文章编号: 1005-0906(2019)02-0086-08

DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.20190212

玉米作为地质封存CO2泄漏耐受植物的评估

薛 璐^{1,2},马俊杰^{1,3},刘 丹¹,赵晨阳¹ (1.西北大学城市与环境学院,西安 710127; 2.榆林学院生命科学学院,陕西 榆林 719000; 3.二氧化碳捕集与封存国家与地方工程研究中心,西安 710127)

摘 要: 二氧化碳的捕获与储存(CO₂ capture and storage, CCS)是全球 CO₂减排最重要技术战略,其存在 CO₂泄漏的风险,会对周围农田生态产生重要影响。深入认识植物对高浓度 CO₂的响应并筛选对 CO₂的耐受植物,为 CCS 项目区农业生产决策提供参考数据。本文设置玉米对不同 CO₂浓度的响应情形,选择株高、鲜重、干重、净光合速 率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂浓度作为玉米耐受的观测指标。结果表明,当 CO₂浓度为 10 000、20 000 µmol/mol 时,玉米株高增高 7% ~ 12%,生物量增加 10% ~ 15%,净光合速率增加高达 60% 左右;当 CO₂浓度为 40 000、80 000 µmol/mol 时,玉米株高度减少 9% ~ 12%,生物量减少 10% ~ 17%,净光合速率减少 35% ~ 45% 左右。一定程度 CO₂浓度的增加,对玉米生长发育具有"施肥"效应;在更高 CO₂浓度下,会抑制其生长发育,并未出现植株死亡的现象。通过 CO₂耐受指数法(LCTI)计算得出,玉米可以作为地质封存 CO₂泄漏的耐受植物。

关键词: 玉米;CO₂泄漏;地质封存;耐受性 中图分类号: S513.01

文献标识码:A

Evaluation on Maize as a Tolerant Plant of CO₂ Leakage from Geological Storage

XUE Lu^{1,2}, MA Jun-jie^{1,3}, LIU Dan¹, ZHAO Chen-yang¹

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi 'an 710127;

2. College of Life Science, Yulin University, Yulin 719000; 3. National & Local Joint Engineering Research Center of

Carbon Capture and Storage Technology, Northwest University, Xi 'an 710127, China)

Abstract: CCS(CO₂ capture and storage) is considered as the most potential technology for global CO₂ emission reduction. However, it involves the risk of CO₂ leakage, which will have an important impact on the surrounding farmland ecosystem. So deep researching of the response of plants to high CO₂ concentrations and selecting tolerant plants to CO₂, so as to provide the reference data for agricultural production decisions in CCS project areas. In this paper, the plant height, fresh and dry biomass, net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration were selected as indicators of maize tolerant index for different CO₂ concentration. The results indicated that when the CO₂ concentration was 10 000 and 20 000 μ mol/mol, the growth of maize in plant height, biomass, and net photosynthetic rate were promoted 7%–12%, 10%–15% and 60% respectively. while the CO₂ concentration was increased to 40 000 and 80 000 μ mol/mol, the growth of maize in plant height, biomass, and net photosynthetic rate were inhibited 9%–12%, 10%–17% and 35%–45% respectively. The increase of CO₂ concentration within a certain range had a "fertilization" effect on the growth of maize, but at a higher CO₂ concentration, the growth of maize would be inhibited and thus no death phenomenon had been observed in maize. Furthermore, through CO₂ tolerance index method(LCTI), it was concluded that maize can be used as a tolerant plants for CO₂ leakage from geological storage.

Key words: Maize; CO₂ leakage; Geological storage; Tolerance

作者简介: 薛 璐(1989-),女,陕西绥德人,博士研究生,研究方向为地质封存 CO₂泄漏近地表生态影响与监测技术研究。Tel:18049358345 E-mail:xuelusuper@163.com

录用日期: 2018-12-15

基金项目:国家高技术研究发展计划("863"计划)"二氧化碳地质封存关键技术"(2012AA0501030)、陕西省教育厅自然科学研究计划项目"陕 北典型 C₄和 C₄农作物对高浓度 CO₂耐受性研究"(专项科研计划 2019)

马俊杰为本文通讯作者。E-mail:xdhgvip@163.com

二氧化碳的捕获与储存(CO₂capture and storage, CCS)被认为是最有前景和潜力的温室气体 CO₂减排 技术^[1,2]。CCS 是将从排放源捕捉到的 CO₂注入到石 油与天然气储层、深层咸水层和不可开采的煤层等 稳定的地质构造中并长期与大气隔绝的过程,达到 捕碳减排的效果^[3,4]。尽管 CCS 项目减少温室气体的 排放并且有利于实现资源的高效利用,但仍存在着 地质封存的 CO₂通过人为通道、地质构造通道、跨越 盖层逃逸等快速泄漏和水力圈闭逃逸通道逃逸出地 层等慢速泄漏的风险^[5,6]。一旦出现地质封存 CO₂的 泄漏,将会对近地表水环境、土壤环境、动植物生长 发育以及人体安全产生重要影响^[7],对泄漏区的陆 生生态系统、水生生态系统等产生影响,尤其对周围 农田生态系统可能构成威胁^[8]。

作为农田生态系统的典型代表,以往气候变化 影响研究多集中于大气CO₂浓度倍增条件下对典型 植物的影响。研究指出,CO₂浓度倍增具有"施肥" 效应,可以促进植物生长发育以及生物量的积累^[9~11]。 随着CCS技术的发展,远高于CO₂倍增的高浓度CO₂ 对典型植物或作物的影响研究成为环境风险研究的 重要领域^[12]。需要深入认识植物对高浓度CO₂的响 应,筛选出对高浓度CO₂耐受的植物,在CO₂地质封 存区农田推广种植,预防CO₂泄漏发生后对区域农 业造成严重的环境风险。目前CO₂泄漏对植物的影 响研究多针对于CCS项目的野外或室内模拟研究和 其他CO₂泄漏点的实地调查研究^[13,14]。Beaubien^[15]、 Krüger¹⁶¹等通过对天然CO2泄漏点附近植被覆盖研 究发现,距离泄漏中心6m范围内植物受影响明显, 由中心向外植被覆盖率才逐渐恢复。ERT人工模拟 平台(USA)^[17]通过开展模拟CO₂泄漏实验观测,在 CO,泄漏源中心区域植物生长萎缩甚至枯死。许多 室内模拟CO,泄漏不同情形对植物的影响研究指 出,苜蓿、小麦、豌豆等根长与生物量的减幅严重,受 CO-影响程度更大:同时指出,不同类型植物对二氧 化碳耐受能力不同^[18-21]。尽管已有一些关于CO2泄 漏对植物影响的案例研究,但定量评估植物对CO2 泄漏的耐受性的相关研究却较少[22]。本文以典型作 物玉米为研究对象,通过模拟地质封存CO。泄漏后 可能产生的高浓度CO2环境,深入认识高浓度CO2对 玉米生长发育的影响。同时,利用CO2耐受指数方 法评估玉米对高浓度CO₂的耐受性,为筛选CO₂耐受 植物和CCS项目区农业生产决策提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

本实验以玉米西蒙6号为供试作物,该玉米品 种由内蒙古西蒙种业有限公司选育,广泛种植于西 北地区,供试作物种子由陕西省靖边县农业技术推 广站提供。

实验土壤采自CCS项目封存地(陕西省靖边县 108°17~109°27 E,36°58~38°03 N)农田0~20 cm 土壤。土壤基本理化性质见表1。

质地 Soil texture 有效N 速效P 速效K 有机质 参数 pH值 (mg/kg) (mg/kg) (mg/kg) (%) 沙粒(%) 粉粒(%) 黏粒(%) Parameter pH value AHN AP AK OM Silt Sand Clay 数值 30.02 46.40 0.31 79.30 12.95 7.75 7.8 1.19

表1 实验土壤基本理化性质

ab	le	1 1	P	hysical	and	c	hemical	pr	operties	of	experi	imental	soi	I
----	----	-----	---	---------	-----	---	---------	----	----------	----	--------	---------	-----	---

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计

采用二氧化碳智能人工气候箱(RXZ-500C-CO₂) 模拟CCS技术中CO₂发生泄漏后可能产生的高浓度 CO₂环境(图 1)。该气候箱采用PID智能控制系统 (Proportion, Integral and Derivative Control System, PIDCS)控制箱内CO₂浓度。CO₂人工气候箱采用先 进的比例(proportion)、积分(integral)、微分(derivative) 智能控制算法,确定人工气候室内CO₂的浓度是否 符合实验要求,当室内值低于设定值时,自动打开 CO₂储气罐电磁阀以增加气候室CO₂浓度,直到CO₂ 浓度达到实验设定目标。该装置控温范围:0~ 50℃;控湿范围30%~95% RH;光照度:0~22 000 lux; CO₂浓度量程到100 000 µmol/mol。各参数均为多 级可调,可根据实验需要设定目标值。

在实验中,首先在不通 CO₂气体的条件下,将 8~10 盆、4~5 株/盆玉米培养至 2~3 叶期时,选择 长势良好的6 盆、1~3 株/盆玉米;然后在二氧化碳 控制浓度下,定期浇水、固定施肥,培育 30 d。CO₂ 人工气候箱中的CO₂浓度分别控制在380(CK)、10 000、 20 000、40 000、80 000 μ mol/mol,实验条件设置为白 天 12 h:温度 25℃,湿度 80%,光强 100%;夜晚 12 h: 温度20℃,湿度80%,光强20%。

1.2.2 测定指标

在培育30d周期内,每10d记录玉米的株高、地 上部分生物量、地下部分生物量、整株生物量(鲜重 和干重)、净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度 (Co)、叶片胞间CO₂浓度(Ci)等指标,其中P_n、Tr、Gs、 Ci指标采用LI-6400X光合测定仪(Nebraska, USA) 测定。植物培养与指标测定均在西北大学 CCS 环 境监测与风险评价实验室进行(2013年9~10日)。 1.2.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 与 origin8.5 进行数据处理与图表分析;采用 SPSS 22.0 均值比较独立标t检验进行方差齐性检验,AVOVA进行各项指标显著性分析。



图 1 CO₂智能人工气候箱 Fig.1 CO₂artificial climate chamber

1.3 耐受性指数计算方法

将 CO₂浓度为 380 μmol/mol(CK)时植物生长发 育指标设为基准线,植物的耐受性可以通过各高浓 度 CO₂处理组与 CK 组植物生长发育指标的比值来 评估^[23]。

植物耐受性的计算式如下:
$$LCTI = \sum_{1}^{n} \frac{V_{Leakage}}{V_{CK}} \cdot W$$

式中,LCTI(leaking CO₂ tolerance index)为植物 CO₂耐受性指数,值域范围 0-1; $V_{Leakage}$ 是高浓度 CO₂ 处理组植物生长发育指标的观测值; V_{CK} 是 CK 组植 物生长发育指标的观测值; W_i 是不同植物指标的权

重,且 $\sum_{i=1}^{n} W_{i} = 1$;n为植物测定指标数量。设定0<

LCTI<0.25 为不耐受;0.25 ≤LCTI<0.5 为较不耐受; 0.5 ≤LCTI<0.75 为较耐受;0.75 ≤LCTI<1 为耐受。设 定植物的耐受指数(LCTI)在0.75 ~1 范围内可认为 该植物为CO₂耐受植物。

2 结果与分析

2.1 高浓度CO2对玉米植株高度的影响

玉米植株高度随不同 CO₂浓度的变化规律如 图 2 所示。CO₂浓度为10 000、20 000、40 000、 80 000 μmol/mol 时与 CK 组存在极显著性差异 (P<0.01),各处理水平之间差异显著,40 000 与 80 000 μmol/mol处理之间差异不显著。CO₂浓度为 10 000、20 000 μmol/mol时,玉米植株高度高于CK组; 随着 CO₂浓度持续增加到 40 000、80 000 μmol/mol 时,其植株高度明显低于 CK组。在 CO₂浓度为 20 000 μmol/mol 时,对植株高度的促进作用最明 显,在第 10 天时植株增高 9.2%,第 30 天植株增高 11.67%;在 CO₂浓度为 80 000 μmol/mol 时,对植株高 度的抑制作用显著,在第 10 天时植株高度减少 9.27%,第 30 天时植株高度减少近 12%(表 2)。

2.2 高浓度CO2对玉米生物量的影响

植物生物量指标常用植物鲜重与干重指标来衡量。与CK组相比,高浓度CO₂对玉米鲜重和干重有较显著影响(P<0.05),其中对鲜重的影响大于对干重的影响(图3)。当CO₂浓度为10 000、20 000 µmol/mol时,玉米鲜重分别较CK对照增加了9.73%、15.73%,干重分别较CK对照增加了4.09%、9.18%;当CO₂浓度为40 000、80 000 µmol/mol时,玉米鲜重分别较CK对照减少了14.19%、17.85%,干重分别较CK对照减少了9.65%、13.2%。在第10 d时,玉米地上部分鲜重在CO₂浓度为20 000、40 000、80 000 µmol/mol时(除 10 000 µmol/mol外)与CK组存在极显著差异(P<0.01),但对玉米地下部分鲜重影响不显著。随着实验天数的增加,在第30天时,玉米地上部分鲜重和地下部分鲜重在各CO₂浓度下与CK组均存在显著差异(P<0.05)。



注:不同字母表示情景间差异极显著(P<0.01)。下图同。

Note: The cylinders with different letters indicate that the difference between the scenarios is extremely significant(P<0.01). The same below.

图2 高浓度CO2对玉米植株高度的影响

Fig.2 Impact of high CO2 concentration on plant height of maize

表2 玉米株高 t检验结果(第30天)

 Table 2
 Results of t test of plant height

处理 Treatment	结果值 Result	t	n	р	变化(%) Change
СК	36.34±1.05 с	/	10	/	/
10 000 µmol/mol	$38.92{\pm}1.26~\mathrm{b}$	-4.987	10	0.01	7.10
20 000 µmol/mol	40.58±1.06 a	-8.989	10	0.01	11.67
40 000 µmol/mol	32.81±1.17 d	7.088	10	0.01	-9.71
80 000 µmol/mol	31.98±1.00 d	9.501	10	0.01	-12.00



2.0

1.5

1.0

0.5

0.0

CK

10 000

20 000

CO2浓度(µmol/mol) CO2 concentration

40 000

80 000



- 注:a为玉米鲜重和干重(30 d);b为玉米地上部 分和地下部分鲜重(10 d); c为玉米地上部 分和地下部分鲜重(30 d)。
- Note: a, fresh and dry biomass of maize(30 d); b, above-ground and below-ground fresh biomass of maize(10 d); c, above-ground and below-ground fresh biomass of maize(30 d).

图3 高浓度CO₂对玉米生物量的影响 Fig.3 Impact of high CO2 concentration on biomass of maize

2.3 高浓度CO2对玉米光合作用的影响

光合作用的气体交换参数主要包括净光合速率 (Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Co)、胞间 CO₂浓度(Ci) 4 个指标。玉米 Pn、Tr、Co在 CO₂浓度为 10 000、 20 000、40 000、80 000 μmol/mol 时与 CK 组存在极 显著差异(P<0.01),其中,Pn 和 Tr各处理水平之间差 异极显著(P<0.01),Co除 10 000、20 000 μmol/mol 两 组之外,其他处理水平之间差异极显著(P<0.01)。 胞间 CO₂浓度 Ci除 10 000 μmol/mol 之外,其他各处 理水平与 CK 组存在极显著差异(P<0.01),但各处 理之间差异不显著(图4)。在 CO₂浓度为 10 000、 20 000 μmol/mol 时 Pn、Tr、Co 较 CK 组显著增加,其 中 CO₂浓度为 20 000 μmol/mol 时促进作用最显著, 此时,玉米 Pn、Tr、Co 较 CK 组增加 67.33%、91.75%、 43.63%;在 CO₂浓度为 40 000、80 000 μmol/mol 时 Pn、Tr、Co 较 CK 组明显减小,其中,CO₂浓度为 80 000 μmol/mol 时抑制作用最显著,此时,玉米 Pn、 Tr、Co 较 CK 组分别减少 35.73%、46.51%、34.90%。 各高浓度 CO₂情形下胞间 CO₂浓度 Ci 均高于 CK 组, 随着 CO₂浓度的增加, Ci 持续增加,增长率变得 缓慢。



Note: The vertical error line indicates the standard deviation(n=8).

图4 高浓度CO2对玉米光合作用的影响

Fig.4 Impact of high CO2 concentration on photosynthesis of maize

2.4 玉米CO2耐受指数

玉米在 CO₂浓度为40 000 和80 000 μmol/mol 时 生长受到抑制,因此,分别选择 CO₂浓度为40 000、 80 000 μmol/mol 时作为 V_{Leakage}计算玉米的耐受指数 (LCTI),估算在高浓度 CO₂条件下是否可将玉米作为 地质封存 CO₂项目区可推广种植的耐受植物。结合 本实验玉米对高浓度 CO₂的响应情形,选择株高、鲜 重、干重、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂浓度作为玉米耐受指数的观测指标。参照马欣 等人评估大刍草耐受指数的方法,设定株高权重为 0.20,鲜重和干重权重为0.22,净光合速率、蒸腾速 率、气孔导度和胞间 CO₂浓度权重分别为0.09。根 据 LCTI 计算公式,得到玉米在 CO₂浓度为40 000 和 80 000 μmol/mol 时的耐受指数分别为0.899 1 和 0.822 6(表 3、表 4), LCTI 值属于[0.75,1],玉米属于耐 受植物。

|--|

观测指标 Observation indicator	对照值 Value under CK V _{CK}	高浓度 CO₂值 Value under 40 000 µmol/mol	比 值 V _{Leakage} / V _{CK}	权 重 Weight	耐受指数 (40 000 µmol/mol) LCTI
		$V_{ m Leakage}$			
株高(cm)	36.34	32.81	0.902 8	0.20	
鲜重(g)	3.913 6	3.358 0	0.858 0	0.22	
干重(g)	0.945 5	0.854 3	0.903 5	0.22	
净光合速率Pn[mol/(m ² ·s)]	5.518 6	4.445 7	0.805 5	0.09	0.899 1
蒸腾速率Tr[mmol/(m ² · s)]	0.671 5	0.579 1	0.862 3	0.09	
气孔导度 Co[mmol/(m ² · s)]	0.057 3	0.047 4	0.827 2	0.09	
胞间CO ₂ 浓度Ci[mol/(m ² ·s)]	226.845 7	268.392 3	1.183 1	0.09	

Table 3 LCTI of maize under 40 000 µmol/mol

表4 CO2浓度为80 000 μmol/mol 时玉米耐受指数(LCTI)

Table 4	LCTI of maize	under 80 000	µmol/mol
---------	---------------	--------------	----------

	对照值	高浓度 CO2值			耐受指数
观测指标	Value under CK	Value under	比 值	权 重	(80 000 µmol/mol)
Observation indicator	$V_{c\kappa}$	80 000 µmol/mol	$V_{\text{Leakage}}/V_{\text{CK}}$	Weight	LCTI
		${ m V}_{{ m Leakage}}$			
株高(cm)	36.34	31.98	0.880 0	0.20	
鲜重(g)	3.913 6	3.214 8	0.821 4	0.22	
干重(g)	0.945 5	0.820 6	0.867 9	0.22	
净光合速率Pn[mol/(m ² ·s)]	5.518 6	3.547 0	0.642 7	0.09	0.822 6
蒸腾速率Tr[mmol/(m ² ⋅s)]	0.671 5	0.359 2	0.534 9	0.09	
气孔导度 Co[mmol/(m ² · s)]	0.057 3	0.037 3	0.650 9	0.09	
胞间CO ₂ 浓度Ci[mol/(m ² ·s)]	226.845 7	278.207 1	1.226 0	0.09	

3 结论与讨论

通过实验模拟高浓度CO2对玉米生长发育的影 响,结果表明,当CO2在一定浓度范围内对玉米生长 有一定促进作用。Cure^[24]、Kimball^[25]、Rogers^[26]等对 有关植物光合作用对CO₂反应的文献报道,发现这 种短期CO2增高可使植物光合速率平均提高52%。 有关大豆、棉花、小麦、水稻等的详细研究工作也支 持了这一结论[27~30]。王春乙[31,32]、郭建平[33]、白月 明^[34]、杨松涛^[35]等人在CO₂浓度倍增的条件下(CO₂浓 度为700~800 µmol/mol)对大豆、冬小麦、棉花、玉 米、水稻、高粱等生长发育过程进行研究,研究表明, CO₂浓度倍增会促进这些植物的生长发育过程,使 其成熟期提前,更有利于植株积累更多的营养物 质。C₃、C₄植物光合作用利用1,5-二磷酸核酮糖羧 化酶(Rubisco)固定CO₂,一定范围CO₂浓度的增加, 可增加Rubisco与CO2的结合, Rubisco的活性会进 一步发挥,从而提高Rubisco梭化速率与植物光合速 率,进而促进植物生长[36,37]。

当CO2浓度达到40 000 和80 000 µmol/mol时, 会明显抑制玉米的株高、鲜重、干重以及净光合速 率、蒸腾速率、气孔导度等生理指标。原因可能是过 高浓度二氧化碳会引起土壤O2的减少,土壤pH值 下降,进而影响植物对营养物质的吸收,从而使植物 减产[38.39]。尽管如此,玉米依然表现出较强的生长 力,玉米CO2植物耐受指数在本实验最高CO2浓度达 到 80 000 µmol/mol 时, 玉米 LCTI 值在 0.75~1 范围 内(0.75 <LCTI <1 为耐受), 玉米可以作为 CO2 耐受植 物。研究结果与伍洋、纪翔等相一致[40,41]。玉米属 于典型的C₄植物,相对于C₃植物,C₄植物因为拥有 叶绿体和维管束鞘细胞两个光合细胞类型,具有浓 缩CO2的特殊光合机制[42]。C4植物首先在植物叶肉 细胞磷酸烯醇丙酮酸羧化酶(PEPC)作用下生成草酰 乙酸(OAA),进而生成苹果酸或者天冬氨酸等C4酸 并释放 CO₂(Hatch-Slack 途径)^[43],随后释放的 CO₂转 移到维管束鞘细胞进行脱酸反应,参与卡尔文循 环。Hatch-Slack 途径中 PEPC 活性较强^[44],对 CO₂亲 和能力很大,加之C4酸是由叶肉细胞进入维管束鞘 细胞,在低浓度CO2时PEPC起到了"CO2泵"的作用, 把外界CO,"压"进维管束鞘细胞,增加维管束鞘细 胞[CO₂]/[O₂]比率^[45]。因C₄植物的特殊光合机制,C₄ 植物相比C。植物一直被认为是一种更适应于低浓 度大气CO2、干旱等胁迫环境的植物^[46]。同时,在正 常大气CO;浓度下,C4植物光合反应中的生物化学 途径可将维管束鞘细胞内的 CO2 浓度提高约至 2 100 μmol/mol, 是C₃植物叶肉细胞浓度的10倍, 如 此高的CO2水平,使得梭化反应饱和、光呼吸停止, 这意味着C₄植物光合作用所需CO₂已趋饱和状态。 由于 PEPC 催化部位 O₂ 偶联的匮乏, 使 PEPC 对 [CO2]/[O2]的比率变化不敏感[47],这或许可以解释在 更高的CO₂浓度下玉米仍较强的生长力,更高CO₂浓 度下对玉米生理机制的影响还需进一步研究。

未来研究中,可细化实验CO2模拟浓度,观测玉 米生长发育特征,以寻找最适玉米生长CO2浓度,并 深入研究玉米生长、生理以及植物营养等方面对高 浓度CO2的耐受机理。另外,扩大植物筛选范围,选 用陕北黄土高原CCS项目区广泛存在的苜蓿、黑麦 草等植物作为研究对象,进一步筛选CO2耐受植物, 为项目区域农业发展与环境风险管理提供保障。

参考文献:

- [1] GCCSI. The global status of CCS. Global CCS Institute Report, 2018.
- [2] IPCC. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [3] Leung D Y C, Caramanna G, Maroto-Valer M M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 39(39): 426–443.
- [4] Christensen J M. Carbon dioxide capture and storage[J]. Environmental policy collection, 2007, 33(4): 303–30.
- [5] 王亮方,刘辉煌.国外CCS技术发展与产业化的研究综述[J].系 统工程,2013(8):81-86.

Wang L F, Liu H H. Reviewing foreign scholars' research on carbon capture and storage(CCS) technology development and industrialization[J]. Systems Engineering, 2013(8): 81–86. (in Chinese)

- [6] 李 琦,刘桂臻,张 建,等. 二氧化碳地质封存环境监测现状及 建议[J]. 地球科学进展,2013,28(6):718-727.
 Li Q, Liu G Z, Zhang J, et al. Status and suggestion of environmental monitoring for CO₂ geological storage[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 718-727. (in Chinese)
- [7] 刘兰翠,曹 东,王金南.碳捕获与封存技术潜在的环境影响及 对策建议[J]. 气候变化研究进展,2010,6(4):290-296.
 Liu L C, Cao D, Wang J N. Environmental impacts of carbon capture and storage technology and some suggestions[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(4): 290-296. (in Chinese)
- [8] 吴江莉,马俊杰.浅议CO2地质封存的潜在风险[J].环境科学导

刊,2012,1(6):89-93.

Wu J L, Ma J J. A discussion about potential risks of geological storage of $CO_2[J]$. Environmental Science Survey, 2012, 1(6): 89–93. (in Chinese)

- [9] Sharkey T D. Photosynthesis in intact leaves of C₃ plants: Physics, physiology and rate limitations[J]. Botanical Review, 1985, 51(1): 53-105.
- [10] Mortensen L M. Review: CO₂ enrichment in greenhouses. Crop responses[J]. Scientia Horticulturae, 1987, 33(1): 1–25.
- [11] Rogers H H, Peterson C M, Mccrimmon J N, et al. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 15(6): 749–752.
- [12] Stenhouse M, Arthur R, Wei Z. Assessing environmental impacts from geological CO₂ storage[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1895– 1902.
- [13] 蔡博峰.国际典型二氧化碳地质封存及其环境监测[J].世界环境,2012(3):48-51.
 Cai B F. Typical CO₂ geological storage and the environment moni-

toring[J]. World Environment, 2012(3): 48–51. (in Chinese)

- [14] 蔡博峰,格雷格·利蒙,刘兰翠.二氧化碳地质封存和环境监测[M].化学工业出版社,2013.
- [15] 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.
- [16] Krüger M, Jones D, Frerichs J, et al. Effects of elevated CO₂ concentrations on the vegetation and microbial populations at a terrestrial CO₂ vent at Laacher See, Germany[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 5(4): 1093–1098.
- [17] 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.
- [18] 吴江莉.高浓度 CO₂对 C₃作物生长发育的影响研究[D].西北大学,2013.
- [19] 田 地.地质封存 CO₂泄漏对农田作物及其土壤环境的影响研究[D].安徽师范大学,2013.
- [20] 王 蓉.地质储存二氧化碳泄漏对地表典型植物的影响[D].长 安大学,2015.
- [21] 邓红章,张慧慧,李春荣,等.人工模拟地质封存 CO₂泄漏对土 壤酶活性的影响[J].应用化工,2017,46(1):4-9.
 Deng H Z, Zhang H H, Li C R, et al. Effect of artificial simulation for sealed CO₂ leakage on soil enzyme activities[J]. Applied Chemical Industry, 2017, 46(1): 4-9. (in Chinese)
- [22] Ziogou F, Gemeni V, Koukouzas N, et al. Potential environmental impacts of CO₂ leakage from the study of natural analogue sites in Europe[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 3521–3528.
- [23] 马 欣,张雪艳,田 地,等.大刍草作为地质封存 CO₂泄漏指示植物的评估[J].农业工程学报,2017,33(18):224-229.
 Ma X, Zhang X Y, Tian D, et al. Assessment on Zea diploperennis L. as bio- indicator of CO₂ leakage from geological storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(18): 224-229. (in Chinese)

薛

- [25] Kimball B A, Mauney J R, Nakayama F S, et al. Effects of increasing atmospheric CO₂ on vegetation[M]. CO₂ and biosphere, 1993.
- [26] Rogers H H, Runion G B, Prior S A, et al. 8 Response of plants to elevated atmospheric CO₂: root growth, mineral nutrition, and soil carbon[J]. Carbon Dioxide & Environmental Stress, 1999, 75 (4): 215-244.
- [27] Bowes G. Facing the inevitable: Plants and increasing atmospheric CO₂[J]. Annu.rev.plant Physiol. plant Mol. biol. 2003, 449(1): 309– 332.
- [28] Delucia E H, Sasek T W, Strain B R. Photosynthetic inhibition after long-term exposure to elevated levels of atmospheric carbon dioxide[J]. Photosynthesis Research, 1985, 7(2): 175–184.
- [29] Yelle S, Beeson J R C, Trudel M J, et al. Acclimation of two tomato species to high atmospheric CO₂[J]. Plant Physiology, 1989, 90: 1473–1477.
- [30] Peet M M. Acclimation to high CO₂ in monoecious cucumbers: I. Vegetative and Reproductive Growth[J]. Plant Physiology, 1986, 80 (1): 59–62.
- [31] 王春乙,潘亚茹,白月明,等. CO₂浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究[J]. 气象学报,1997,55(1):86-94.
 Wang C Y, Pan Y R, Bai Y M, et al. The experiment study of effects doubled CO₂ concentration on several main crops in China[J]. Acta Meteorological Sinica, 1997, 55(1): 86-94. (in Chinese)
- [32] 王春乙,高素华,潘亚茹,等.模拟大气中CO₂浓度对大豆影响的试验[J].生态学报,1995,15(2):148-154.
 Wang C Y, Gao S H, Pan Y R, et al. Experiment with influence of CO₂ concentration in simulated atmosphere on soybean[J]. Acta Ecological Sinica, 1995, 15(2): 148-154. (in Chinese)
- [33] 郭建平,高素华,白月明,等.CO₂浓度倍增对大豆影响的试验研究[J].大气科学,1996,20(2):243-249.
 Guo J P, Gao S H, Bai Y M, et al. An experiment of the impact of CO₂ concentration doubling on soybean growth[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1996, 20(2): 243-249. (in Chinese)
- [34] 白月明,王春乙,温 民.不同 CO₂浓度处理对冬小麦的影响
 [J]. 气象,1996,22(2):7-11.
 Bai Y M, Wang C Y, Wen M, et al. Impacts of different CO₂ concentration treatment on white wheat[J]. Meteorological Monthly, 1996, 22(2):7-11. (in Chinese)

[35] 杨松涛,胡玉熹.CO₂浓度倍增对10种禾本科植物叶片形态结构的影响[J].植物学报,1997,39(9):859-866. Yang S T, Hu Y X. Effect of CO₂ concentration doubling on the leaf morphology and structure of 10 species in gramineae[J]. Acta Botanica Sinica, 1997, 39(9): 859-866. (in Chinese)

璐等:玉米作为地质封存CO2泄漏耐受植物的评估

- [36] Sharkey T D. Photosynthesis in intact leaves of C₃ plants: physics, physiology and rate limitations[J]. Botanical Review, 1985, 51(1): 53-105.
- [37] Wong S. Elevated atmospheric partial pressure of CO₂ and plant growth[J]. Oecologia, 1990, 23(2): 171–180.
- [38] Zhang X, Xin M, Zhi Z, et al. CO₂ leakage-induced vegetation decline is primarily driven by decreased soil O₂[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 171: 225–230.
- [39] 孙周平,李天来,范文丽.根际二氧化碳浓度对马铃薯植株生长的影响[J].应用生态学报,2005,16(11):2097-2101. Sun Z P, Li T L, Fan W L. Effects of rhizosphere CO₂ concentration on potato growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (11): 2097-2101. (in Chinese)
- [40] 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 Y, Ma X, Li Y E, et al. Impact assessment and tolerable threshold value of CO₂ leakage from geological storage on agro-ecosystem [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(2): 196–205. (in Chinese)

- [41] 纪 翔,马 欣,韩耀杰,等. 箱体模拟地质封存 CO:泄漏速度 差异对植物的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(2):242-247.
 Ji X, Ma X, Han Y J, et al. Effect of different leakage speeds on plants in carbon capture and storage by simulation in chamber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 242-247. (in Chinese)
- [42] 潘瑞炽. 植物生理学(第5版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2015.
- [43] Hatch M D, Slack C R. Photosynthesis by sugar-cane leaves. A new carboxylation reaction and the pathway of sugar formation[J]. Biochemical Journal, 1966, 101(1): 103.
- [44] Sayre R T, Kennedy R A. Photosynthetic enzyme activities and localization in mollugo verticillata populations differing in the levels of C₃ and C₄ cycle operation[J]. Plant Physiology, 1979, 64(2): 293– 299.
- [45] Koch P L, Diffenbaugh N S, Hoppe K A. The effects of late quaternary climate and pCO₂ change on C₄ plant abundance in the southcentral United States[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2004, 207(3): 331–357.
- [46] Cerling T E, Wang Y, Quade J. Expansion of C₄ ecosystems as an indicator of global ecological change in the late miocene[J]. Nature, 1993, 361(6410): 344–345.
- [47] Caemmerer S V, Furbank R T. The C4 pathway: an efficient CO2 pump[J]. Photosynthesis Research, 2003, 77(2-3): 191-207. (责任编辑:栾天宇)

93