#### DOI: 10.5846/stxb201805311201

韩耀杰,张雪艳,马欣,纪翔.地质封存 CO<sub>2</sub>泄漏对玉米根系形态的影响.生态学报,2019,39(20): - . . Han Y J, Zhang X Y, Ma X, Ji X.Impacts of stored CO<sub>2</sub> leakage on Root Morphology of *Maize*.Acta Ecologica Sinica,2019,39(20): - .

# 地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏对玉米根系形态的影响

韩耀杰1,张雪艳2,3\*,马 欣1,纪 翔1

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 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101
 3 中国科学院中国农业政策研究中心,北京 100101

**摘要:**碳捕集与封存(Carbon Capture and Storage, CCS)是应对全球气候变化、实现煤炭清洁利用的有效手段之一,但是地质封存的CO<sub>2</sub>存在泄漏的风险,可能对农田生态系统产生重大威胁,影响我国粮食安全。根系生长是地上部和地下部相互作用、相互促进的统一过程,其形态特征对作物生产力有显著影响,但CCS泄漏对植物根系的影响评估尚不多见。本文以玉米为研究对象,采用盆栽底部通入CO<sub>2</sub>的方法模拟不同CO<sub>2</sub>泄漏情景,研究CK(0g/(m<sup>2</sup> · d))和G1000(1000g/(m<sup>2</sup> · d))和G2000(2000 g/(m<sup>2</sup> · d))三种泄漏情景下CO<sub>2</sub>对玉米根系形态的影响。结果表明:CO<sub>2</sub>泄漏对玉米根系形态有明显的影响,随着泄漏量的增大总根长从40290.81 cm减少至21448.18 cm,减少46.77%,其中细根大幅减少;CO<sub>2</sub>泄漏造成玉米明显减产,最大减产率达26.64%;玉米的地上部生物量较地下部生物量对CO<sub>2</sub>泄漏更加敏感。综合来看,随着CO<sub>2</sub>泄漏量增大,对玉米根的生长、地上部生物量、地下部生物量以及产量有显著的抑制作用。作物根系形态对封存CO<sub>2</sub>泄漏的响应可为CCS泄漏监测和生态修复提供系统科学依据。

关键词:CCS;玉米;CO,泄漏;根系形态

# Impacts of stored CO<sub>2</sub> leakage on Root Morphology of Maize

HAN Yaojie<sup>1</sup>, ZHANG Xueyan<sup>2,3,\*</sup>, MA Xin<sup>1</sup>, JI Xiang<sup>1</sup>

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Center for Chinese Agricultural Policy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Carbon capture and storage (CCS) is an effective technology to address climate change and achieve clean utilization of coal. However, high risk of  $CO_2$  leakage from geo-structure still exists, which may pose a threat to farmland ecosystem and food security in China. Root growth is a unified process of interaction and mutual promotion between the upper and underground parts, and the morphological characteristics of root in soil has a great impact on crop productivity. However, the assessment on the effects of CCS leakage on plant roots is rarely reported. In this paper, maize was selected to reveal the response of crop to  $CO_2$  leakage by pot experiment. Three treatments,  $CK (0 g/(m^2 \cdot d))$ , G1000 (1000 g/(m^2 \cdot d)), and G2000 (2000 g/(m^2 \cdot d)) were designed to simulate different scenarios of  $CO_2$  leakage by controlling flux of  $CO_2$  at the bottom of pot. The results showed:  $CO_2$  leakage had a significant effect on the root morphology of maize. The total root length decreased from 40290.81 cm to 21448.18 cm with increase of  $CO_2$  leakage treatments, the maximum yield reduction was 26.64%. The aboveground biomass was more sensitive than underground biomass under  $CO_2$  leakage. With the

收稿日期:2018-05-31; 网络出版日期:2019-00-00

基金项目:国家自然科学基金(No. 31600351);国家重点研发计划(No. 2016YFC0500508)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xyzhang@igsnrr.ac.cn

increase of  $CO_2$  leakage, there was a significant inhibition effect on the root development, aboveground biomass, underground biomass, and yield of maize. The responses of crop root morphology to  $CO_2$  leakage provide scientific basis for CCS leakage monitoring and ecological restoration.

#### Key Words: CCS; Maize; CO, leakage; root morphology

二氧化碳的捕捉和封存技术(简称 CCS)是将二氧化碳从大型排放源(如电厂、化工厂等)捕集、运输并注 入地下深部储层进行永久封存的技术,是实现煤炭清洁高效利用、应对全球气候变化的有效技术手段之一。 目前全球有 22 个大型 CCS 设施正在运行或建设中,每年可减排 3700 万吨的 CO<sub>2</sub>。全球 CCS 研究机构 (Global CCS Institute)指出在过去 10 年中 CCS 取得了快速发展,尤其是在美国、日本、欧洲、中东、中国进展显 著。在亚太地区有 11 个 CCS 项目在进行中,其中有 8 个位于中国,我国封存潜力巨大,仅在内蒙古的鄂尔多 斯就已经封存了 30 万吨的 CO<sub>2</sub>,且国际能源署(IEA)专家预计,未来一半以上新建项目可能在中国<sup>[1]</sup>。但是 随着 CCS 项目的广泛开展,其安全性和可能存在的风险也越来越引起人们的关注<sup>[2]</sup>。由于封存的地质条件 和人类活动的不确定性,注入的 CO<sub>2</sub>存在着泄漏的风险,加之我国地形条件复杂,生态环境脆弱,一旦发生泄 漏,其风险会远高于其他国家<sup>[3]</sup>。因此开展 CO<sub>2</sub>泄漏后的影响研究,对于泄漏检测和生态修复很有必要。

全球已开展了大量的 CO<sub>2</sub>泄漏对近地表生态环境影响的研究试验。土壤是 CO<sub>2</sub>泄漏最直接的载体,CO<sub>2</sub> 从深层泄漏到地表,不仅会引起土壤中化学、物理过程的变化,还会影响土壤中的微生物和植物生态系 统<sup>[4,5]</sup>。对西班牙雷亚尔城 Campo de Calatrava 天然二氧化碳泄漏源地区进行研究发现,纤毛虫群落的组成和 结构受到二氧化碳的显著影响,群落多样性随着 CO<sub>2</sub>的增多而减少<sup>[6,7]</sup>。在人工模拟的泄漏试验中也有观测 到 CO<sub>2</sub>泄漏量增大和泄漏时间持续较长的情景下,土壤细菌丰富度和多样性明显下降<sup>[8]</sup>。使用人工气候箱的 方法进行泄漏模拟了土壤中离子浓度的变化,发现除 HCO<sub>3</sub> 以外 K<sup>\*</sup>, Na<sup>\*</sup>, Ca<sup>2\*</sup>, Mg<sup>2\*</sup>, Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 呈一致的变 化规律即在低浓度 CO<sub>2</sub>下降低,高浓度 CO<sub>2</sub> 下显著升高<sup>[5]</sup>。伍洋等<sup>[21,14]</sup>在进行模拟 CO<sub>2</sub>的泄漏试验时发现 土壤的 pH 和土壤中 O<sub>2</sub>浓度均降低。更有研究指出,当 CO<sub>2</sub>发生泄漏时,土壤中的 CO<sub>2</sub>浓度和 O<sub>2</sub>浓度呈现显 著的负相关<sup>[9]</sup>。除了这些 CO<sub>2</sub>泄漏的直接影响指标外,也不乏植物对封存 CO<sub>2</sub>泄漏的响应研究。基于自然释 放源的研究表明当 CO<sub>2</sub>达到一定浓度时,植物的呼吸和光合受到抑制,最终生长延迟或死亡<sup>[10-12]</sup>。伍洋 等<sup>[13,14]</sup>在玉米播种一个月后进行不同泄漏通量(500g/(m<sup>2</sup> · d),1000 g/(m<sup>2</sup> · d),1500 g/(m<sup>2</sup> · d),2000 g/ (m<sup>2</sup> · d))处理,发现株高、叶面积、以及根长都呈显著的下降趋势。Ko D 等<sup>[15]</sup>对目前已有的模拟泄漏试验 进行对比分析表明当土壤中 CO<sub>2</sub>的浓度很高时,植物会很快出现胁迫响应,这种胁迫响应主要体现在净光合、 蒸腾速率、株高、生物量等地上部指标。

根系生长是地上部和地下部相互作用、相互促进的统一过程,地上部叶片为根系的生长发育提供所需的 有机质,根系是保证叶片的水肥供应,更好的进行光合的基础,两者共同作用影响玉米生长<sup>[16,17]</sup>。且与根系 的净生物量相比,根系在土壤中的形态特征对作物生产力作用更大<sup>[18]</sup>。目前大部分的泄漏模拟研究试验大 都是对植物地上部生理生化指标以及生物量的测定,针对植物地下部的研究尚不多见,少量的关于植物根部 的研究也只是对根系生物量的简单测量<sup>[19]</sup>,没有系统的对植物根系形态进行梳理。因此通过模拟地质封存 的 CO<sub>2</sub>泄漏试验,研究作物根系对 CO<sub>2</sub>的泄漏响应、揭示其形态特征变化以及其与地上部生物量的相互关系, 对于系统分析植物对 CO<sub>2</sub>泄漏的响应很有必要。玉米作为我国的三大粮食作物之一,也是近两年我国进口量 最大的粮食作物,对 CO<sub>2</sub>的泄漏较双子叶植物有更好的耐受性。因此本文以玉米为研究对象,自玉米拔节期 开始不间断的进行模拟泄漏处理至成熟期结束,评估地质封存的 CO<sub>2</sub>泄漏对玉米根系形态的影响,为后期 CO<sub>2</sub>泄漏的监测和修复提供系统科学依据。

## 1 材料和方法

#### 1.1 试验场地

该试验位于中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所北京顺义农业环境综合试验示范基地(116° 55'26.76"E, 40°5'41.87"N), 平均海拔高程 34 m, 属大陆性季风气候, 是半干旱与半湿润、温带与中温带的过 渡带,年均日照 2684 h,有效积温 4500℃,无霜期 195d 左右。取当地农田表层土壤 0—20 cm 装入栽培箱中, 压实后栽培箱土壤厚度为 50 cm。供试土壤为潮褐土, pH 8.38, 有机质 15.48 g/kg, 全氮 0.37 g/kg, 全磷 0.61 g/kg,全钾 20.42 g/kg。该试验从 2017 年 6 月 19 日播种开始,每箱播种玉米 5 粒,7 月 3 日间苗,根据整体长 势,每箱留下一株玉米,使得整体长势相当。7月12号开始通气进行CO,的泄漏处理,2017年9月20号,通 气停止,总通气时间为70d。期间水肥根据当地大田常规处理。

#### 1.2 试验处理

该试验在人工制作的 CO,泄漏控制平台中进行,通过人为的控制通入栽培箱底部的 CO,的注入速率和通 量模拟不同的泄漏情景。该平台由简单的生态系统、CO,控制释放装置、检测记录和人工管理等部分组成(图 1)。模拟泄漏的人工 CO,控制释放装置主要由 CO,气罐、减压阀、气体导管、流量计、阀门和智能人工控制箱 等组成。其中栽培箱长宽均为 50 cm,高为 100 cm,孔径 0.5 cm 的透气性分隔片将整个栽培箱分为两个部分, 上部为供植物生长的土室(高度为80 cm,其中填充的土壤厚度为50 cm)下部为均匀释放 CO2气体的气室(高 度为20 cm)。



图1 CO,控制释放装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> release device

该试验一共包括3个CO,的泄漏处理,其中一个为 CK 空白对照即无泄漏处理,另外两个泄漏处理分别为  $G1000(1000 \text{ g/(m^2 \cdot d)}), G2000(2000 \text{ g/(m^2 \cdot d)}),$ 把 CO<sub>2</sub>的注入通量作为泄漏指标<sup>[19]</sup>,各处理重复三次。 通过调节盆栽底部阀门的开口大小来控制泄漏通量,该 通量设定自试验开始之日起,至整个试验结束后关闭。 其中泄漏通量和泄漏速率之间的关系转化如下:

$$F = \frac{\rho v}{s} \tag{1}$$

式中F为CO<sub>2</sub>的注入通量,g/(m<sup>2</sup> · d); v为CO<sub>2</sub>的注入 速率,ml/min; ρ为常压下 CO<sub>2</sub>的密度,约为1.977 g/L; s 为栽培箱横截面面积,约为0.25 m<sup>2</sup>。可以看出注入速 率分别是 CK(0 ml/min), G1000(88 ml/min), G2000(176 ml/min)。



图 2 模拟 CO<sub>2</sub>泄漏试验现场图 Fig.2 Field map of simulated CO<sub>2</sub> release device

1.3 样品采样及指标测定

4

在玉米成熟期,对其地上部和地下部进行取样。地上部生物量测定:田间用剪刀在土壤表层高度剪下玉 米茎秆,做好标记,牛皮纸包裹带回实验室,首先在105℃鼓风干燥箱中烘30 min 杀青,然后降温至50℃烘至 恒重,干燥后的样品与牛皮纸袋一块称量,而后扣除牛皮纸袋重量,得出玉米地上部干重。玉米地下部生物量 测定:地上部取样结束后,将栽培箱放倒,用水管缓冲栽培箱中土壤,待全部冲走再将根系缓慢从栽培箱中取 出装进盛水的自封袋,放入收纳箱,带回实验室并逐株放在冲洗盆中,用较小水流缓慢冲洗,后用胶头滴管和 镊子清洗侧根分叉处,最后用蒸馏水浸泡冲洗干净,每株节根逐个剪下装入自封袋中,放入-20℃冰箱冷冻 保存。

根系形态测定:扫描时将冷冻根系取出静置解冻,每条节根均匀剪成 10 cm—15 cm 小段,根据每小段的 侧根量确定放入根盘的小根段数量,用镊子整理节根侧根系,尽量避免重叠。将根盘放入 Epson 根系扫描仪 进行根系扫描,根据根量不同,每株玉米扫描图片 30 张—120 张不等。并用 Win-Rhizo 根系分析软件 (WinRhizo 2013 Pro)对扫描根系图片进行逐个处理,得出每张图片的根系形态指标如直径、长度、体积、表面 积等数据,后对玉米根系的所有扫描图片数据信息进行整理分析,得出每株玉米根系形态指标数据。扫描结 束后,试验用纸吸干表面水分,装入牛皮纸袋,并将前期清洗根系和摆盘过程中不可避免的根系损失量装入, 放入烘箱 50℃烘干至恒重称量。

## 1.4 数据处理及分析

通过对成熟期玉米根系的总根长、平均直径、总体积、总表面积等形态指标以及地上部干质量、地下部干质量和产量进行测定,对比不同泄漏处理之间与空白对照的差异,评估玉米的根系形态特征以及产量对 CO<sub>2</sub> 泄漏的响应。采用 Microsoft Excel 和 Origin 8.0 进行数据的简单处理及作图、SPSS 25.0 软件进行相关性分析, 单因素相关显著性检验采用 LSD(least significant difference),置信水平取 95%。

### 2 结果分析

#### 2.1 不同泄漏情景下玉米的株高

图 3 展示了对照和两个 CO<sub>2</sub>泄漏处理条件下玉米的株高随时间的变化情况。泄漏处理下,玉米的株高随着泄漏时间的增加,较 CK 下降明显。7 月 12 日对G1000 和 G2000 分别进行相应通量的泄漏处理,7 月 19日至 7 月 21 日,泄漏处理 G1000(110.97±2.19 cm)和G2000(105.6±3.86 cm)的株高较空白对照 CK(117±3.01 cm)已出现降低趋势。7 月 26 日 G2000 泄漏处理下玉米的株高(126.35±5.26 cm)显著低于 CK(144.4±0.7 cm)。7 月 26 日至 8 月 12 日,空白对照下玉米的株高显著高于 G1000 和 G2000(*P*<0.05)。8 月 16 日后玉米的株高基本趋于稳定,空白对照 CK 和泄漏处理 G1000







和 G2000 玉米株高分别为 204.83±8.95 cm、198±9.16 cm 和 185.83±2.16 cm。

## 2.2 不同泄漏情景下玉米根系形态

图 4 展示了 CK 和两个不同泄漏处理下,成熟期玉米根系形态指标的分布状况。CO<sub>2</sub>泄漏对玉米根系的 生长抑制主要体现在总根长、总表面积和总体积上。其中总根长对 CO<sub>2</sub>的泄漏最为敏感,处理间差异显著。 G1000 和 G2000 泄漏情景下的总根长显著(P<0.05)低于 CK,分别减少了 32.41%和 46.77%,G2000 较 G1000 总根长减少了 21.24%。成熟期玉米根系的平均直径随着泄漏通量的增大差异不大,CK、G1000、G2000 三种 情形下平均直径分别为 0.0531 mm、0.0587 mm,0.0600 mm,任意两组最大相差不超过 0.0070 mm。玉米根系 的总表面积大小为 CK>G1000>G2000,其中 CK 的表面积大于 G1000 但不显著,显著大于 G2000,G1000 和 G2000 存在差异但不显著。G2000 情景下玉米根系总体积较 CK 和 G1000 分别减少了 30.78%和 14.92%。



图 4 不同 CO<sub>2</sub>泄漏情景下玉米的根系形态



不同字母表示情景间差异显著(P<0.05)

## 2.3 不同泄漏情景下玉米的生物量

在玉米成熟期,地上部干物质量对封存的 CO<sub>2</sub>泄漏呈现明显的响应,泄漏处理下的玉米地上部干物质量 低于对照,且泄漏通量越大玉米地上部生物量减少越多(图 5)。但地下部干物质量对 CO<sub>2</sub>泄漏的响应不明 显。G1000 和 G2000 两种泄漏情景下地上部干物质量较 CK 显著减少(P<0.05),减少量为 60.43 g 和 98.64 g,减少率分别为 18.03%、29.43%。就地下部干重而言,CK(25.07 g)、G1000(22.062 g)、G2000(18.42 g)对 CO<sub>2</sub>泄漏的响应则不明显(P>0.05)。就根冠比而言,不同于生物量对 CO<sub>2</sub>泄漏的响应,G1000 和 G2000 均略 大于 CK。

表1显示了两种泄漏处理 G1000 和 G2000、以及空白对照 CK 在收获处理后期玉米的产量状况,随着封存 CO<sub>2</sub>泄漏量的增大,产量呈下降趋势。G1000(153.94±20.04 g)和 G2000(144.16±9.90 g)相较 CK 产量分别 减少了 42.46 g和 52.34 g,减少率分别为 21.66%和 26.64%。其中 CK 和 G2000 在 0.05 水平上存在显著差异。

玉米产量的单因素 ANOVA 检验结里分析

从1 工术/ 主用于档录加10000 但想用术力仍											
Table 1         Analysis of maize yield by single factor ANOVA test											
泄漏情景 Leakage scenarios	产量 Yield/g	n	р	减少量 Decrement/g	减少率 Decrease rate/%						
СК	196.5±3.53a	3									
G1000	$153.94 \pm 20.04$ ab	3	0.061	42.56	21.66%						
G2000	$144.157 \pm 9.90 \mathrm{b}$	3	0.030	52.34	26.64%						

不同字母表示情景间差异显著(P<0.05)

## 2.4 根系形态指标与生物量的相关分析

各根系形态指标之间呈现出一定的相关关系(表 2),根表面积和根长、根体积和根表面积、根表面积和 根干重、根体积和根干重均在 0.01 水平上呈现显著正 相关。地上部指标产量和地上部干重在 0.01 水平上表 现出一定的正相关关系。玉米的直径和根长呈现出一 定的负相关关系,但不显著。此外,根系总长度对地上 部干重和产量会有不同程度的影响,根长与地上部干重 在 0.01 水平上呈现显著的正相关关系,与产量的正相 关关系在 0.05 水平上才有所体现。根表面积与地上部 干重呈现显著正相关关系,与产量呈现正相关关系,但 不显著。由图 4 可知,总根长和地上部干重、根表面积



图 5 不同 CO<sub>2</sub>泄漏情景下玉米的生物量

Fig.5 Biomass of maize under different CO<sub>2</sub> leakage scenarios

和地上部干重均表现出很强的线性关系,但根系其他形态指标与地上部生物量的相关性则不强。

Table 2         Analysis of the correlation between root morphological indexes and biomass										
根长 Root length/cm	根表面积 Root surface area/cm <sup>2</sup>	根体积 Root volume/cm <sup>3</sup>	平均直径 Average diameter/mm	产量 Yield/g	地上部干重 Shoot dry weight/g	地下部干重 Root dry weight/g				
1										
0.900 **	1									
0.627	0.900 **	1								
-0.400	0.026	0.452	1							
0.687 *	0.588	0.338	-0.346	1						
0.830 **	0.770 *	0.524	-0.315	0.905 **	1					
0.572	0.817 **	0.867 **	0.339	0.415	0.652	1				
	Table 2         Anal           根长         Root           length/cm         1           0.900 **         0.627           -0.400         0.687 *           0.830 **         0.572	Table 2         Analysis of the correct           根长         根表面积           Root         Root surface           length/cm         area/cm <sup>2</sup> 1         0.900**           0.627         0.900**           -0.400         0.026           0.687*         0.588           0.830**         0.770*           0.572         0.817**	Table 2         Analysis of the correlation between r           根长         根表面积         根体积           Root         Root surface         Root           length/cm         area/cm <sup>2</sup> volume/cm <sup>3</sup> 1         0.900**         1           0.627         0.900**         1           -0.400         0.026         0.452           0.687*         0.588         0.338           0.830**         0.770*         0.524           0.572         0.817**         0.867**	Table 2         Analysis of the correlation between root morphologica           根长         根表面积         根体积         平均直径           Root         Root surface         Root         Average           length/cm         area/cm <sup>2</sup> volume/cm <sup>3</sup> diameter/mm           1         0.900 **         1         -0.400         0.026         0.452         1           -0.400         0.026         0.452         1         -0.346           0.830 **         0.770 *         0.524         -0.315           0.572         0.817 **         0.867 **         0.339	Table 2         Analysis of the correlation between root morphological indexes and bit           根长         根表面积         根体积         平均直径         产量           Root         Root surface         Root         Average         j产量         Yield/g           length/cm         area/cm <sup>2</sup> volume/cm <sup>3</sup> diameter/mm         Yield/g           1         0.900**         1         -0.400         0.026         0.452         1           -0.400         0.026         0.452         1         -0.346         1           0.687*         0.558         0.338         -0.315         0.905**           0.572         0.817**         0.867**         0.339         0.415	Table 2         Analysis of the correlation between root morphological indexes and biomass           根长         根表面积         根体积         平均直径 $\stackrel{\stackrel{\rightarrow}{\Gamma}\stackrel{\oplus}{\Pi}}{Yield/g}$ 地上部干重           Root         Root surface         Root         Average $\stackrel{\stackrel{\rightarrow}{\Gamma}\stackrel{\oplus}{\Pi}$ Shoot dry           length/cm         area/cm <sup>2</sup> volume/cm <sup>3</sup> diameter/mm $\stackrel{\stackrel{\rightarrow}{\Gamma}\stackrel{\oplus}{\Pi}$ Shoot dry           1         0.900**         1         -         -         -         -           0.627         0.900 **         1         -         -         -         -           -0.400         0.026         0.452         1         -         -         -         -           0.687 *         0.588         0.338         -0.346         1         -         -           0.572         0.817 **         0.867 **         0.339         0.415         0.652				

表 2 根系形态指标与生物量的相关性分析

\*\*. 在 0.01 级别(双尾),相关性显著;\*.在 0.05 级别(双尾),相关性显著

## 3 讨论

从成熟期玉米的根系形态指标可以看出泄漏情景下(G1000和G2000)玉米的总根长较CK有显著减少(P<0.05),减少率分别为32.41%和46.77%。CO<sub>2</sub>泄漏引起土壤中CO<sub>2</sub>浓度升高,O<sub>2</sub>浓度减小<sup>[9]</sup>,pH降低的结果已被论证<sup>[13,21,22]</sup>,且植物根系的深度易受到环境因素的影响<sup>[23]</sup>,张雪艳、伍洋等通过模拟CO<sub>2</sub>泄漏实验,测量得出根系延伸总长显著降低<sup>[14,24,25]</sup>。本文从根系系统分析的角度出发,得出CO<sub>2</sub>泄漏对0.1mm 直径分辨率下植株总根长的抑制作用随着泄漏量的增大逐渐增强。CO<sub>2</sub>泄漏对玉米根系的平均直径并无显著的影响,有略微增大趋势,G1000和G2000较CK分别增大10.56%和13.03%。但这种略微的增大并不能抵消CO<sub>2</sub>泄漏对根系系统的抑制作用,其总体积和总面积由大到小依次为CK,G1000和G2000。说明根系长度响应CO<sub>2</sub>泄漏最为敏感。三种处理下根系干重并无显著变化,由此可以推断CK的细根含量要高于G1000和G2000。

本研究中 CK 的地上部干物质量显著大于 G1000 和 G2000(P<0.05),株高分布也有这一趋势(图 3),这 一差异趋势和根系总长度分布状况一致,不同的 CO<sub>2</sub>泄漏处理导致玉米根系干重有所减少,G1000 和 G2000 较 CK 分别减少了 12.01%和 26.55%。说明玉米根系对 CO<sub>2</sub>泄漏的响应敏感度较地上部较弱。伍洋等<sup>[25]</sup>对 玉米进行 CO<sub>2</sub>的泄漏处理,在玉米拔节期对玉米的生物量进行测量得出在 G2000 的泄漏情景下玉米的地下部 干重显著低于 CK,地下部相较于地上部对 CO<sub>2</sub>的泄漏更为敏感。这两种结果与鄂玉江等人<sup>[16]</sup>对玉米的生长



图 0 版示形态指称与地工即工物重的线性关示

Fig.6 Linear relationship between root morphological indexes and aboveground biomass

规律研究吻合,他指出植物根系在前期生长中所占的比重大后期小,所以对 CO<sub>2</sub>泄漏的敏感程度,前期地下部 敏感,后期地上部较敏感。因此 CO<sub>2</sub>泄漏处理下 G1000 和 G2000 的根冠比会高于 CK。同时也说明泄漏时间 的长短会影响玉米根系对 CO<sub>2</sub>泄漏的敏感程度。I. Macek<sup>[26]</sup>在对天然泄漏源短期的泄漏研究中指出 CO<sub>2</sub>浓 度的升高对根系呼吸的抑制作用较弱,但是这种抑制作用在 CO<sub>2</sub>浓度非常高的情况下则表现明显。欧洲的 FP7,RISCS(Research into Impacts and Safety in CO<sub>2</sub>Storage)项目通过对希腊弗洛里纳盆地牧场中自然泄漏源 附近植物进行研究表明,一些植物在长期的高 CO<sub>2</sub>浓度下,对 CO<sub>2</sub>富集的环境会产生一定的适应性<sup>[27]</sup>。植物 是否会对 CO<sub>2</sub>泄漏处理产生一定的抗性,仍需更多的试验论证。

CO<sub>2</sub>泄漏可以导致玉米减产,且泄漏通量越大减产越多。本研究中,G1000 泄漏处理下减产率超过 20%, 在 C2000 处理下已显著减产(P<0.05)。根系系统通过吸收土壤中的水分和养分供给植物的生长,根系系统 吸收水分和养分的能力在很大程度上可以通过根长评定<sup>[28]</sup>。其中直径小于 2 mm 的细根吸收水分和养分能 力远远大于较老和较粗根系<sup>[20]</sup>。可以看出,封存 CO<sub>2</sub>的泄漏主要通过减少根系的长度影响其生长与产量。 张雪艳等<sup>[19]</sup>在模拟 CO<sub>2</sub>泄漏对三叶草生长的影响中得出 G1000 情景下三叶草的总干质量比 CK 略少,G2000 情景下总干重减小幅度增大,但是未出现显著性差异。说明较三叶草而言,玉米对 CO<sub>2</sub>的泄漏更为敏感。从 玉米根系形态与地上生物量的相关性分析可以看出玉米根系长度与根表面积、地上部生物量存在一定的线性 正相关关系,表明玉米根系越长、面积越大,地上部干物质的积累越多。结合图 4 和图 5 CO<sub>2</sub>泄漏对玉米地上 部和地下部的协同影响方面,得出 CO,泄漏对玉米根长,根表面积和地上部生物量的抑制作用具有一致性。

#### 4 结论

本文通过模拟封存 CO<sub>2</sub>的泄漏试验评估 CO<sub>2</sub>泄漏对玉米根系形态的影响。结果表明,封存的 CO<sub>2</sub>泄漏会

对玉米的总根长有明显的抑制作用,泄漏通量越大抑制作用越强,抑制作用最大可使总根长减少46.77%;玉米的地上部生物量相较于地下部生物量对 CO<sub>2</sub>泄漏更敏感;长期的 CO<sub>2</sub>的泄漏会造成玉米产量的明显减少,减产率最大为 26.43%;封存 CO<sub>2</sub>泄漏对玉米总根长、总表面积与地上部的干物质量的抑制作用表现出协同一致性,均随着泄漏通量的增多而减少。模拟封存的 CO<sub>2</sub>泄漏对作物根系形态的影响仍需继续开展深入研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Global CCS Institute. The Global status of CCS: 2017 [EB/OL]. www.globalccsinstitute.com/files/content/mediarelease/123543/files/globalstatus-ccs-2017.pdf
- [2] De C H. Advocacy for carbon capture and storage could arouse distrust. Nature, 2010, 463(7279): 293.
- [3] 谢健,魏宁,吴礼舟,张可霓,许模. CO<sub>2</sub>地质封存泄漏研究进展. 岩土力学, 2017, 38(S1):181-188.
- [4] Zhou X, Lakkaraju V R, Apple M, Dobeck L M, Gullickson K, Shaw J A, Cunningham A B, Wielopolski L, Spangler L H. Experimental observation of signature changes in bulk soil electrical conductivity in response to engineered surface CO<sub>2</sub> leakage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 7(3):20-29.
- [5] Ma J, Zhu X, Liu D, Wang S, Xue L, Li Q, Ma J, Li X, Nie L, Zhao X, Qi B, Wei Y, Jiang S, Yu H, Huang C. Effects of Simulation Leakage of CCS on Physical-chemical Properties of Soil. Energy Proceedia, 2014, 63:3215-3219.
- [6] Gabilondo R, Bécares E. The effects of natural carbon dioxide seepage on edaphic protozoan communities in Campo de Calatrava, Ciudad Real, Spain. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 68(1):133-139.
- [7] Mcfarland J W, Waldrop M P, Haw M. Extreme CO<sub>2</sub> disturbance and the resilience of soil microbial communities. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 65(5):274-286.
- [8] 田地,马欣,李玉娥,查良松,伍洋,邹晓霞,刘爽.利用高通量测序对封存 CO<sub>2</sub>泄漏情景下土壤细菌的研究.环境科学,2013,34(10): 4096-4104.
- [9] Zhou X, Apple M E, Dobeck L M, Cunningham A B, Spangler L H. Observed response of soil O<sub>2</sub> concentration to leaked CO<sub>2</sub> from an engineered CO<sub>2</sub> leakage experiment. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 16:116-128.
- [10] Miglietta F, Bettarini I, Raschi A, Vaccari F P. Isotope discrimination and photosynthesis of vegetation growing in the Bossoleto CO<sub>2</sub> spring. Chemoshere, 1998, 36(4/5):771-776.
- [11] Cook A C, Tissue D T, Roberts S W, Oechel W C. Effects of long-term elevated [CO<sub>2</sub>] from natural CO<sub>2</sub> springs on Nardus stricta: photosynthesis, biochemistry, growth and phenology. Plant Cell & Environment, 1998, 21(4):417-425.
- [12] Rogie J D, Kerrick D M, Sorey M L, Chiodini G, Galloway D L. Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California. Earth & Planetary Science Letters, 2001, 188(3-4):535-541.
- [13] Zhang X, Xin M, Zhi Z, Wu Y, Li Y. CO<sub>2</sub> leakage-induced vegetation decline is primarily driven by decreased soil O<sub>2</sub>. Journal of Environmental Management, 2016, 171: 225-230.
- [14] Wu Y, Ma X, Li Y E, Wan Y F. The impacts of introduced CO<sub>2</sub> flux on maize/alfalfa and soil. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 23(2): 86-97.
- [15] Ko D, Yoo G, Seong-Taek Y, Chung H. Impacts of CO<sub>2</sub> leakage on plants and microorganisms: A review of results from CO<sub>2</sub> release experiments and storage sites. Greenhouse Gases Science & Technology, 2016, 6(3): 319-338.
- [16] 鄂玉江,戴俊英,顾慰连.玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究—— I.玉米根系生长和吸收能力与地上部分的关系.作物学报, 1988(2):149-154.
- [17] 戴俊英,鄂玉江,顾慰连.玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究——Ⅱ.玉米根系与叶的相互作用及其与产量的关系.作物学报, 1988,14(4):310-314.
- [18] Lynch J. Root Architecture and Plant Productivity. Plant Physiology, 1995, 109(1): 7-13.
- [19] 张雪艳, 尹忠东, 赵直, 田地, 马欣. 封存 CO, 泄漏量对三叶草生长的影响. 农业工程学报, 2015(18): 197-203.
- [20] Pierret A, Moran C J, Doussan C. Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots. New Phytologist, 2005, 166(3):967-980.
- [21] Jones D G, Beaubien S E, Blackford J C, Foekema E. M, Lions J, De Vittor C, West J. M, Widdicombe S, Hauton C, Queirós A. M. Developments since 2005 in understanding potential environmental impacts of CO 2, leakage from geological storage. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 40:350-377.
- [22] Lake J A, Lomax B H. Plant responses to simulated carbon capture and transport leakage: The effect of impurities in the CO<sub>2</sub> gas stream. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 72: 208-213
- [23] Mathew W, Ruth D Y. Multi-dimensional sensitivity analysis and ecological implications of a nutrient uptake model. Plant & Soil, 1996, 180: 311-324.
- [24] Zhang X, Ma, X, Wu Y, Gao Q, Li Y. A plant tolerance index to select soil leaking CO<sub>2</sub> bio-indicators for carbon capture and storage. Journal of Cleaner Production, 2018, 170:735-741.
- [25] 伍洋,马欣,李玉娥,万运帆,张九天,仲平,贾莉. 地质封存 CO<sub>2</sub>泄漏对农田生态系统的影响评估及耐受阈值. 农业工程学报, 2012, 28(2): 196-205.
- [26] Maček I, Pfanz H, Francetič V, Batič F, Vodnik D. Root respiration response to high CO<sub>2</sub>, concentrations in plants from natural CO<sub>2</sub>, springs. Environmental & Experimental Botany, 2005, 54(1): 90-99.
- [27] Ziogou F, Gemeni V, Koukouzas N, De Angelis D, Libertini S, Beaubien S E, Lombardi S, West J M, Jones D G, Coombs P, Barlow T S, Gwosdz S, Krüger M. Potential Environmental Impacts of CO<sub>2</sub>, Leakage from the Study of Natural Analogue Sites in Europe. Energy Procedia, 2013, 37:3521-3528.
- [28] Gregoy P J. Crop Root System and Nutrient Uptake from Soil[M]//The Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops. Wiley-Blackwell, 2011:21-45.