术在中国的风险要远高于其他地区^[9], 实际上, 由于担心封存 CO₂ 泄漏引发的生态环境问题而导致的公众反对已经成为 CCS 活动的重要障碍之一^[10]。因此, 在不同时空尺度下研究地质封存 CO₂ 泄漏对地表生态系统的影响, 特别是确定生态系统的耐受阈值, 对于理解封存 CO₂ 泄漏环境影响的机理, 为决策和管理者定量评估 CCS 风险和制定气候变化减缓对策, 引导公众正确对待 CCS 活动, 都有十分重要的意义。

以往气候变化影响的研究多集中于大气 CO₂ 浓度升高对农业生态系统的影响^[11-12], 而关于由地下土壤深层向上迁移的 CO₂ 气体导致土壤层中 CO₂ 浓度升高的影响研究, 相比于前者要少得多^[13]。世界上第一个把 CO₂ 捕获与封存和温室气体减排概念相结合在一起的是始于 20 世纪 90 年代中期的挪威 Sleipner 项目^[14-15]。虽然 CO₂ 捕获与封存概念经历了大约 25 a 的研究取得了很大进展, 国内外学者对地质封存 CO₂ 的长期性和安全性问题也做了不少相关研究和报道^[16-17], 封存 CO₂ 发生泄漏和迁移的过程可以通过 CO₂ 传感器或者同位素示踪剂来准确地跟踪监测^[18-19]甚至模型模拟^[20], 但是关于 CO₂ 在其泄漏过程中对地表生态系统的影响却并没有出现较完善和统一的结论。目前, 有关地质封存 CO₂ 泄漏对生态环境影响的研究主要分为 2 个思路: 一是基于地下深处释放的 CO₂ 天然试验地, 例如地热活跃区^[21-22]、火山活跃区^[23-25]和天然 CO₂ 温泉^[26], 当这些天然 CO₂ 释放源附近的土壤 CO₂ 浓度达到毒性级时, 植物叶片光合作用降低、提前衰老^[27-28]甚至死亡^[29]。Beaubien 等^[22]对意大利中部地中海

收稿日期: 2011-07-26 修订日期: 2011-08-10

基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAC08B03)

作者简介: 伍 洋 (1986-), 男, 四川仁寿人, 主要从事气候变化影响与温室气体排放研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: williamwu.work@gmail.com

*通信作者: 马欣 (1980-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事农业生态与环境影响、气候变化影响与适应研究。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: max@ami.ac.cn

草原生态系统上一个由深层地热形成的通气口展开研究发现, 距离通气口中心 6 m 宽的范围内没有植物生长, 由中心向外形成了一个近似 20 m 宽的环形过渡区, 沿径向由中心向外穿过这个过渡区后生态系统的各物理参数逐渐回归到背景值。然而这类天然试验地无法与工业级别的 CCS 封存库相比较, 而且长时期暴露在高浓度 CO₂ 环境后, 生态系统可能已经完成了适应和恢复过程^[22], 无法评估影响发生的全过程; 二是基于定量模拟 CO₂ 泄漏的人工控制装置, 这正逐渐成为当前研究地质封存 CO₂ 泄漏对生态系统影响的热点, 目前正在运作的 2 个大规模人工控制试验系统分别是英国诺丁汉大学的人造土壤气体和响应监测 (artificial soil gassing and response detection, ASGAR) 和美国蒙大拿州立大学的零排放研究和技术中心 (zero emission research and technology center, ZERT)。例如, 利用 ASGAR, Patil 等^[30]以 1 L/min 的流速往牧草地和冬豆休耕地下连续注入 CO₂ 气体, 并运用基础生物技术去监测生态系统对“泄漏”的响应, 结果显示通气小区受到了明显的压力征兆; West 等^[31]发现单子叶植物比双子叶植物具有更大的耐受性, 并且不同深度的土壤气体通量不能直接与地表泄漏通量相联系, 注入土壤中的 CO₂ 大概只有 1/3 在地表试验区边界内被观测到。而 ZERT 对深入研究泄漏 CO₂ 在近地表的时空变化起到了很好的作用^[19,32]。但这些人控制试验都存在特定性, 对现实可能泄漏情景的多样性考虑不够, 而且分析的时空尺度不同, 其结果很难具有可比性。然而, 此类人工试验方法的构建思想以及基于现实模拟的特点, 使其在未来评估 CCS 泄漏风险的研究方面具有十分重要的借鉴意义^[33]。

地质封存 CO₂ 泄漏对地表生态系统的影响机理较为复杂, 国外开始有学者对此进行不少相关研究^[22,30-31], 但仍处于起步阶段, 因为这些试验大多都基于天然 CO₂ 释放源或人工恒定速率的 CO₂ 泄漏源, 缺少基于不同泄漏情景下的基础信息和数据^[7,34]。而国内在 CCS 风险评估方面的试验研究尚未见报道, 随着未来中国 CCS 项目的陆续实施, 开展定量模拟试验势在必行。在此背景下, 本研究通过构建人工封存 CO₂ 泄漏模拟装置, 运用人为控制手段, 模拟地质封存 CO₂ 泄漏到地表生态系统的不同情景, 通过地表生态系统对不同泄漏情景的响应, 更好地理解封存 CO₂ 泄漏对地表生态系统的潜在风险, 确定地表生态系统对 CO₂ 泄漏的耐受阈值, 深化对封存 CO₂ 泄漏环境影响机理的理解, 为正在实施和规划中的 CCS 示范项目提供环境影响评估的定量标准, 为政府和相关机构提供决策依据。基于代表性和广泛性的考虑, 以及农田生态系统的植物类型和结构单一、对外界变化的响应具有高度的一致性等特点, 本文选择以玉米为代表的农田生态系统作为试验对象。

1 封存 CO₂ 泄漏人工控制模拟平台与研究方法

1.1 封存 CO₂ 泄漏人工控制模拟平台

封存 CO₂ 泄漏人工控制模拟平台的基本原理是构建一组相互独立的简单生态系统, 通过人工控制的方式从

土壤中以不同速率释放 CO₂ 气体, 形成不同的土壤 CO₂ 通量, 模拟封存 CO₂ 泄漏的不同情景。通过一套观测系统记录不同模拟情景下对各个生态系统的影响, 评估封存 CO₂ 泄漏对地表生态系统的影响。模拟平台由简单生态系统、人工 CO₂ 控制释放装置、监测记录系统和管理等部分构成 (图 1)。

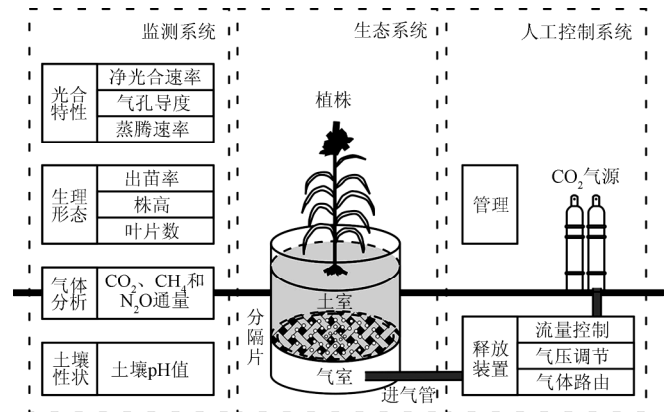


图 1 人工控制模拟平台示意图

Fig.1 Schematic of manual control simulation platform

人工 CO₂ 控制释放装置包括试验容器 (土室、透气性分隔片、CO₂ 气室)、导管、流量计和 CO₂ 气源组成。其中, 透气性分隔片把供作物生长的土室和均匀释放 CO₂ 气体的气室分隔开来, 以确保气室的 CO₂ 气体均匀分布地进入土室的土壤; 土室上部开口直径 40 cm、土室下部 (即圆形分隔片) 直径 36 cm, 土室高 33 cm, 而气室高 17 cm; CO₂ 气体通过导气管进入气室, 利用流量计控制其注入速率。

监测记录系统由作物形态生理测量、土壤 pH 值测量、光合作用气体交换参数测量等组成。主要使用便携式土壤原位酸碱度测量仪 (IQ Scientific Instruments 150, 美国)、LI-6400XT 便携式光合作用测量系统 (LI-COR 公司, 美国) 等观测设备。

试验地点为中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所试验站 (40°13'N, 116°14'E), 为温带半湿润季风型大陆性季风气候, 年平均气温 11~12℃, 年平均降水量约 640 mm, 年平均日照时数是 2 000~2 800 h, 年均无霜期是 190~195 d, 年均风速 1.8~3 m/s。玉米选用玉米杂交种“京科糯 2000”, 土壤为当地农田地下约 0~20 cm 的褐土, 基肥按每公顷施 315 kg (N 135 kg、P₂O₅ 45 kg、K₂O 135 kg) 纯养分、氮磷钾质量比为 3:1:3^[35]; 分别称取 50 kg 已施基肥的土壤装入各个盆钵, 压实, 使得土壤厚度均为 30 cm。试验前土壤 pH 值为 7.43, 有机质质量分数为 32.8 mg/g, 碱解氮质量分数为 79.8 mg/kg、速效磷质量分数为 91.1 mg/kg、速效钾质量分数为 115.4 mg/kg, 土壤质地为中壤土, 田间持水率为 26%, 土壤体积质量为 1.32 g/cm³^[36]; 水分按常规管理, 2010 年 9 月 6 日追肥 1 次, 每盆施 1.5 g 尿素。

1.2 研究方法

1.2.1 泄漏情景的设置

整个试验时间为 2010 年 8 月 12 日至 10 月 18 日,

CO₂ 泄漏时间开始于 9 月 12 日直至试验结束, 其中: 主要试验是在 8 月 12 日第 1 次播种后直到 10 月 18 日之间进行, 研究生长初期 CO₂ 泄漏对作物形态参数、生物量、光合特性及土壤 pH 值等的影响; 补充试验是在 9 月 22 日第 2 次播种至 10 月 18 日之间进行, 研究播种期 CO₂ 泄漏对作物出苗率的影响。

由于本研究试图寻找农业生态系统对封存 CO₂ 泄漏的耐受水平, 因此把泄漏 CO₂ 通量和速率作为度量其对农业生态系统影响的关键指标^[8], 共设置了 6 种可能泄漏情景, 包括 5 种存在泄漏情景和 1 个无泄漏对照情景(表 1)。结合国外相关研究成果^[22,31]以及尽量将玉米对泄漏 CO₂ 的耐受阈值包含在内的原则, 6 个泄漏情景之间的通量梯度设置得较宽, 试验中每种情景重复 3 次。

表 1 不同泄漏情景下的 CO₂ 注入通量与注入速率

Table 1 CO₂ injection rate and injection flux under different leakage scenarios

泄漏情景	CO ₂ 注入通量/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)	CO ₂ 注入速率/(mL·min ⁻¹)
CK	0	0
G500	500	20
G1000	1000	40
G2000	2000	79
G4000	4000	159
G8000	8000	318

注: CO₂ 注入通量计算公式为 $F=v \cdot \rho / s$, 式中, F 为 CO₂ 注入通量, g/(m²·d); v 为 CO₂ 注入速率, mL/min; ρ 为常压下 CO₂ 密度, 约为 1.977 g/L; s 为钵钵横截面面积, 约为 0.113 m²。

1.2.2 指标测定方法

出苗率: 9 月 12 日 CO₂ 开始泄漏后, 于 9 月 22 日往每个钵钵里各播种 20 颗, 开始对出苗率进行记录, 至 10 月 18 日结束。

植物形态: 自二叶期开始对玉米株高、叶片数进行采样和测定。对于株高, 选择全展叶的最长叶测定; 对于叶片数, 记录可见叶数、全展叶数和枯叶数。

生物量: 10 月 18 日生长季末期, 用水缓缓冲走钵钵里的土壤, 取出整株玉米, 分别称量地上部和地下部鲜质量, 烘干后再测定地上部和地下部干质量。

光合作用气体交换参数: 采用 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统(LI-COR 公司, 美国)对穗位叶进行测定。从 9 月 12 日开始, 选择晴朗无云天气, 在 10:30—13:30 时段进行。采用开路式气路, 进气口缓冲瓶 CO₂ 浓度、叶温、湿度均与环境背景值一致, 用 LED 红/蓝光源控制光合有效辐射为 1000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

土壤 pH 值: 由便携式土壤原位酸碱度测量仪(IQ scientific instruments 150, 美国)测定, 每隔 3 d 测定 1 次; 另外, 每隔 14 d 左右, 对来自每个情景(深 0~15 cm)的一个土壤样本进行收集, 用当地土壤回填并做上标记以避免重复使用。

1.2.3 分析方法

通过测定玉米的出苗率、株高、叶片数、地上部和地下部生物量、光合作用气体交换参数等植物形态生理指标以及土壤 pH 值等土壤学指标, 对比不同泄漏情景之间各指标的改变, 来反映出封存 CO₂ 泄漏对地表农业生

态系统的影响。再对试验数据采用单因素方差分析, 确定各种泄漏情景之间的影响是否差异显著, 进而确定地表农业生态系统对 CO₂ 泄漏的耐受阈值。

叶片水分利用效率(water use efficiency, WUE)主要是由叶片净光合速率(net photosynthetic rate, Pn)和蒸腾速率(transpiration rate, Tr) 2 个变量来确定, 任何影响这 2 个生理指标的因素都会影响叶片 WUE^[37], 其计算公式如下:

$$WUE = Pn / Tr \quad (1)$$

式中, WUE 为水分利用效率, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$; Pn 为净光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Tr 为蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

采用 Microsoft Excel 2007 进行试验数据的处理及作图; 采用 SPSS 18.0 统计软件进行方差分析, 可信度水平取 95%, 多重比较的显著性检验均采用 Duncan's 新复极差法。

2 结果与分析

2.1 不同 CO₂ 泄漏情景下玉米出苗率

播种期 CO₂ 泄漏试验中, 泄漏情景 G500、G1000、G2000、G4000 和 G8000 的出苗率逐渐下降, 与对照情景 CK 相比, 情景 G500、G1000 和 G2000 的出苗率分别降低 54.1%、70.9% 和 95.9%, 情景 G4000 和 G8000 的出苗率降为 0, 对照出苗率与各 CO₂ 泄漏情景下的出苗率差异极显著($P < 0.01$)。同时, 情景 G500、G1000 与 G2000、G4000、G8000 的出苗率之间的差异也达到极显著水平。表明玉米在早期出苗阶段对 CO₂ 气体泄漏非常敏感, 它会延缓出苗时间、降低出苗率, 而且随着不同情景之间泄漏通量的增大, 影响趋于严重: 500 g/(m²·d) 的泄漏通量便让出苗受到极显著的抑制, 已经达到本试验所设置的 5 种存在泄漏情景中的阈值下限; 当达到 2 000 g/(m²·d) 的泄漏通量时, 出苗率仅为 3.3% (表 2)。

表 2 不同 CO₂ 泄漏情景下玉米出苗率

Table 2 Seedling ratio of maize under different CO₂ leakage scenarios

泄漏情景	出苗率/%			比 CK 低/%
	10 月 8 日	10 月 13 日	10 月 18 日	
CK	35.0	76.7	80.0 a	0
G500	16.7	35.0	36.7 b	54.1
G1000	1.7	13.3	23.3 b	70.9
G2000	0	0	3.3 c	95.9
G4000	0	0	0 c	100.0
G8000	0	0	0 c	100.0

注: 同一列数值后不同字母表示情景间差异极显著($P < 0.01$)。下同。

2.2 不同泄漏情景玉米株高和叶片数变化

生长初期 CO₂ 泄漏试验中, 泄漏情景下的玉米株高增长速度减缓且显露差异(表 3)。受不同 CO₂ 泄漏情景的影响, 玉米株高增长量呈递减趋势——生长季末期(10 月 18 日), 包括 CK 情景在内的所有钵钵玉米已经停止生长, 情景 G500、G1000、G2000、G4000 和 G8000 的株高增长量(10 月 15 日与 9 月 11 日相比)分别是对照情景增长量的 92.8%、72.2%、53.4%、37.0% 和 14.2%, 可见 CO₂ 泄漏通量越大, 玉米株高越矮。对 CO₂ 泄漏前后玉米的株高进行方差分析可知, 没有发生泄漏时, 所

有情景之间均无显著差异($P < 0.05$)。CO₂ 泄漏 6 d 后, 情景 G8000 与其他情景产生极显著差异($P < 0.01$); 泄漏时间达到 10 d 时, 情景 G4000 与 CK 对照、情景 G500、G1000 差异极显著; 26 d 后, 情景 G2000 与 CK 对照、G500、G1000 之间也产生极显著差异。这说明 CO₂ 泄漏通量越大, 玉米的生长越早受到减缓甚至停止。但是, 整个试验过程中, 株高在 CK 对照、情景 G500、G1000 这三者之间并无统计上的显著性差异, CO₂ 泄漏通量达到 2 000 g/(m²·d) 时株高才极显著地下降。这表明玉米株高在 2 000 g/(m²·d) 的泄漏通量下即已达到 5 种存在泄漏情景中的阈值下限; 在 CO₂ 泄漏通量到达一定程度 (1 000 g/(m²·d)) 之前, 株高不会受到明显抑制。

表 3 不同泄漏情景对玉米株高的影响

Table 3 Impact of different leakage scenarios on plant height of maize

泄漏情景	株高/cm				
	9月11日	9月17日	9月21日	10月7日	10月15日
CK	112.8±3.7 ab	132.7±2.7 a	139.8±2.3 a	156.0±1.8 a	164.6±1.9 a
G500	110.5±3.2 ab	128.7±2.8 a	136.7±2.1 a	152.2±0.9 a	157.6±0.5 a
G1000	117.3±1.6 a	133.6±2.2 a	139.6±2.3 a	153.5±3.0 a	156.2±2.8 a
G2000	112.6±2.0 ab	126.1±2.1 a	131.3±1.7 ab	139.5±2.0 b	140.2±1.4 b
G4000	108.4±3.2 ab	121.2±2.1 a	124.4±1.6 b	127.1±2.2 c	126.8±2.2 c
G8000	99.7±4.6 b	106.1±4.7 b	105.5±4.5 c	106.5±5.1 d	106.2±5.5 d

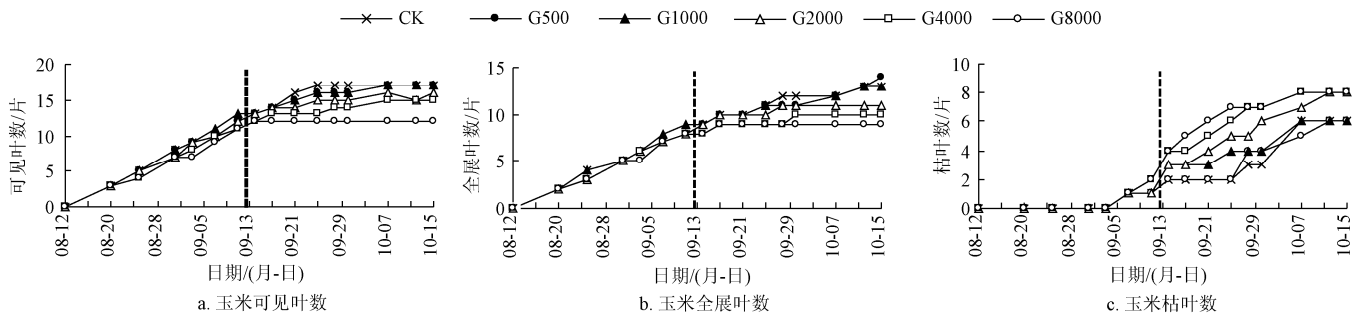
注: ±表示标准误差($n=3$)。

不同泄漏情景下, 玉米可见叶数和全展叶数对 CO₂ 泄漏的响应与株高类似, 而枯叶数的响应则相反(图 2)。可以看到, 10 月 15 日 CK 对照、情景 G500 和 G1000 的可见叶最多, 比情景 G8000 多 41.7%。统计分析表明,

就可见叶数、全展叶数和枯叶数三者总体而言, CK 对照、情景 G500 和 G1000 与其他情景差异极显著($P < 0.01$), 而这 3 个情景之间无显著差异, 表明 CO₂ 泄漏通量达到 2 000 g/(m²·d) 时, 玉米叶片数增长已经受到极显著的抑制, 达到 5 种存在泄漏情景中的阈值下限。

2.3 不同泄漏情景玉米地上部和地下部生物量分析

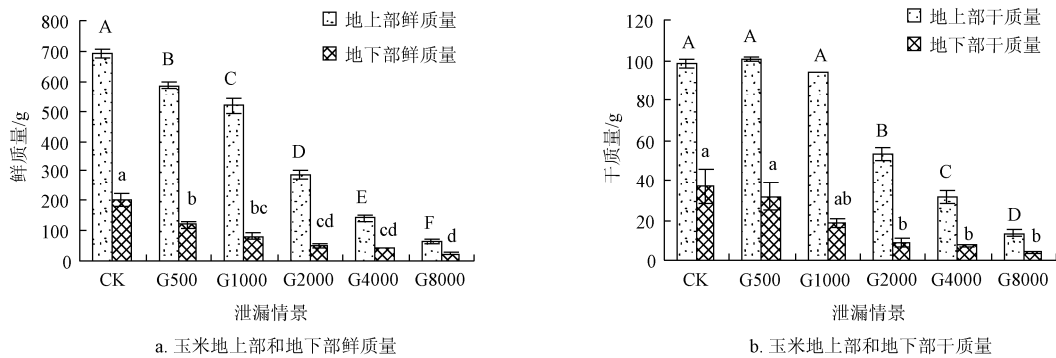
生长初期 CO₂ 泄漏试验中, 玉米地上部和地下部生物量对 CO₂ 泄漏也有明显的阈值响应(图 3): 玉米地上部和地下部的鲜质量、干质量均以情景 G8000 最低(地上部鲜质量 65 g, 地下部鲜质量 24 g, 地上部干质量 14 g, 地下部干质量 4 g), 极显著低于最高的对照情景(地上部鲜质量 691 g, 地下部鲜质量 200 g, 地上部干质量 98 g, 地下部干质量 37 g)。CO₂ 泄漏通量达到 500 g/(m²·d) 之后, 玉米地上部和地下部的鲜质量极显著降低, 但是干质量并无显著性差异; 当 CO₂ 泄漏通量达到 1 000 g/(m²·d) 的泄漏情景时, 地下部干质量与 CK 对照产生显著差异($P < 0.05$), 情景 G1000、G2000、G4000、G8000 的地下部干质量分别是 CK 对照的 50.8%、23.7%、19.4%、10.9%, 而地上部干质量与对照情景无显著差异, 情景 G1000 的地上部干质量是 CK 对照的 96.1%; 直到 CO₂ 泄漏通量达到 2 000 g/(m²·d) 时, 地上部和地下部干质量才与 CK 对照产生极显著差异, 此时情景 G2000、G4000、G8000 的地上部干质量分别是 CK 对照的 54.3%、31.7%、13.8%。这表明, 在 CO₂ 泄漏通量达到一定程度之前, 地上部和地下部干质量并不会受到明显抑制, 地下部相比较于地上部来说对 CO₂ 泄漏更敏感。



注: 垂直误差线表示标准误差($n=3$)。虚线表示 CO₂ 泄漏起始时间, CK、G500、G1000、G2000、G4000、G8000 见表 1, 下同。

图 2 不同泄漏情景下玉米叶片数的变化

Fig.2 Dynamics of leaf number of maize under different leakage scenarios



注: 具有不同字母的柱体表示情景间差异极显著($P < 0.01$)。

图 3 生长季末期不同泄漏情景对玉米地上部和地下部生物量的影响

Fig.3 Impact of different leakage scenarios on above-ground and below-ground biomass of maize during the late growing season

2.4 不同泄漏情景玉米光合特性变化

光合作用的气体交换参数主要涉及净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 这 3 个指标^[38]。生长初期 CO_2 泄漏试验中, CO_2 泄漏对以上指标的动态变化也有明显影响, 且不同泄漏情景间存在差异 (图 4)。与泄漏前 1 d 相比, CK 对照、情景 G500、G1000、G2000、G4000 和 G8000 在生长季末期的净光合速率分别减少了 7.5%、37.3%、57.2%、98.0%、97.1% 和 99.2%。对照情景的净光合速率基本保持稳定, 情景 G500 和 G1000 的净光合速率在 CO_2 开始泄漏后的前 4 d 内减少近 50% 之后

也趋于稳定, 情景 G2000、G4000 和 G8000 的净光合速率在 CO_2 泄漏后逐渐趋近于 0。气孔导度、蒸腾速率的变化趋势与净光合速率类似。对这 3 个指标进行方差分析, 可以看出, 对照情景的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均为最大, 与情景 G500、G1000 和 G2000 差异极显著 ($P < 0.01$)。情景 G2000、G4000 和 G8000 的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率基本趋近于 0, 这 3 个情景之间均无显著差异。这表明玉米光合作用对 CO_2 泄漏同样非常敏感, CO_2 泄漏通量越大, 玉米光合作用受抑制程度越大, 当达到 $2\ 000\ g/(m^2 \cdot d)$ 的泄漏通量时光合作用几乎停止。

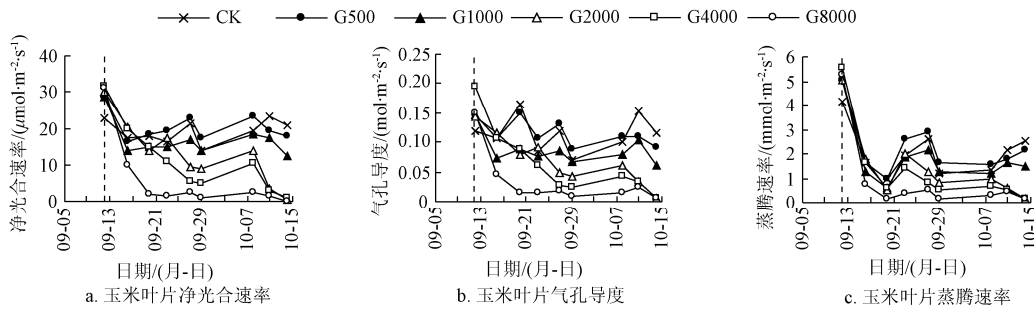


图 4 不同泄漏情景玉米净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的变化

Fig.4 Dynamics of net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency of maize under different leakage scenarios

2.5 不同泄漏情景土壤 pH 值变化

土壤 pH 值是一个很重要的土壤指标, 大部分土壤中进行的化学反应和化学过程都要受到土壤 pH 值的影响, 它制约着植株和各种土壤微生物所需养分的效力, 控制着土壤里各种化学物质的行为^[39]。从图 5 可以看到, 受生长初期 CO_2 泄漏的影响, 泄漏情景下的土壤 pH 值普遍降低, 而对照情景的土壤 pH 值基本保持稳定趋势。与没有发生泄漏时 (9 月 11 日) 的数值相比, 情景 G500、G1000、G2000、G4000 和 G8000 在泄漏情景下的生长季末期 (10 月 15 日) 的土壤 pH 值分别减少了 1.9%、5.4%、7.8%、11.5%、11.8% 和 9.5%, 可见 CO_2 泄漏通量越大, 土壤酸化程度越大。但是, 试验结果同时显示, 所有情景间 pH 值的差异还未达到显著性水平 ($P < 0.05$)。

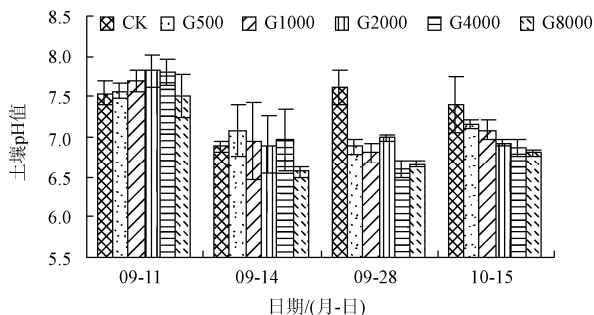


图 5 受不同泄漏情景影响的土壤 pH 值

Fig.5 Soil pH value as influenced by different leakage scenarios

2.6 玉米在不同泄漏情景下的受影响程度和耐受阈值

在生长季末期, 对呈现在上述图表里的 6 种可能泄漏情景下不同植物生理指标的变化进行比较, 可以

看到: 对同一指标, CO_2 泄漏通量越大, 该指标受影响程度越大; 对不同指标, 令植株发生显著性变化的 CO_2 泄漏通量阈值范围也有不同 (图 6)。本研究应用方差分析, 对同一指标在各泄漏情景下的差异性进行统计检验, 把与 CK 情景发生显著性差异的最小 CO_2 泄漏通量作为本试验所设置的 5 种存在泄漏情景中的阈值下限, 把令植株停止正常生长发育的最小 CO_2 泄漏通量作为阈值上限, 并综合各指标的阈值范围以确定玉米对地质封存 CO_2 泄漏的耐受阈值。

综合前文第 2.1 至第 2.4 部分对各指标的统计检验结果, 结合图 6 可看出: 播种期 CO_2 泄漏, 对玉米的出苗影响最为严重, $500\ g/(m^2 \cdot d)$ 的 CO_2 泄漏通量已让出苗受到极显著的抑制, 当达到 $2\ 000\ g/(m^2 \cdot d)$ 时即很难出苗。对于生长期 CO_2 泄漏, 影响可能稍微轻一点, 玉米株高在 CK 对照、情景 G500 和 G1000 之间并无显著性差异, CO_2 泄漏通量达到 $2\ 000\ g/(m^2 \cdot d)$ 时株高增长速度才极显著降低 ($P < 0.01$); 不同泄漏情景下玉米可见叶数、全展叶数和枯叶数的差异性与株高相似, CO_2 泄漏通量达到 $2\ 000\ g/(m^2 \cdot d)$ 时产生极显著差异; 地下部干质量在 $1\ 000\ g/(m^2 \cdot d)$ 的 CO_2 泄漏通量下与 CK 对照产生显著差异 ($P < 0.05$), 在 $2\ 000\ g/(m^2 \cdot d)$ 的 CO_2 泄漏通量下地上部和地下部干质量均与 CK 对照产生极显著差异; 净光合速率和蒸腾速率对泄漏情景同样非常敏感, 在 CO_2 泄漏通量为 $500\ g/(m^2 \cdot d)$ 时即产生极显著降低, 达到 $2\ 000\ g/(m^2 \cdot d)$ 时光合作用几乎停止。

不同泄漏情景对玉米各种生理指标的影响最终都会反映在地上部和地下部生物量上, 可作为确定农业生态系统对地质封存 CO_2 泄漏耐受阈值的主要参数。有研究

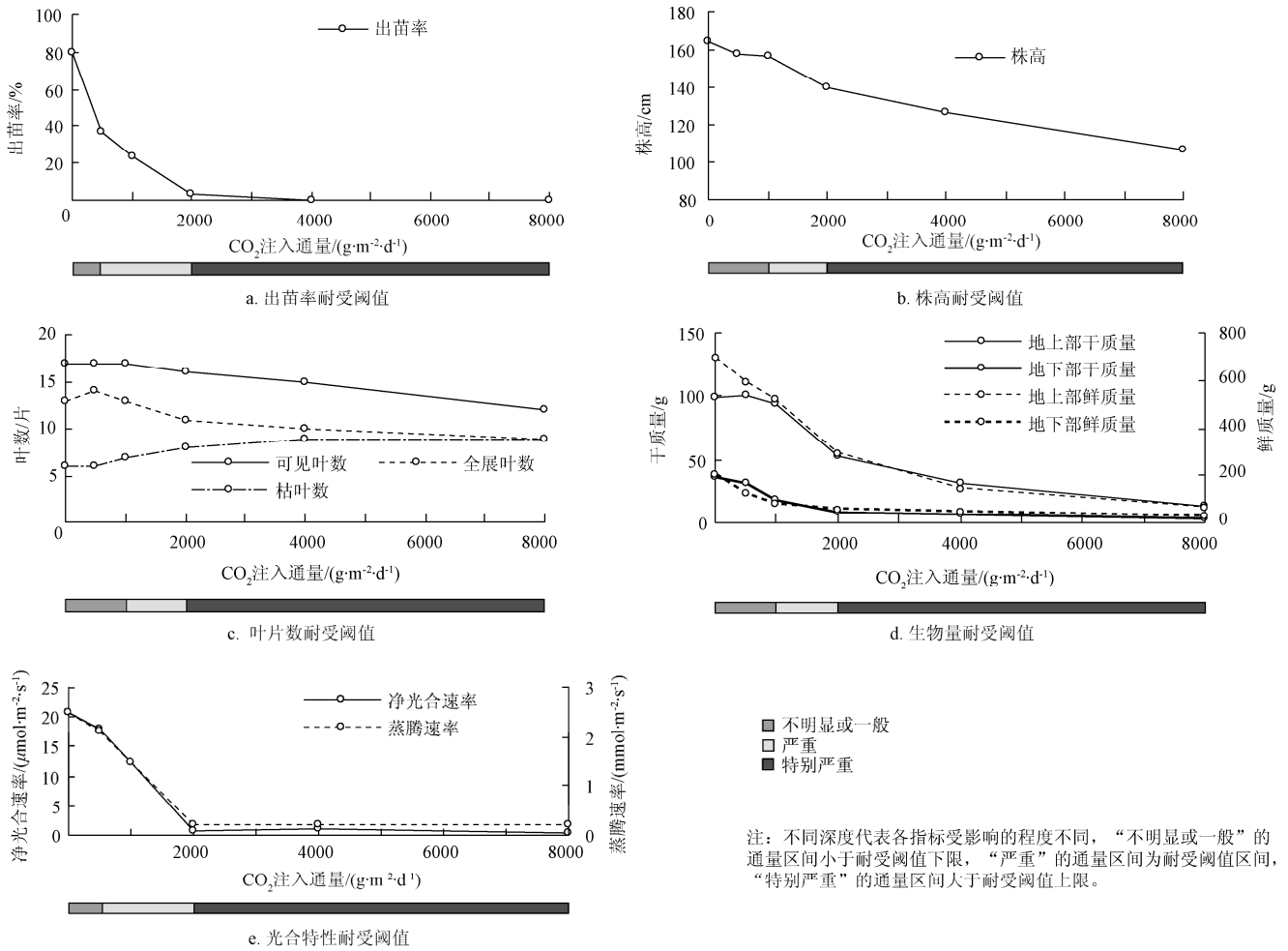


图 6 生长季末期不同泄漏情景下各指标的耐受阈值比较

Fig.6 Comparison of tolerable threshold value of each index under different leakage scenarios during late growing season

表明，由于地上部干质量主要是光合作用的结果，地下部通过地上部干质量来影响产量水平，因此，地上部干质量与产量的关系要比地下部干质量与产量的关系更密切^[40]。如果以地上部干质量的极显著降低为主要判别标准，结合作物株高、叶片数、净光合速率和蒸腾速率等描述植物生长状况的指标，可以得到：对于生长期 CO₂ 泄漏试验来说，玉米对地质封存 CO₂ 泄漏的耐受阈值上限为 2 000 g/(m²·d) 的 CO₂ 通量，在达到一定程度（500 g/(m²·d)）之前，作物大部分指标的变化并不显著；生长季末期，处于 500~2 000 g/(m²·d) 耐受阈值范围内的近地表作物将受到极显著影响；大于 2 000 g/(m²·d) 以上的 CO₂ 泄漏情景，玉米生长发育将停止甚至死亡。同时，对于播种期 CO₂ 泄漏试验来说，虽然玉米能出苗的 CO₂ 通量阈值范围也为 500~2 000 g/(m²·d)，但 500 g/(m²·d) 的阈值下限已使得玉米出苗率减半，在播种期泄漏试验下的玉米长势可能要远弱于生长初期泄漏试验，这也反映了玉米对地质封存 CO₂ 泄漏的耐受阈值的复杂性。

3 讨 论

最早关于封存 CO₂ 泄漏将导致的潜在环境影响的报

道大约出现在 2003 年左右^[41]，以往大多数研究是基于地下深处释放 CO₂ 的天然试验场，自然环境在长期过程后的适应性和恢复过程被忽视^[22]；而最近出现的一些人工模拟试验，对现实可能泄漏情景的多样性考虑不够。这些研究都存在特定性，并且由于时空尺度的不同，使得分析的结果难以具有可比性。

本研究认为，确定地质封存 CO₂ 泄漏过程中对地表生态系统可能造成的影响需要将各种泄漏情景结合起来考虑，这样才能全面合理地评价 CO₂ 泄漏过程对地表生态系统的各种可能影响。CO₂ 泄漏通量作为人工模拟地质封存 CO₂ 泄漏的关键指标，与 CO₂ 泄漏过程紧密相关，能综合反映试验区泄漏情景，而且能通过不同泄漏通量来模拟各种泄漏情景下对地表生态系统的影响。因此，本研究选择 CO₂ 泄漏通量作为研究地质封存 CO₂ 泄漏对地表生态系统影响的指标，通过分析各种泄漏通量下地表生态系统所可能出现的变化，可以进行相关的风险评价。同时，通过地表生态系统对不同泄漏情景的阈值响应可以实现对 CO₂ 泄漏的影响评估，克服了以往以单一泄漏速率为研究对象进行影响研究的局限。本研究所设置的 6 种可能泄漏情景中，注入速率最大的为 0.318

L/min, 相当于 0.3 t/a, 而 Sleipner 项目注入速率大概为 100 万 t/a^[15], 相比较而言, 本人工模拟试验设置的泄漏速率还不到 Sleipner 项目注入速率的 0.00003%。尽管如此, 需要强调的是本试验注入速率的选择并不是暗示此泄漏速率会在类似实际背景下发生, 而是为了探索 CO₂ 泄漏速率与地表生态系统受影响程度之间的联系等现实目的。国外有研究者发现, 天然泄漏点地表中心 CO₂ 通量达 2 000~3 000 g/(m²·d)时, 附近植物几乎不能生长^[22], 而同时考虑到其大田环境存在 CO₂ 横向迁移的过程^[31], 泄漏点地下通量要远高于地表, 使得本盆栽试验所设置的 6 种可能泄漏情景中的最大注入通量会稍大于上述数值。同时, 本试验结果所得 2 000 g/(m²·d)的耐受阈值上限与此基本相吻合。

地质封存 CO₂ 泄漏对近地表作物的影响可通过出苗率、株高、叶片数、地上部和地下部生物量等植物形态生理因素的改变来准确地被识别。虽然现有的研究已经初步地模拟了地质封存 CO₂ 泄漏的各种情景, 并且对 CO₂ 泄漏所可能会造成的一系列农业生态和环境影响指标进行了试验分析, 结果证实影响极显著, 但其影响机理仍待深入研究。通过对能深层次反映各种植物形态生理指标变化的土壤学指标进行分析, 能很好地理解地质封存 CO₂ 泄漏对作物生长环境的影响。IPCC 特别报告^[1]指出, 农业生态环境受到的影响, 可能源于土壤的酸化和土壤中 CO₂/O₂ 的置换^[30]。但本文不同泄漏情景下土壤 pH 值的变化并未达到显著性水平, 土壤酸化机制的影响比预期的程度要小, 可能是泄漏持续时间相对较短, 土壤 pH 值的变化还没有足够的时间反应出来。

植物对地质封存 CO₂ 不同泄漏情景的响应不仅受植物生长环境改变的影响, 同时也由植物自身逆境耐受性高低决定。植物叶片水分利用效率是评判其适宜程度的综合性指标^[42], 高水平的叶片 WUE 是植物逆境耐受性高的典型性状^[43]。通过对不同泄漏情景下玉米叶片水分利用效率的变化趋势进行分析(图 7), 不难看出, 在没有 CO₂ 泄漏的情景下, 情景 G500、G1000、G2000、G4000 和 G8000 与对照情景在 WUE 上无显著差异; 而在 CO₂ 泄漏情景下的生长季末期, 仅有泄漏通量较低的情景 G500 和 G1000 与对照情景无显著性差异, 泄漏通量大于 2000 g/(m²·d)的情景 G2000、G4000 和 G8000 相比于对照情景已经极显著降低, 且情景 G2000、G4000 和 G8000

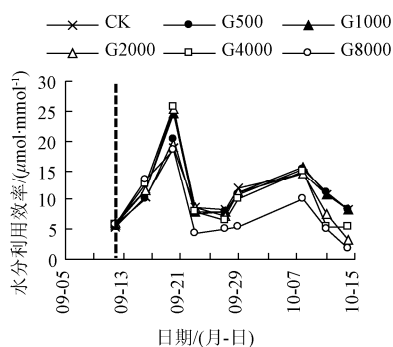


图 7 不同泄漏情景玉米叶片水分利用效率变化趋势图

Fig.7 Dynamics of water use efficiency of maize under different leakage scenarios

这三者之间也存在极显著差异。这与本研究各种植物生理特征指标对不同 CO₂ 泄漏情景的响应一致。

本研究中还存在一些不足和不确定性, 主要有以下几个方面: 第一, 是地质封存 CO₂ 泄漏情景的不确定性。虽然 CO₂ 向上的迁移是显而易见的, 但是其横向的迁移机制也很复杂^[44], 尤其是在土壤深层的气体迁移范围大致受到土壤质地、泄漏源深度以及地形边界等因素的控制, 注入 CO₂ 只有不到 1/3 能从地表试验区域边界内泄漏上来^[31], 这表明任何泄漏情景对近地表作物的影响都将显著依赖于泄漏 CO₂ 在土壤深层的迁移路径和它最终在地表的空间分布^[22]。本研究利用盆栽试验排除 CO₂ 的横向迁移是对 CO₂ 泄漏路径的简化, 因此排除实际存在的 CO₂ 横向迁移情景是本研究不确定性的来源之一; 第二, 是影响和耐受阈值评价方法的不足。由于受本研究自身条件的限制, 在指标选择方面, 主要针对植物形态生理和土壤基本理化性质等指标的测量, 而对土壤有机质、土壤含水率、营养元素(N、P、K)、土壤微生物甚至作物细胞层面等的变化没有涉及。West 等^[31]的研究发现, 地质封存 CO₂ 泄漏导致了微生物总量的显著下降, 矿物质无明显改变; 而蚯蚓粪数量则显著增多^[30]。因此, 包括土壤相关数据在内的评价指标的缺乏是本研究的不确定性来源之一; 第三, 是对未来作物适应能力和农业环境恢复力的不可预见性。长期的试验研究必须考虑部分作物对环境的适应^[22], 以及生态环境受 CO₂ 泄漏影响后的恢复速率^[31]; 第四, 是可能对地表生态系统造成显著影响的 CO₂ 泄漏速率的不知。本研究多个泄漏情景下设定的 CO₂ 注入值可能过高和过宽, 生长初期 CO₂ 泄漏试验中泄漏通量最高的 3 个情景下的植株几乎停止生长, 播种期 CO₂ 泄漏试验中最小的 G500 情景已使出苗率减半; 第五, 是没有完全覆盖主要农田生态系统类型。为全面反映封存 CO₂ 泄漏对农田生态系统的影响, 研究对象还可以从本文的玉米等 C₄ 作物扩展到小麦、水稻等 C₃ 作物。

4 结 论

1) 本试验利用盆栽方式人工模拟地质封存 CO₂ 泄漏的情景, 通过构建一组相互独立的封存 CO₂ 泄漏人工模拟平台, 定量控制土壤中 CO₂ 的泄漏速率, 形成不同的土壤 CO₂ 通量, 模拟不同泄漏情景对近地表生态系统的影响, 影响效果明显。

2) 封存 CO₂ 泄漏对地表农业生态系统的影响是存在的。当 CO₂ 泄漏通量达到一定程度后, 地表作物生长发育受到明显抑制——出苗率降低近半, 株高、叶片数、地上部和地下部生物量也明显减少, 光合作用受到极显著影响, 土壤 pH 值下降。

3) 地质封存 CO₂ 泄漏对玉米播种期出苗率影响很大, 不仅会延缓出苗时间、降低出苗率, 而且随着不同情景之间泄漏通量的增大, 影响也加深: 泄漏通量为 500 g/(m²·d)的情景下, 玉米出苗受到极显著抑制, 达到本试验所设置的 5 种存在泄漏情景中的阈值下限; 泄漏通量为 2 000 g/(m²·d)的情景下, 即很难出苗, 可为阈值上限。

4) 玉米生长初期, 各植物形态生理指标的改变会在 CO₂ 泄漏通量较高的情景下发生, 在达到一定程度 (500 g/(m²·d)) 之前这些改变并不显著, 处于 500~2 000 g/(m²·d) 泄漏情景之中的近地表作物受到显著影响, 大于 2 000 g/(m²·d) 泄漏情景中的玉米生长发育将会停止甚至死亡——即针对本试验所设置的 5 种存在泄漏情景而言, 500~2 000 g/(m²·d) 的通量范围为影响玉米正常生长发育的耐受阈值。

5) 地质封存 CO₂ 泄漏情景尚存在一定的复杂性和不确定性, 需要多学科研究交叉进行。本研究仅探讨了地质封存 CO₂ 泄漏对农业生态系统形态生理指标等的影响研究, 并未探讨影响作物生长发育的具体驱动因素, 对泄漏 CO₂ 在土壤深层横向迁移所造成的不确定性把握不足, 还需要更加深入广泛的指标测量和数据采集。根据本研究所得的耐受阈值范围, 建议同类试验设置 CO₂ 注入通量时可小于 2 000 g/(m²·d), 并对 0~500 g/(m²·d) 的情景区间进行进一步细分。同时, 需要重点观测土壤中的物理化学过程变化对作物生长发育的影响, 以深入认识封存 CO₂ 泄漏对生态环境影响的机理。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[M]. In: Metz B, Davidson O, DeConinck H, Loos M, Meyer L, eds. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. In: Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A, eds. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). IPCC, Geneva, Switzerland, 2008.
- [3] Li X, Wei N, Liu Y, et al. CO₂ point emission and geological storage capacity in China[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 2793—2800.
- [4] Aboud D J, Volkmann C, Smart A J, et al. Carbon capture and storage: actions to achieve high performance in a low carbon economy[R]. Technical Report, USA, Accenture, 2009.
- [5] Hawkins D G. Passing gas: policy implications of leakage from geologic carbon storage sites[C]//In: Gale J, Kaya Y, eds. Proceedings of the Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2002 Oct 1—4, Kyoto, Japan. Amsterdam: Pergamon, 2003. 249—254.
- [6] Heinrich J J, Herzog H J, Reiner D M. Environmental assessment of geologic storage of CO₂[C]//In: Proceedings of the Second Annual Conference on Carbon Sequestration, 2003 May 5—8, Alexandria, VA, USA. National Energy Technology Laboratory, United States Department of Energy, 2003.
- [7] West J M, Pearce J M, Bentham M, et al. Issue profile: environmental issues and the geological storage of CO₂[J]. European Environment, 2005, 15(4): 250—259.
- [8] Saripalli K P, Mahasanen N M, Cook E M. Risk and hazard assessment for projects involving the geological sequestration of CO₂[C]//In: Gale J, Kaya Y, eds. Proceedings of the Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2002 Oct 1—4, Kyoto, Japan. Amsterdam: Pergamon, 2003. 511—516.
- [9] 李宏军, 黄盛初. 中国 CCS 的发展前景及最新行动[J]. 中国煤炭, 2010, 36(1): 13—17.
Li Hongjun, Huang Shengchu. China's development potential & latest actions on CCS[J]. China Coal, 2010, 36(1): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [10] Ha-Duong M, Loisel R. Zero is the only acceptable leakage rate for geologically stored CO₂: an editorial comment[J]. Climatic Change, 2009(93): 311—317.
- [11] 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.
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. (in Chinese with English abstract)
- [12] 房世波, 沈斌, 谭凯炎, 等. 大气[CO₂]和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1116—1124.
Fang Shibo, Shen Bin, Tan Kaiyan, et al. Effect of elevated CO₂ concentration and increased temperature on physiology and production of crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 1116—1124. (in Chinese with English abstract)
- [13] Stenhouse M, Arthur R, Zhou W. Assessing environmental impacts from geological CO₂ storage[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1895—1902.
- [14] Torp T A, Gale J. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects[J]. Energy, 2004, 29(9/10): 1361—1369.
- [15] 曲建升, 曾静静. 二氧化碳捕获与封存: 技术、实践与法律——国际推广二氧化碳捕获与封存工作的法律问题分析[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(6): 78—83.
Qu Jiansheng, Zeng Jingjing. Carbon dioxide capture and storage: technology, demonstration, and legal aspects: An analysis on the legal related issues of international CCS efforts[J]. World Sci-Tech R & D, 2007, 29(6): 78—83. (in Chinese with English abstract)
- [16] Holloway S. An overview of the underground disposal of carbon dioxide[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(Supp.1): 193—198.
- [17] Holloway S. Safety of the underground disposal of carbon dioxide[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(Supp.1): 241—245.
- [18] Bachelor P P, McIntyre J I, Amonette J E, et al. Potential method for measurement CO₂ leakage from underground sequestration fields using radioactive tracers[J]. Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry, 2008, 277(1): 85—89.
- [19] Strazisar B R, Wells A W, Diehl J R, et al. Near-surface monitoring for the ZERT shallow CO₂ injection project[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(6): 736—744.

- [20] Spangler L H, Dobeck L M, Repasky K S, et al. A shallow subsurface controlled release facility in Bozeman, Montana, USA, for testing near surface CO₂ detection techniques and transport models[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 227—239.
- [21] Pfanz H, Vodnik D, Wittmann C, et al. Photosynthetic performance (CO₂-compensation point, carboxylation efficiency, and net photosynthesis) of timothy grass (*Phleum pratense* L.) is affected by elevated carbon dioxide in post-volcanic mofette areas[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61(1): 41—48.
- [22] Beaubien S E, Ciotoli G, Coombs P, et al. The impact of a naturally occurring CO₂ gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture: Latera, Italy[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(3): 373—387.
- [23] Biondi F, Fessenden J E. Response of lodgepole pine growth to CO₂ degassing at Mammoth Mountain, California[J]. *Ecology*, 1999, 80(7): 2420—2426.
- [24] Stephens J C, Hering J G. Comparative characterization of volcanic ash soils exposed to decade-long elevated carbon dioxide concentrations at Mammoth Mountain[J]. *Chemical Geology*, 2002, 186(3/4): 301—313.
- [25] Stephens J C, Hering J G. Factors affecting the dissolution kinetics of volcanic ash soils: dependencies on pH, CO₂, and oxalate[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(8): 1217—1232.
- [26] Macek I, Pfanz H, Francetic V, et al. Root respiration response to high CO₂ concentrations in plants from natural CO₂ springs[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 54(1): 90—99.
- [27] Miglietta F, Bettarini I, Raschi A, et al. Isotope discrimination and photosynthesis of vegetation growing in the Bossoleto CO₂ spring[J]. *Chemosphere*, 1998, 36(4/5): 771—776.
- [28] Cook A C, Tissue D T, Roberts S W, et al. Effects of long-term elevated [CO₂] from natural CO₂ springs on *Nardus stricta*: photosynthesis, biochemistry, growth and phenology[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1998, 21(4): 417—425.
- [29] Rogie J D, Kerrick D M, Sorey M L, et al. Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188(3/4): 535—541.
- [30] Patil R H, Colls J J, Steven M D. Effects of CO₂ gas as leaks from geological storage sites on agro-ecosystems[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4587—4591.
- [31] West J M, Pearce J M, Coombs P, et al. The impact of controlled injection of CO₂ on the soil ecosystem and chemistry of an English lowland pasture[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1863—1870.
- [32] Amonette J E, Barr J L, Dobeck L M, et al. Spatiotemporal changes in CO₂ emissions during the second ZERT injection, August-September 2008[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 263—272.
- [33] Stenhouse M J, Gale J, Zhou W. Current status of risk assessment and regulatory frameworks for geological CO₂ storage[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 2455—2462.
- [34] Hepple R P. Human health and ecological effects of carbon dioxide exposure[M]. In: Thomas D C, Benson S M, eds. *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations*. Elsevier Ltd, 2005. 1143—1172.
- [35] 黄开健, 杨华铨, 谭华, 等. 秋玉米高产栽培技术的最佳密度和施肥量研究[J]. *玉米科学*, 2001, 9(1): 57—59.
Huang Kaijian, Li Huaquan, Tan Hua, et al. Study on fertilizer applying amount and the best density for high yield autumn Maize cultivation techniques[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2001, 9(1): 57—59. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李康. 再生水灌溉对冬小麦生产的安全性影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 2007.
Li Kang. Study on the Safty of Winter Wheat With Reclaimed Water Irrigation[D]. Beijing: Institute of Environment and Sustainable in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张娟, 张正斌, 谢惠民, 等. 小麦叶片水分利用效率及相关生理性状的关系研究[J]. *作物学报*, 2005, 31(12): 1593—1599.
Zhang Juan, Zhang Zhengbin, Xie Huimin, et al. The relationship between water use efficiency and related physiological traits in wheat leaves[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(12): 1593—1599. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张利平, 王新平, 刘立超, 等. 沙坡头主要建群植物油蒿和柠条的气体交换特征研究[J]. *生态学报*, 1998, 18(2): 133—137.
Zhang Liping, Wang Xinping, Liu Lichao, et al. Study on gas exchange characteristics of main constructive plants *A.ordosica* and *C.korshinskii* in Shapou region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 133—137. (in Chinese with English abstract)
- [39] 魏孝荣, 邵明安. 黄土沟壑区小流域土壤 pH 值的空间分布及条件模拟[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 61—67.
Wei Xiaorong, Shao Ming'an. Spatial distribution and conditional simulation of soil pH values in small watershed of loessial gully region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 61—67. (in Chinese with English abstract)
- [40] 李广敏, 关军锋, 马春红, 等. 小麦根冠关系的基因型差异及其与产量的关系[J]. *华北农学报*, 2001, 16(4): 20—22.
Li Guangmin, Guan Junfeng, Ma Chunhong, et al. The genotype difference of root-top and its relation to yield in Wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(4): 20—22. (in Chinese with English abstract)
- [41] Damen K, Faaij A, Turkenburg W. Health, safety and environmental risks of underground CO₂ sequestration: overview of mechanisms and current knowledge[R]. Report NWS-E-2003-30, ISBN 90-393-3578-8, 2003 December.
- [42] 张岁岐, 山仑. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(4): 1—5.
Zhang Suiqi, Shan Lun. Research progress on water use efficiency

- of plant[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(4): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [43] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. *水科学进展*, 2000, 11(1): 99—104.
Wang Huixiao, Liu Changming. *Advances in crop water use efficiency research*[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 99—104. (in Chinese with English abstract)
- [44] Annunziatellis A, Beaubien S E, Bigi S, et al. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Lateral caldera (central Italy): implications for CO₂ geological storage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(3): 353—372.

Impact assessment and tolerable threshold value of CO₂ leakage from geological storage on agro-ecosystem

Wu Yang^{1,2}, Ma Xin^{1,2*}, Li Yu'e^{1,2}, Wan Yunfan^{1,2}, Zhang Jiutian³, Zhong Ping³, Jia li³

(1. *Institute of Environment and Sustainable in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, 100081, China;*

2. *Key Laboratory For Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;*

3. *The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China)*

Abstract: Carbon capture and storage (CCS) technology plays an important role in reducing global carbon emission. However, CCS project is facing many obstacles, particularly the leakage from carbon dioxide (CO₂) storage sites severely threatens ground ecological systems. In this study, a manual control device was designed and constructed, on an agricultural ecological system threatened by leakage from CO₂ storage sites, to simulate the scenarios of geologically stored CO₂ leaking from underground to ground. The changes of several important parameters of an agricultural ecological system (AES) were observed and recorded so as to evaluate impacts of underground stored CO₂ leaking on an AES, and then to establish the tolerable threshold value. The results showed that maize growth was negatively affected under different CO₂ leakage amounts. In general, maize grew worse when CO₂ leaking flux increased. For example, seedling of maize was severely hampered, both plant height and leaf amount decreased with increasing of CO₂ leaking flux. Biomass for both underground and above ground with CO₂ leaking was significantly less than that of control, photosynthesis of maize was affected, and soil pH value dropped. As a result, the tolerable threshold value of CO₂ leakage from geologically stored sites is 500-2 000 g/(m²·d).

Key words: carbondioxide, pH value, geology, carbon capture and storage, agro-ecosystem, impact assessment, tolerable threshold value