

## 封存 CO<sub>2</sub> 泄漏量对三叶草生长的影响

张雪艳<sup>1,2</sup>, 尹忠东<sup>3\*</sup>, 赵 直<sup>4</sup>, 田 地<sup>5</sup>, 马 欣<sup>5</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;  
3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 4. 新疆师范大学地理系, 乌鲁木齐 830054;  
5. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 随着碳捕集与封存技术在中国的逐步发展, 封存 CO<sub>2</sub> 泄漏对农田生态系统的潜在威胁日益引起关注, 而目前对 CO<sub>2</sub> 泄漏时作物的适应能力认识仍不足。选择分布广、耐酸性强的三叶草作为研究对象, 设对照 (不通 CO<sub>2</sub>) 和采用栽培箱底部通入 500、1 000、1 500 和 2 000 g/(m<sup>2</sup>·d) CO<sub>2</sub> 5 个处理, 系统评估三叶草对封存 CO<sub>2</sub> 泄露的响应。结果发现: 在 500 g/(m<sup>2</sup>·d) 的 CO<sub>2</sub> 泄露情景下, 三叶草的生物量、根系活力、营养成分等主要生理指标略有增加或保持稳定, 表现出较好的适应能力。随着 CO<sub>2</sub> 泄漏量增加到 1000 g/(m<sup>2</sup>·d) 以上, 三叶草的生物量、根系活力下降, 逐步表现出受环境胁迫的特征。在 CO<sub>2</sub> 通量处理下土壤 pH 值在 6.80~7.04 之间, 高于三叶草适宜生长的 pH 值下限。研究表明, 三叶草对封存 CO<sub>2</sub> 泄露具有较好的适应能力, 为封存 CO<sub>2</sub> 泄露应对技术研究提供参考。

**关键词:** 碳; 封存; 气体; 碳捕集与封存; 泄露; 三叶草; 影响

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.028

中图分类号: S541<sup>†</sup>.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0197-07

张雪艳, 尹忠东, 赵 直, 田 地, 马 欣. 封存 CO<sub>2</sub> 泄漏量对三叶草生长的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 197—203. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.028 <http://www.tcsae.org>

Zhang Xueyan, Yin Zhongdong, Zhao Zhi, Tian Di, Ma Xin. Impacts of leakage of stored CO<sub>2</sub> to growth of *trifolium hybridum* L.[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 197—203. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.028 <http://www.tcsae.org>

### 0 引 言

人类活动已经引起全球的气候变化, 在大气 CO<sub>2</sub> 浓度不断升高的背景下, 碳捕集与封存技术 (carbon capture and storage, CCS) 通过从燃煤电厂等能源活动和钢铁、水泥等工业生产集中排放源捕集 CO<sub>2</sub> 并注入封闭的地质结构中存储, 可能成为未来全球 CO<sub>2</sub> 减排的关键技术<sup>[1]</sup>。IEA (international energy agency) 对比多种 CO<sub>2</sub> 减排措施后认为到 2050 年 CCS 减排贡献量可达到总减排量的 19%<sup>[2]</sup>。近年来, 中国已先后建立超过 12 个示范项目, 未来 CCS 技术可为中国提供千万吨的 CO<sub>2</sub> 封存能力, 对中国中长期减排具有重要的意义<sup>[3]</sup>。但封存于地下的 CO<sub>2</sub> 存在泄漏风险, 可能会对农田生态系统带来重大威胁。

目前, 植物对地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏的响应已引起学术界的高度关注。美国零泄漏研究中心开展的野外 CO<sub>2</sub> 泄露试验中, 观察到 CO<sub>2</sub> 泄漏源中心区域植被出现萎蔫、枯死<sup>[4-5]</sup>。在英国的控制地试验中, 在土壤 1 m 深处以 1 L/s

的速率释放 CO<sub>2</sub>, 发现植物叶绿素含量、生物量明显降低, 大豆发芽与生长受到严重抑制, 牧草生长也受到消极影响<sup>[6-7]</sup>, 春季蚕豆发育缓慢, 根系、结荚数、生物量受抑制, 呈现出严重的枯黄病, 蚕豆的死亡率上升<sup>[8]</sup>。中国学者采用盆栽通气和气雾栽培试验, 发现作物根际土壤中的 CO<sub>2</sub> 达到一定浓度后会抑制农作物的生长, 对作物叶片光合、株高、茎粗、茎块产量、果实发育、生物量等方面产生负面影响<sup>[9-13]</sup>。盆栽玉米的 CO<sub>2</sub> 泄漏试验发现 500 g/(m<sup>2</sup>·d) 泄漏通量下玉米开始出现生理压力征兆, 2 000 g/(m<sup>2</sup>·d) 泄漏情景下玉米枯死<sup>[14]</sup>。CO<sub>2</sub> 是酸性气体, 与土壤中水分结合可导致土壤的酸化。然而, 作物响应封存 CO<sub>2</sub> 泄漏导致土壤酸化的过程和机理尚不清楚。因此, 当地质封存 CO<sub>2</sub> 泄露时, 是否强耐酸性的作物对 CO<sub>2</sub> 泄漏的适应能力较强, 选择可能合适的作物类型将封存 CO<sub>2</sub> 泄漏导致的不利影响最小化等问题仍需要开展大量的研究。

三叶草 (*trifolium hybridum* L.) 是一种重要的优质豆科牧草, 也是重要的城市建坪用草, 用途广泛, 适应性强, 适宜生长的 pH 值下限为 4.5, 具有很强的耐酸性<sup>[15-16]</sup>。本文通过盆栽试验模拟地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏在地表土壤中的过程, 评估不同 CO<sub>2</sub> 通量泄漏对三叶草生长发育造成的影响, 验证耐酸能力强的作物是否对地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏造成的环境胁迫具有较好的适应能力, 为识别封存 CO<sub>2</sub> 泄漏区域内的强耐受作物、探索地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏应对技术提供依据。

收稿日期: 2015-05-06 修订日期: 2015-08-06

基金项目: 国家自然科学基金 (71303227)

作者简介: 张雪艳, 女, 浙江绍兴人, 博士后, 主要从事气候变化对农业影响评估、地理信息与遥感在环境领域的应用研究。北京 中国气象科学研究院, 100081。Email: xyzhang@lreis.ac.cn

\*通信作者: 尹忠东, 男, 副教授, 主要从事水土保持与土壤环境方面的研究。北京 北京林业大学, 100083。Email: yingzhongdong@163.com

## 1 方法与材料

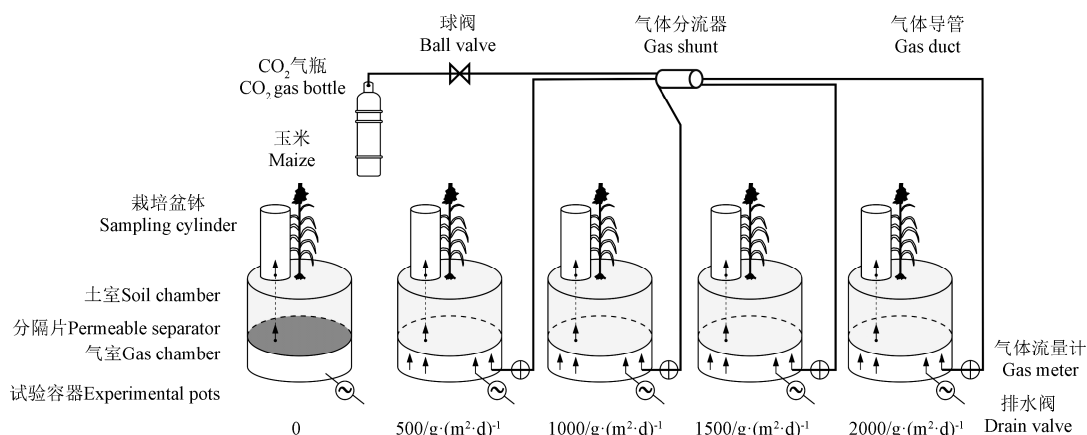
### 1.1 试验场地

试验点选择在中国农业科学院延庆试验站(116°03'37"E, 40°32'37"N), 平均海拔 534 m, 属大陆性季风气候, 是温带与中温带、半干旱与半湿润的过渡带, 多年平均降水量为 423.3 mm, 降水集中于 6~8 月, 年平均气温 8.5℃, 无霜期为 161 d。土壤取自当地农田地下约 0~20 cm 的褐土, 称取 162 kg 分别装入各个栽培钵钵、压实, 使得土壤厚度均为 50 cm。试验前土壤 pH 值为 7.06, 土壤质地为中壤土, 土壤容重为 1.30 g/cm<sup>3</sup>, 土壤体积含水率 22.67%。试验从 2012-04-26 三叶草播种开始, 2012-05-20 实施 CO<sub>2</sub> 泄漏处理, 2012-06-24 初

次刈割, 2012-07-31 收获, 试验共计进行了 97 d。水肥按当地常规管理, 2012-04-20 以磷酸三铵复合肥为底肥, 2012-06-06 补施尿素, 试验期间共进行了 6 次手工灌溉。

### 1.2 试验处理

试验采取盆栽植株底部通 CO<sub>2</sub> 处理方式, 以自主设计制作的封存 CO<sub>2</sub> 泄漏人工控制模拟平台进行试验(图 1)。该平台主要由简单生态系统、CO<sub>2</sub> 控制释放装置、监测记录系统和管理等部分构成, 通过构建一组相互独立的简单农田生态系统, 人工控制 CO<sub>2</sub> 气体以不同速率和通量从土壤下部释放出来, 模拟封存 CO<sub>2</sub> 泄漏到达地表的



a. CO<sub>2</sub> 控制释放装置示意图  
a. Schematic diagram of CO<sub>2</sub> release device



b. CO<sub>2</sub> 控制释放装置现场  
b. Field map of CO<sub>2</sub> release device

图 1 模拟封存 CO<sub>2</sub> 泄漏的盆栽试验

Fig.1 Platform for CO<sub>2</sub> leakage simulation by using potting experiment

#### 1.2.1 CO<sub>2</sub> 控制释放装置

CO<sub>2</sub> 控制释放装置主要由特制栽培箱、气体流量计、球阀、气体导管、分流器和 CO<sub>2</sub> 气瓶等部分组成。其中, 栽培箱长宽均为 50 cm, 由孔径 0.5 cm 的透气性分隔片分成上部供作物生长的土室(高 80 cm)和下部均匀释放 CO<sub>2</sub> 气体的气室(高 20 cm)。分隔片用双层尼龙纱布覆盖, 在栽培箱外壁距离分隔片下方 10 cm 处安装进气管, 进气管下方安装排水阀。

#### 1.2.2 CO<sub>2</sub> 泄漏处理设置

根据文献和前期试验确定 2 000 g/(m<sup>2</sup>·d) 的作物耐受上限<sup>[14,17-18]</sup>, 共设置 5 种 CO<sub>2</sub> 泄漏处理, 包括 1 个无泄漏的对照处理和 4 个泄漏处理, 把 CO<sub>2</sub> 注入通量作为度量其泄漏程度的关键指标<sup>[8]</sup>, 即: CK, G500 (500 g/(m<sup>2</sup>·d)), G1000 (1 000 g/(m<sup>2</sup>·d)), G1500 (1 500 g/(m<sup>2</sup>·d)), G2000 (2 000 g/(m<sup>2</sup>·d))。每种情景 3 次重复。

通入不同通量 CO<sub>2</sub> 的处理方法是: 无泄漏对照处理

不接气体导管, 不通 CO<sub>2</sub>; 4 个泄漏处理由气瓶中的 CO<sub>2</sub> 通过气体分流器分成 4 路, 分别经 3 mm 不锈钢气体导管和气体流量计后通入栽培箱中, 各通气栽培箱均自处理之日起至试验结束不间断实施通入 CO<sub>2</sub> 处理。通过调整球阀气压大小和各栽培箱流量计的注入速率使植株下部泄漏 CO<sub>2</sub> 气体通量保持在设定范围内, 即: CK (0), G500 (44 mL/min), G1000 (88 mL/min), G1500 (132 mL/min), G2000 (176 mL/min)。CO<sub>2</sub> 注入通量和注入速率之间的换算公式如下:

$$F = v\rho/s \quad (1)$$

式中:  $F$  为 CO<sub>2</sub> 注入通量, g/(m<sup>2</sup>·d);  $v$  为 CO<sub>2</sub> 注入速率, mL/min;  $\rho$  为常压下 CO<sub>2</sub> 密度, 约为 1.977 g/L;  $s$  为盆钵横截面面积, 约为 0.25 m<sup>2</sup>。

### 1.3 指标测定及方法

土壤 pH 值。由于栽培箱土层厚度为 50 cm, 试验中取作物根系部分 10~25 cm 土层的土壤, 用以分析 CO<sub>2</sub> 泄漏对盆栽作物根系土壤 pH 值的影响。盆栽试验中各样点取土样约 200 g, 取样周期为 15 d。去根系、瓦砾等杂质, 研磨后依次过 830 和 150  $\mu$ m 的筛子, 装入密封袋中送到中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所分析测试中心进行测定, pH 计 (ATC-124) 测定参考森林土壤 pH 值的测定法 LY/T1239-1999。

土壤 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 浓度。每个栽培箱内各垂直埋入 2 根土壤气体探针 (长分别为 40 和 60 cm, 内径均为 2 cm), 分别位于距栽培箱中心 15 cm 的对角线两侧。每个土壤气体探针底部是密封的, 靠近底端的 10 cm 管壁上均匀钻直径 0.5 cm 的气孔, 使气体能够从壁外的土壤中自由扩散到管内。试验过程中, 2 根土壤气体探针分别被埋入地下 20 和 40 cm 处, 土壤气体探针顶端由 1 个开/关阀门密闭, 连接到 1 台便携式 PGM-54 复合式 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气体检测仪 (RAE 公司, 美国), 以测量地下 10~20、30~40 cm 两层土壤 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的体积百分比, 测定频率为每 3 d 测 1 次。

三叶草株高、根长与生物量。试验期间开展 5 次株高测量, 选取每个栽培箱长势较均匀的 10 株三叶草测量, 取 3 个栽培箱的平均值作为此处理的株高。试验结束时 (2012-07-31), 将三叶草连根从土壤中取出, 选取每个栽培箱长势较均匀的 10 株三叶草测量, 取 3 个栽培箱的平均值作为此处理的根长。在试验期内有刈割, 采用烘干法获取作物地上部分和地下部分的干质量。108℃烘干 30 min 进行杀青, 75℃烘烤至恒质量即可。

三叶草根系活力。作物根的生长状况和活力水平直接影响营养状况和作物产量。在三叶草收割期通过挖掘法取完整的作物根系测定根系活力。氯化三苯基四氮唑 (2,3,5-Triphenyltetrazolium Chloride, TTC) 是标准氧化电位为 80mV 的氧化还原色素, 溶于水中成为无色溶液, 但还原后即生成红色而不溶于水的三苯甲瓚, 生成的三苯甲瓚比较稳定, 不会被空气中的氧自动氧化, 所以 TTC 被广泛地用作酶试验的氢受体, 植物根系中脱氢酶所引起的 TTC 还原, 可因加入琥珀酸, 延胡索酸, 苹果酸

得到增强, 而被丙二酸、碘乙酸所抑。TTC 还原量能表示脱氢酶活性并作为根系活力的指标, 委托华北电力大学生物重点实验室采用 TTC 还原法进行作物根系活力的测定。

三叶草营养成分。牧草的产量和营养成分是衡量牧草优劣的关键, 粗蛋白、粗纤维、灰分、钙和粗脂肪是牧草中的主要营养成分。三叶草营养成分检测试验委托谱尼测试有限公司 (北京) 按《饲料分析及饲料质量检测技术》完成, 主要方法包括烘干法; ISO5983—1979《动物饲料—氮含量的测定和粗蛋白含量计算》; 饲料中粗脂肪测定方法 GB/t 6433—1994; 酸洗涤法 (ADF); 马福炉灼烧直接灰化法; 原子吸收分光光度法 (AAS 法)。

### 1.4 数据处理及分析方法

通过定期跟踪测量三叶草的株高、地上部和地下部生物量、根系活力等形态生理指标以及土壤 pH 值、土壤 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 浓度等土壤学指标, 对比不同泄漏处理之间各指标的差异性, 评估三叶草对封存 CO<sub>2</sub> 泄漏的响应特征。数据处理及作图采用 Microsoft Excel 2010 软件进行, 剔除不完整的数据。利用 SPSS18.0 软件进行数据统计分析, 置信水平取 95%或 99%。多重相关比较显著性检验采用 LSD (least significant difference)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 pH 值

试验期间各 CO<sub>2</sub> 泄漏处理下土壤 pH 值波动不大, 均值范围为 6.80~7.04, CO<sub>2</sub> 泄漏处理下土壤 pH 值无趋势性变化, 仅在 G2000 处理下土壤 pH 值与 CK 有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其他处理下不存在显著性差异 ( $P > 0.05$ ) (表 1)。

表 1 不同 CO<sub>2</sub> 泄漏处理下土壤 pH 值的均值比较  
Table 1 Comparison of soil pH value in the potting under different CO<sub>2</sub> leakage treatments

处理 Treatment	pH 值 pH value
CK	7.04±0.09 a
G500	6.90±0.12 a
G1000	7.02±0.04 a
G1500	7.04±0.11 a
G2000	6.80±0.12 b

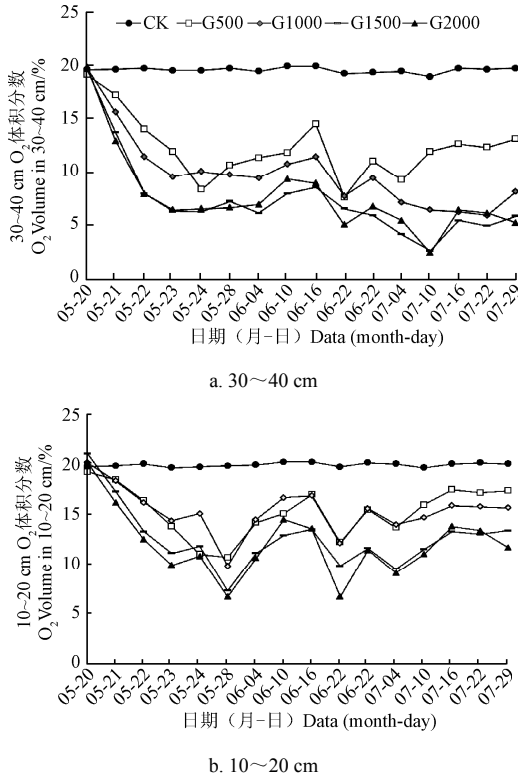
注: 同列同字母表示无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 否则差异显著 ( $P < 0.05$ )。CK, G500, G1000, G1500 和 G2000 分别为通入 CO<sub>2</sub> 0, 500, 1 000, 1 500 和 2 000 g/(m<sup>2</sup>·d), 下同。

Note: The same column data marked same letters indicate no significant difference ( $P > 0.05$ ), otherwise, have significant difference ( $P < 0.05$ ). CK, G500, G1000, G1500, and G2000 represent CO<sub>2</sub> flux 0, 500, 1 000, 1 500, and 2 000 g/(m<sup>2</sup>·d), the same below.

### 2.2 土壤 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 浓度

对照 CK 中 30~40 cm 和 10~20 cm 土层, CO<sub>2</sub> 体积分数变化范围分别为 0.97%~2.27%和 0.40%~1.50%。PGM-54 复合式 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 气体检测仪 CO<sub>2</sub> 的检测范围是 0~50 000 ppm, 而 CO<sub>2</sub> 泄漏处理后 24h 内各泄漏情景下 30~40 cm 和 10~20 cm 土层 CO<sub>2</sub> 体积分数均迅速上升到 50 000 ppm 以上。因此, 重点采用土壤 O<sub>2</sub> 体积分数表征土壤气体性质变化<sup>[19]</sup>。对照 CK 处理的土壤 30~40 cm 和

10~20 cm 土层  $O_2$  体积分数比较稳定, 分别在 19.6% 和 20.0% 左右且波动幅度在  $\pm 3\%$  以内。5 月 20 日开始通  $CO_2$  气体后, 各  $CO_2$  泄漏情景下 30~40 cm 土层和 10~20 cm 土层  $O_2$  体积分数迅速下降, 且随着  $CO_2$  通气量的增加, 土壤中  $O_2$  体积分数下降幅度越大。6 月 22 日和 7 月 10 日前后灌溉, 土壤 30~40 cm 土层和 10~20 cm 土层  $O_2$  体积分数均在 G2000 处理下出现“低谷”, 最低分别为 2.7% 和 6.7% (图 2)。

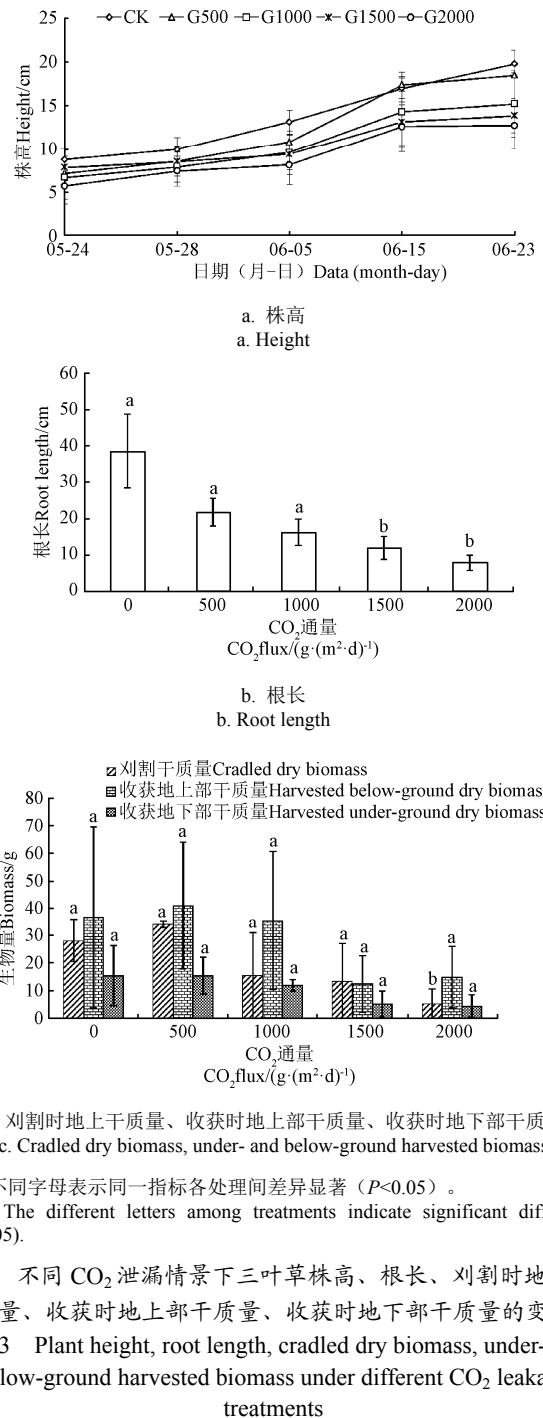


注: CK, G500, G1000, G1500 和 G2000 分别为通入  $CO_2$  0, 500, 1 000, 1 500 和 2 000  $g/(m^2 \cdot d)$ , 下同。  
Note: CK, G500, G1000, G1500, and G2000 represent  $CO_2$  flux 0, 500, 1 000, 1 500, and 2 000  $g/(m^2 \cdot d)$ , the same below.

图 2 地下 30~40 cm 和 10~20 cm 土层  $O_2$  浓度的变化  
Fig.2 Soil  $O_2$  concentration changes of 30-40 cm and 10-20 cm layers in potting experiment

### 2.3 三叶草株高、根长与生物量

图 3 可见, 随着  $CO_2$  泄漏量的增大, 三叶草平均株高有降低的趋势, 三叶草平均株高与  $CO_2$  通量呈显著的负相关 ( $R^2=0.9643$ ,  $n=12$ ); G1500 和 G2000 处理下根系显著变短 ( $P<0.05$ ), 根系生长受到负面影响。通气后 34 d 进行刈割, G500 通气处理下三叶草干质量比 CK 略有增加但不明显 ( $P>0.05$ ), G1000 以上通气处理三叶草干质量有下降趋势, 其中 G2000 情景下干质量的减少趋势显著 ( $P<0.05$ ), 达到所有处理中的最低值。通气后 70 d 收获三叶草, 发现 G500 情景下三叶草地上部干质量略有增多, 地下部干质量与 CK 无差异, G1000 情景下三叶草地上部分和地下部分干质量比 CK 略有减少, 而 G1500 和 G2000 情景下, 三叶草地上部分和地下部分干质量下降幅度较大, 但各变化均未达到显著性水平 ( $P>0.05$ )。



注: 不同字母表示同一指标各处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: The different letters among treatments indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

图 3 不同  $CO_2$  泄漏情景下三叶草株高、根长、刈割时地上干质量、收获时地上部干质量、收获时地下部干质量的变化  
Fig.3 Plant height, root length, cradled dry biomass, under- and below-ground harvested biomass under different  $CO_2$  leakage treatments

### 2.4 三叶草根系活力

收获时采集三叶草根系并进行根系活力检测。G500 和 G1000 处理下, 三叶草根系 TTC 还原量增多, 根系活力增强, 而 G1500 和 G2000 处理下, 三叶草根系 TTC 还原量减少, 根系活力变弱。三叶草根系活力弱化的原因, 可能在于 G1500 和 G2000 处理下, 高通量的  $CO_2$  泄漏造成三叶草根系缺氧, 抑制根系呼吸, 造成根系对水分和土壤养分等吸收能力下降。另外, 对三叶草地上部分和地下部分生物量的调查结果显示,  $CO_2$  泄漏情景下三叶草地下部分生物量有下降的趋势, 三叶草根系变短, 集中于土壤上层发育细根、须根; 而 CK 根系较长, 且直根发育, 延伸至下层土壤。这种情况下, 进行三叶草根系的采

集,利用大水冲洗的办法获取三叶草根系,也很难避免 CK 中长根系受损。试验中也发现 G500 和 G1000 处理下,获取的三叶草根系须根、细根较多,因此试验结果中 TTC 还原量增大,相比之下 CK 的根系活力较小(图 4)。

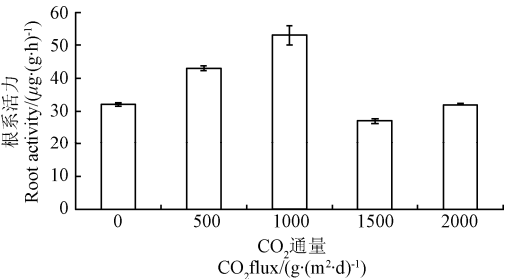


图 4 三叶草根系活力

Fig.4 Root activity under different CO<sub>2</sub> leakage treatments

2.5 营养成分

刈割三叶草并进行营养成分测定,结果显示随 CO<sub>2</sub> 泄漏量的增大,三叶草中水分含量存在减少的趋势,但方差分析显示各组处理间差异性未达到显著性水平 ( $P>0.05$ ),粗蛋白、粗纤维、灰分、粗脂肪和钙的含量无明显变化规律。可见,CO<sub>2</sub> 短时间泄漏未对三叶草营养成分产生显著的影响。

3 讨论

本文主要通过盆栽试验评估耐酸能力强的三叶草对封存 CO<sub>2</sub> 泄漏造成的环境胁迫是否具有较好的适应能力。试验发现,在 CO<sub>2</sub> 泄漏量较小的 G500 条件下,三叶草生

物量比 CK 略有增多;G1000 处理下,三叶草生物量略有减少,在 G1500 和 G2000 处理下,三叶草生物量大幅下降(图 3)。G500 和 G1000 泄漏处理下,三叶草根系 TTC 还原量增多,根系活力增强,而 G1500 和 G2000 泄漏处理下,三叶草根系 TTC 还原量减少,根系活力变弱(图 4)。随着 CO<sub>2</sub> 泄漏量增大,三叶草中水分含量存在减少的趋势,而粗蛋白、粗纤维、灰分、粗脂肪和钙的含量无明显变化(表 2)。伍洋<sup>[4]</sup>发现玉米在 500 g/(m<sup>2</sup>·d)的 CO<sub>2</sub> 泄漏条件下,出苗受到显著抑制,净光合速度、蒸腾速度和鲜质量显著降低。可见,与玉米对比,三叶草对 CO<sub>2</sub> 泄漏具有一定的适应能力,在 500 g/(m<sup>2</sup>·d)的 CO<sub>2</sub> 泄露条件下,三叶草的生物量、根系活力有增加趋势,营养成分也保持稳定。随着 CO<sub>2</sub> 泄漏量增加到 1 000 g/(m<sup>2</sup>·d)以上,三叶草逐步表现出受环境胁迫的特征。

从表 1 中可见,CO<sub>2</sub> 泄漏导致的土壤 pH 值波动范围为 6.80~7.04,各泄漏处理间的土壤 pH 值没有表现出显著差异,而三叶草适宜生长的 pH 值条件在 4.5 以上,因此,试验中土壤 pH 值始终处于三叶草的适宜生长范围内,土壤酸化不是导致三叶草生理活动变化的主导因素。图 2 中 CO<sub>2</sub> 泄漏导致土壤 O<sub>2</sub> 浓度大幅下降,显然土壤气体成分发生 CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 的置换过程,注入到土壤中的 CO<sub>2</sub> 替代了土壤中的 O<sub>2</sub>,导致与三叶草根系分布密切的 10~20 cm 土壤 O<sub>2</sub> 浓度从 20%降低到 6.7%左右。根据 Al-Traboulsi<sup>[8]</sup>的报道,当土壤 O<sub>2</sub> 浓度从 19.6%下降到 8%导致春豆生物量下降 36%。因此,土壤 O<sub>2</sub> 浓度的快速下降对三叶草的生理活动形成了胁迫<sup>[20]</sup>,是三叶草生物量下降的主导因素。

表 2 三叶草营养成分的变化

Table 2 Nutrient content of *Trifolium hybridum* L.

处理 Treatments	水分 Water content	粗蛋白 Crude protein	灰分 Ash	粗纤维 Crude fiber	粗脂肪 Crude fat	钙 Calcium	%
CK	80.49±3.75	33.02±2.57	14.39±2.22	11.10±0.29	2.35±0.15	2.89±0.60	
G500	80.44±4.33	31.63±1.28	13.99±2.67	11.51±1.19	2.33±0.44	3.42±0.97	
G1000	74.78±5.25	33.80±2.46	12.35±1.86	10.91±0.69	1.70±0.81	2.57±0.29	
G1500	74.77±4.70	31.72±3.92	12.58±3.33	10.55±0.25	2.85±1.22	2.86±1.03	
G2000	74.74±2.61	32.23±1.65	13.56±1.44	10.64±1.36	1.85±1.04	3.36±0.38	

注:各处理间无显著性差异 ( $P>0.05$ )。

Note: There is no significant different between each treatments ( $P>0.05$ ).

4 结论

与无 CO<sub>2</sub> 泄漏相比,在 500 g/(m<sup>2</sup>·d)的 CO<sub>2</sub> 泄露情景下,三叶草的生物量、根系活力、营养成分等主要生理指标略有增加或保持稳定,表现出较好的适应能力。随着 CO<sub>2</sub> 泄漏量增加到 1 000 g/(m<sup>2</sup>·d)以上,三叶草的生物量、根系活力下降,逐步表现出受环境胁迫的特征。在 500~2 000 g/(m<sup>2</sup>·d)CO<sub>2</sub> 通量处理下,土壤 pH 值在 6.80~7.04 之间,高于三叶草适宜生长的 pH 值下限。三叶草对 CO<sub>2</sub> 泄漏的耐受机理仍需要继续开展深入的研究。

【参 考 文 献】

[1] Klusman R W. Evaluation of leakage potential from a carbon dioxide EOR/sequestration project[J]. Energy Convers. Manage, 2003, 44(12): 1921—1940.

[2] International Energy Agency. Energy Technology Perspectives: Scenarios & Strategies to 2050[EB/OL]. 2008-05-20 [2008-12-12]. [www.iea.org/Textbase/about/copyright.asp](http://www.iea.org/Textbase/about/copyright.asp).

[3] Zhang Xian, Fan Jingli, Wei Yiming. Technology roadmap study on carbon capture, utilization and storage in China[J]. Energy Policy, 2013, 59: 536—550.

[4] Lakkaraju V R, Zhou xiaobing, Apple M E, et al. Studying the vegetation response to simulated leakage of sequestered CO<sub>2</sub> using spectral vegetation indices[J]. Ecological Informatics, 2010, 5(5): 379—389.

[5] Amonette J E, Barr J L, Dobeck L M, et al. Spatiotemporal changes in CO<sub>2</sub> emissions during the second ZERT injection, August-September 2008[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(2): 263—272.

[6] Pierce S, Sjogersten S. Effects of below ground CO<sub>2</sub> emissions

- on plant and microbial communities[J]. *Plant Soil*, 2009, 325(1): 197—205.
- [7] Patil R H, Colls J J, Steven M D. Effects of CO<sub>2</sub> gas as leaks from geological storage sites on agro-ecosystems[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 1—5.
- [8] Al-Traboulsi M, Sjögersten S, Class J, et al. Potential impact of CO<sub>2</sub> leakage from carbon capture and storage (CCS) systems on growth and yield in spring field bean[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 80(1): 43—53.
- [9] 孙周平, 郭志敏, 刘义玲. 不同通气方式对马铃薯根际通气状况和生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(4): 125—128.
- Sun Zhouping, Guo Zhimin, Liu Yiling. Measurement of rhizospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> concentrations of potato plant in the field and the responses to different rhizospheric ventilation treatments[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008, 17(4): 125—128. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵旭, 李天来, 孙周平, 等. 短期根际不同 CO<sub>2</sub> 处理对番茄叶片光合日变化及植株生物量的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(7): 119—124.
- Zhao Xu, Li Tianlai, Sun Zhouping, et al. Effects of short term different root-zone CO<sub>2</sub> concentrations on diurnal photosynthesis and biomass of tomato[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(7): 119—124. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘义玲, 李天来, 孙周平, 等. 根际 CO<sub>2</sub> 浓度对网纹甜瓜生长和根系氮代谢的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(11): 2315—2324.
- Liu Yiling, Li Tianlai, Sun Zhouping et al. Effects of rhizosphere CO<sub>2</sub> concentration on plant growth and root nitrogen metabolism of muskmelon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(11): 2315—2324. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘义玲, 李天来, 孙周平, 等. 根际低氧胁迫对网纹甜瓜光合作用、产量和品质的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36(10): 1465—1472.
- Liu Yiling, Li Tianlai, Sun Zhouping et al. Effects of root-zone hypoxia stress on the photosynthesis yield and quality of muskmelon[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36(10): 1465—1472. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李天来, 陈亚东, 刘义玲, 等. 根际 CO<sub>2</sub> 浓度对网纹甜瓜根系生长和活力的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 210—215.
- Li tianlai, Chen Yadong, Liu Yiling, et al. Effects of rhizosphere CO<sub>2</sub> concentration on root growth and activity of netted muskmelon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of The CSAE)*, 2009, 25(4): 210—215. (in Chinese with English abstract)
- [14] 伍洋, 马欣, 李玉娥, 等. 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[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 CO<sub>2</sub> leakage from geological storage on agro-ecosystem[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of The CSAE)*, 2012, 28(2): 196—205. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张鹤山, 刘洋, 王凤, 等. 18 个三叶草品种耐热性综合评价[J]. *草业科学*, 2009, 26(7): 44—49.
- Zhang Heshan, Liu Yang, Wang Feng, et al. The comprehensive evaluation of heat tolerance of 18 trifolium varieties[J]. *Prat Aculural Science*, 2009, 26(7): 44—49. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王学贵, 姚建明, 张洋, 等. 草甘膦与百草枯及其混剂对三叶草生理生化的影响[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(2): 379—382.
- Wang Xuegui, Yao Jianming, Zhang Yang, et al. Physiological and biochemistry effects of the glyphosate, paraquat and its mixture on trifolium repens[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(2): 379—382. (in Chinese with English abstract)
- [17] Beaubien S E, Ciotoli G, Coombs P, et al. The impact of a naturally occurring CO<sub>2</sub> gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture (Latera, Italy)[J]. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2008, 1(2): 373—387.
- [18] West J, Pearce J, Coombs P, et al. The impact of controlled injection of CO<sub>2</sub> on the soil ecosystem and chemistry of an English lowland pasture[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1863—1870.
- [19] Zhou Xiaobin, Apple M E, Dobeck L M, et al. Observed response of soil O<sub>2</sub> concentration to leaked CO<sub>2</sub> from an engineered CO<sub>2</sub> leakage experiment[J]. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 2013, 6(16): 116—128.
- [20] 田地, 马欣, 查良松, 等. 地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏对近地表陆地生态系统的影响综述. *农业与农村环境学报*, 2013, 29(2): 137—145.
- Tian Di, Ma Xin, Zha Liangsong, et al. Review of impact of CO<sub>2</sub> leakage from geologic storage on near-surface terrestrial ecological system. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(2): 137—145. (in Chinese with English abstract)

## Impacts of leakage of stored CO<sub>2</sub> to growth of *trifolium hybridum* L.

Zhang Xueyan<sup>1,2</sup>, Yin Zhongdong<sup>3\*</sup>, Zhao Zhi<sup>4</sup>, Tian Di<sup>5</sup>, Ma Xin<sup>5</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. College of Geography Sciences and Tourism, Xing Jiang Normal University, Urumqi 830054, China; 5. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In recent years, more than 12 demonstration projects of carbon capture and storage (CCS) have been developed in China. The CCS technology can provide the CO<sub>2</sub> capture capacity of hundreds of billions of tons and has important significance for mid-long term mitigation of CO<sub>2</sub> in China. However, there is leakage risk for the CO<sub>2</sub> stored in the geological structure, which may lead to major threats for farmland ecosystem. Along with the development of carbon capture and storage technique, more attentions have been focused on the potential threats from the leakage of stored CO<sub>2</sub>, and the adaptation capacity of crops to CO<sub>2</sub> leakage has not been well understood. This study assessed the response of *Trifolium hybridum* L., which is widespread and has strong acid resistance, to leakage of stored CO<sub>2</sub>. And 4 treatments were designed in the pot experiment, in which the CO<sub>2</sub> with the airflow rate from 500 to 2 000 g/(m<sup>2</sup>·d) was added into the bottom of the cultivation box. The experiment simulated the process of the leakage of CO<sub>2</sub> in surface soil, and tested if the crop with strong acid resistance would better adapt to the impacts of the leakage of stored CO<sub>2</sub>. The results revealed that the productive viabilities (biomass, height, root length and root activity) of *Trifolium hybridum* L. increased slightly or remained stable under the leakage of 500 g/(m<sup>2</sup>·d) CO<sub>2</sub>, and it showed better adaptation capability under 500 g/(m<sup>2</sup>·d) CO<sub>2</sub> leakage treatment. When the leakage of CO<sub>2</sub> increased to over 1 000 g/(m<sup>2</sup>·d), *Trifolium hybridum* L. gradually presented environmental stress, and the biomass and root activity decreased quickly under the leakage of 1 500-2 000 g/(m<sup>2</sup>·d). However, the crude protein, crude fiber, ash, crude fat and calcium have no obvious change. The change of soil pH value, from 6.6 to 7.2, was not out of the optimum pH value range for *Trifolium hybridum* L. growth and development, and the acid resistance should not be the key factor of adaptation capability. The replacement of CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> in soil led to the decrease of O<sub>2</sub> concentration from 20% to 6.7% in the 10-20 cm soil layer. Previous study showed that the seedling rate, net photosynthetic rate, transpiration rate and fresh weight of maize were significantly inhibited under 500 g/(m<sup>2</sup>·d) CO<sub>2</sub> leakage treatment, while *Trifolium hybridum* L. showed a better tolerance to O<sub>2</sub> concentration reduction in soil than the maize. This finding suggests that *Trifolium hybridum* L. can be the alternative crop for the potential mild leakage area and can be developed as a new technology for the leakage of stored CO<sub>2</sub>. However, the mechanism of *Trifolium hybridum* L. for the resistance to CO<sub>2</sub> leakage is still unclear and further researches will be needed.

**Key words:** carbon; storage; gases; carbon capture and storage; leakage; *Trifolium hybridum* L.; response