

非饱和带二氧化碳入侵对表生植物及土壤的影响

潘 颖, 赵晓红, 王文科, 邓红章, 韩 枫, 罗平平, 杨雨萌, 张 徽

Influence of carbon dioxide invasion in the unsaturated zone on vegetation and soil

PAN Ying, ZHAO Xiaohong, WANG Wenke, DENG Hongzhang, HAN Feng, LUO Pingping, YANG Yumeng, and ZHANG Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202102023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures

赵科锋, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

承德中部土壤-黄芩系统重金属生物有效性及迁移累积特征

Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a soil and *Scutellaria baicalensis* system in Chengde Central Region

贾凤超, 卫晓峰, 孙厚云, 李多杰, 李健 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 142-153

承德市土壤重金属空间结构与分布特征

Spatial structure and distribution characteristics of heavy metals in the soil in Chengde

安永龙, 万利勤, 李霞, 殷志强, 卫晓峰, 何泽新, 贾凤超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 119-131

基于自组织神经网络的污染场地多监测指标相关性分析

Correlation analysis of multiple monitoring indicators of contaminated site based on self-organizing map

马春龙, 施小清, 许伟伟, 任静华, 王佩, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 191-202

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202102023

非饱和带二氧化碳入侵对表生植物及土壤的影响

潘颖^{1,2}, 赵晓红^{1,2}, 王文科¹, 邓红章¹, 韩枫¹, 罗平平¹, 杨雨萌², 张徽³

(1. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 3. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 非饱和带属于地球关键带, 与人类生存环境及安全健康关系密切, 而 CO₂ 对生态环境及全球气候变化的影响至关重要。为了探索高浓度 CO₂ 入侵非饱和带对生态环境可能带来的风险, 基于长安大学水与环境原位试验场 CO₂ 试验平台, 向种植有 5 种典型植物(黑麦草、小麦、玉米、豌豆和苋菜)的土壤中长期注入浓度为 5%、10% 和 15% 的 CO₂ 气体, 评估 CO₂ 入侵对植物和土壤的潜在影响。对表生植物及土壤样品(深度为 20~30 cm)的理化性质分析表明: 高浓度 CO₂ 明显抑制了植物的生长, 会导致植株高度、叶片数和果实重量下降; 土壤矿相和理化性质也有微小变化, 表现为土壤 pH 值的变化以及氮、有效钾、有效磷等的减少。通过分析植物的光合作用、渗透调节作用以及抗氧化系统的变化, 不同的植物对 CO₂ 胁迫表现出不同且复杂的响应, 总体上 C3 单子叶植物黑麦草和 C4 单子叶植物玉米显示出比其他植物更高的敏感性, 表明它们有潜力作为评估 CO₂ 生态影响的指示植物。

关键词: 非饱和带; CO₂ 入侵; 生态环境安全; 植物; 土壤

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)04-0180-10

Influence of carbon dioxide invasion in the unsaturated zone on vegetation and soil

PAN Ying^{1,2}, ZHAO Xiaohong^{1,2}, WANG Wenke¹, DENG Hongzhang¹, HAN Feng¹,
LUO Pingping¹, YANG Yumeng², ZHANG Hui³

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China; 3. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding, Hebei 071051, China)

Abstract: The unsaturated zone is the critical zone of the earth, which is closely related to the human living environment and health safety. Carbon dioxide plays a crucial role in the ecological environment and global climate change. In order to explore the potential risk of high concentration CO₂ invasion into the unsaturated zone to the ecological environment, and based on CO₂ simulation platform of in situ research filed of water and environment of the Chang'an University, we present a controlled experiment, in which 5%, 10% and 15% pure CO₂ was respectively injected into the local soil planted with five typical plants (ryegrass, wheat, corn, pea and amaranth) to assess the potential impact of CO₂ invasion on the environment, specifically on soil and plants. Botanical investigation and chemical analyses of soil samples (at depth from 20 to 30 cm) shows a significant adverse impact of CO₂ injection on plant growth, including declining plant height, number of leaves and fruit

收稿日期: 2021-02-23; 修订日期: 2021-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077183; 41302208); 国土资源公益性行业科研项目(201211063-4)

第一作者: 潘颖(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事环境生态方面的研究。E-mail: 1107914020@qq.com

通讯作者: 赵晓红(1976-), 女, 副教授, 主要从事水土污染、环境化学等方面的研究。E-mail: xzhao@chd.edu.cn

weight. Small changes were observed in mineralogy and bulk chemistry, showing the change of soil pH and reduction of nitrogen, available potassium, available phosphorus, etc. Different plants show different and complicated responses to CO₂ stress, depending on plant life history, including photosynthetic pathways, osmoregulation and antioxidant systems. On the whole, C3 monocotyledon ryegrass and C4 monocotyledon corn show greater sensitivity than other plants, suggesting their potential as indicator plants for evaluation of CO₂ impact on ecological environment.

Keywords: unsaturated zone; CO₂ invasion; environmental impact; vegetation; soil

环境中的 CO₂ 与全球气候变化、植物生长发育及人类健康安全息息相关,研究 CO₂ 的减排技术如地质碳储存(GCS)及 CO₂ 对生态环境的影响至关重要。在地震、火山爆发和采矿等干扰下,GCS 可能会发生泄漏,高浓度 CO₂ 通过裂缝、地质断层或注水井向上移动并逃逸到地表环境中^[1]。因此,CO₂ 对地下水、土壤、植被、大气等环境的影响及其监测技术^[2-5] 备受关注。

过量的 CO₂ 对地下水可能会造成一系列影响,包括 pH 值降低^[6-8],某些离子(如镉、镁、铅、砷、锌等)浓度发生变化^[9],水体氧化还原电位的变化可能引发某些化学反应及改变一些污染物的生物活性^[9-12]。有文献研究 CO₂ 渗流对土壤化学的影响,揭示了 pH 值、辉石、钠长石、石英等矿物, CaO、MgO、Fe₂O₃、Mn₃O₄ 等氧化物以及 Mg、K、Ba、Al、Cr、Fe、Mn、Pb、Co 等金属元素浓度的下降趋势^[13-14]。

另外,大量研究关注了高浓度 CO₂ 对生态系统和表生植被的影响。CO₂ 浓度升高会影响土壤酶、土壤呼吸、根系分泌物、微生物活性和群落结构^[15-18]。Kruger 等^[19] 研究了德国 Leacher See 天然陆地 CO₂ 排放口的植被和微生物种群,发现双子叶植物比单子叶植物对 CO₂ 注入更为敏感。有研究考察了自然产生的 CO₂ 对植物生长的影响,发现植株高度和 CO₂ 浓度之间存在很强的负相关^[20]。此外,CO₂ 浓度升高会对植物的光合作用、根呼吸和植物发育产生不利影响^[21-22]。在诺丁汉大学校区的 ASGARD(Artificial Soil Gasassing Response Detection)基地进行的类似研究表明:种子萌发率、生长响应与 CO₂ 浓度呈负相关关系^[23]。West 等^[24] 通过模拟 CO₂ 泄漏试验,发现单子叶植物比双子叶植物更耐胁迫,这也与其他研究结果^[19,25-26] 一致。虽然这些研究探讨了土壤和生态系统对 CO₂ 入侵的响应,但很少进行系统、全面的模拟试验。

本研究利用长安大学渭水校区的 CO₂ 泄漏模拟试验平台,对当地选定的土壤和植物进行可控的 CO₂

注入,研究高浓度 CO₂ 入侵非饱和带土壤对植物生长、光合作用、代谢作用和抗逆性的影响,探讨土壤理化性质的变化,评估 CO₂ 对生态环境安全的影响,同时寻找可用于监测 CO₂ 泄漏的潜在指示植物。

1 材料与方法

1.1 研究地点和试验控制系统

长安大学渭水校区水与环境原位试验场(图 1)总面积 13 300 m²,其中 CO₂ 模拟试验区 2 190 m²,包括 CO₂ 混配系统、CO₂ 监测塔和温室,可模拟和探索高浓度 CO₂ 对表生植物和土壤地球化学性质的影响。

图 1(b)为温室,由 4 个单独室组成,每个室有 15 个木制试验样框,见图 1(c)。通过试验框中圆形进气管从底部注入不同浓度的 CO₂,CO₂ 浓度配比调控系统由计算机控制,可将高压气瓶中纯 CO₂ 和空气以不同的体积比混合,并按照设计的浓度及释放速率将 CO₂ 通过压缩机和配气管道输送到各个试验区。

1.2 试验方法和样品采集

研究中使用的土壤采自鄂尔多斯 GCS 工程示范区。播种前,将土壤与一定量的有机肥料混合并充分搅拌均匀。此后,将温室中每个试验框装满相等重量的土壤,用相同体积的自来水浇灌保持 20%~40% 的水分。选择 C3 单子叶植物黑麦草和小麦,C3 双子叶植物豌豆,C4 单子叶植物玉米和 C4 双子叶植物苋菜,在 4 个温室 60 个试验框中播种,每种植物在同一温室内设置三个平行样。在植物生长期(4 月—11 月),从试验框底部持续注入高浓度 CO₂。同一温室 CO₂ 浓度相同,不同温室浓度分别设定为 5%、10% 和 15%(V/V),第四个温室作为对照组,没有注入 CO₂。

在植物生长周期期间,测量植株高度和叶片数,并在成熟时记录果实的重量和数目。取植物叶片样分析植物光合作用、代谢功能以及抗逆性变化。植物样品采集后保存在冰箱中,并在一周内完成测试分析。

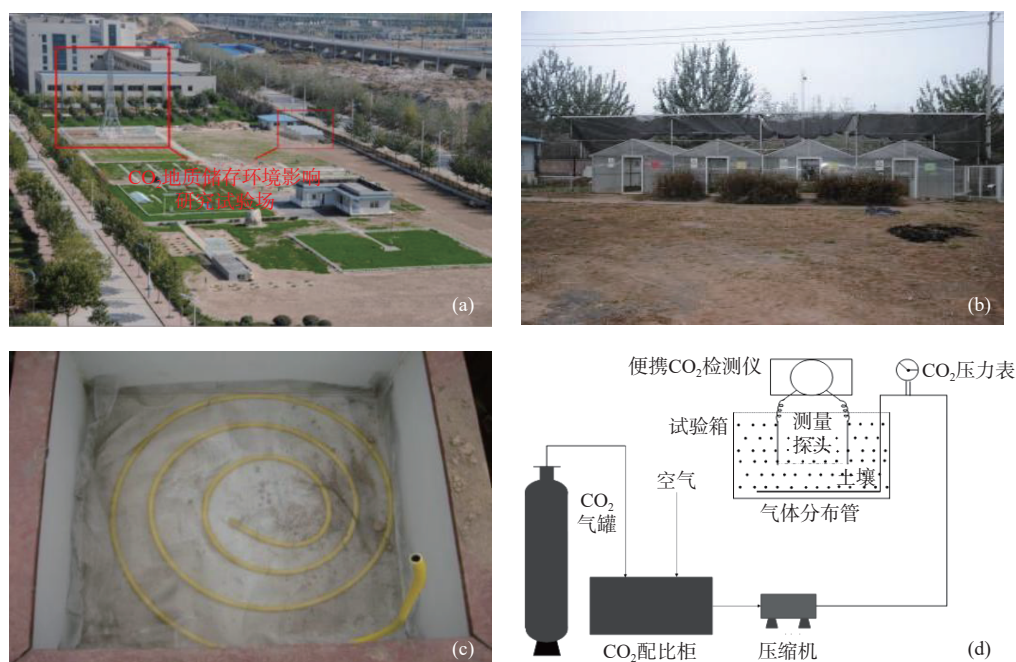


图1 原位试验场地总览(a)、温室(b)、温室试验框(c)及CO₂入侵模拟试验流程图(d)

Fig.1 Overview of the test field (a), the greenhouse (b), the plant plot (c) and the schema of CO₂ transport system (d)

土壤取样时将所有植物去除,从20~30 cm深度采集土壤样品,每个温室试验框中采点2~3处,每个框均采集,后将土壤样混合均匀,最终形成4份土壤样品,分别标记为X0、X5、X10、X15(分别代表注入0%、5%、10%和15%的CO₂)。将收集的土壤样品风干并通过200目筛网过筛除去大的根茎及颗粒,存储在干净袋子中,进行测试和分析。

1.3 指标及测试方法

1.3.1 植物生理生化指标

使用标准方法测量植株高度和叶片数。挑选新鲜的植物样品进行生理生化指标测试:抗逆性指标包括过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、脯氨酸(PRO)和丙二醛(MDA);光合作用指标包括叶绿素a、b和类胡萝卜素;代谢功能指标包括可溶性蛋白质和糖。所有测量均根据标准方法进行^[27]。

1.3.2 土壤理化性质

土壤pH值通过标准脱CO₂水萃取法(水土比为2.5:1)使用pH计测定^[28]。按照标准程序,使用全自动凯氏定氮仪(Foss 8400, 丹麦)测量总氮(TN),使用间断化学分析仪(ADA, CleverChem200, 德国)分析氨(NH₄⁺)、硝酸盐(NO₃⁻)、总磷(TP)和有效磷(AP)。采用火焰光度计(6400A, 德国)测试总钾(TK)和有效钾(AK)。通过X射线衍射仪(XRD)(D/MAX-3C, 日

本)研究土壤矿相组成变化,并通过元素分析仪(VarioEL III, 德国)测量土壤总碳(TC)及有机碳(TOC)。

2 试验结果与讨论

2.1 CO₂入侵对表生植物的影响

2.1.1 发芽率和表观性状

选择豌豆作为目标植物,在发芽的第10天进行测试。图2为4种植物在生长过程中的表观形状。可以看出:在对照区和CO₂浓度为5%、10%和15%的土壤中,豌豆的发芽率分别为90%、82%、69%、46%,发芽率与CO₂浓度之间存在直接的负相关关系。植物在对照土壤中生长良好,茎较高,叶片颜色较深,密度也较高。在高CO₂浓度下,植物的生长受到显著抑制,特别是豌豆。

2.1.2 植物生长和果实质量

在植物生长中期测量株高和叶片数,结果如图3(a)(b)所示。可以看出,玉米和苋菜高度受CO₂影响最明显,玉米在5%区域中最低,较对照区低44.94%,但在不同CO₂浓度下高度没有明显差异;苋菜在10%区域高度最低,比对照组低约45.45%。黑麦草和豌豆高度在其他浓度区变化不大,在15%时株高最低,分别低于对照19.15%和7.8%。值得注意的是,随着CO₂浓度的增加,豌豆高度也有小幅增加的趋势,在10%达到最高。

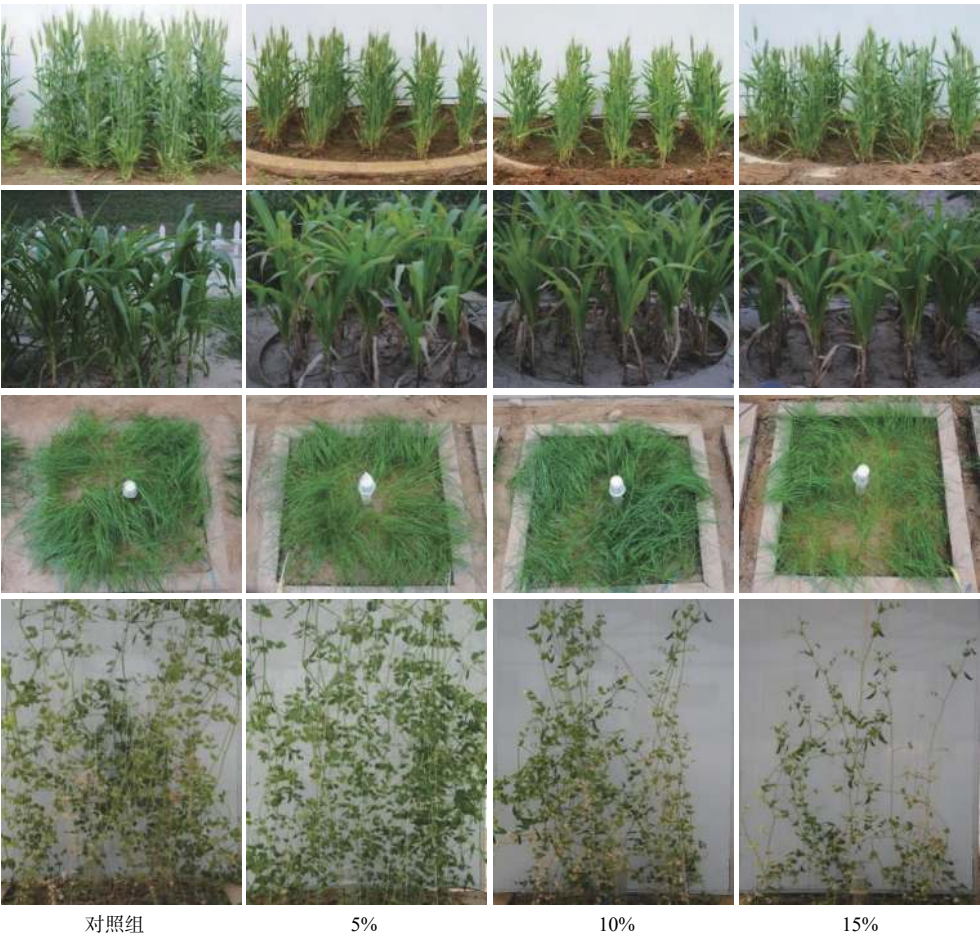


图 2 不同浓度 CO₂ 入侵下植物的生长状况 (从上到下: 小麦、玉米、黑麦草、豌豆)

Fig. 2 The pictures of plants (from top to bottom: wheat, corn, ryegrass and pea)

小麦和豌豆的叶片数随着 CO₂ 浓度的增长没有显著变化, 而黑麦草的叶片数有适度增加。玉米和苋菜的叶片数在 5% 和 10% CO₂ 浓度区下分别比对照区低 20% 和 46.15%。

收获小麦和豌豆果实以测定其重量和数量, 结果如图 3(c)(d) 所示。对照区的小麦果实总重量达到 40 g, 而其他 CO₂ 浓度区的小麦果实的重量不到 5 g; 豌豆荚的重量和数量与 CO₂ 浓度呈负相关, 相关系数分别为 0.912 和 0.981。

2.1.3 植物光合作用

如图 4 所示, 黑麦草、豌豆和玉米的叶绿素 a 在浓度为 5% 的 CO₂ 影响下增加, 后随 CO₂ 浓度升高而降低; 小麦和苋菜中叶绿素 a 含量随着 CO₂ 浓度升高先下降后升高。与叶绿素 a 相比, 叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量很低, 在 CO₂ 干扰下变化不大, 尤其是类胡萝卜素。总体上, CO₂ 浓度对黑麦草、小麦和苋菜光合作用的影响是显而易见的, 对豌豆和玉米的影响相对较弱。在高 CO₂ 浓度下叶绿素含量增加, 表明适

度 CO₂ 可以促进植物的光合作用。

2.1.4 植物代谢功能

蛋白质对细胞和生物的生命活动十分重要。在植物细胞中, 可溶性蛋白对植物具有特异性调节代谢和脱水保护作用^[29], 植物可通过合成更多的可溶性蛋白质以降低渗透压, 维持细胞充沛并减少伤害^[30-31]。表 1 为 5 种植物在不同 CO₂ 浓度影响下可溶性蛋白质浓度。可以看出, 不同植物表显著下降, 但当 CO₂ 分别达到 10% 和 15% 后, 基本保持稳定; 玉米和苋菜叶片中蛋白质含量分别在 15% 和 10% 出现最大值, 比对照组总体含量增加; 豌豆的蛋白质含量有一定的下降, 但变化幅度不大。

可溶性糖是新陈代谢的主要产物, 对调节植物的生长、发育、成熟、衰老和抗逆性, 以及对渗透调节和蛋白质储存至关重要^[32]。通常, 在环境压力下会观察到植物中糖类含量的增加, 以平衡渗透压、减少水分流失、维持植物的生长^[33]。如表 2 所示, 随着 CO₂ 浓度的增加, 所有植物中的可溶性糖含量均有所增加,

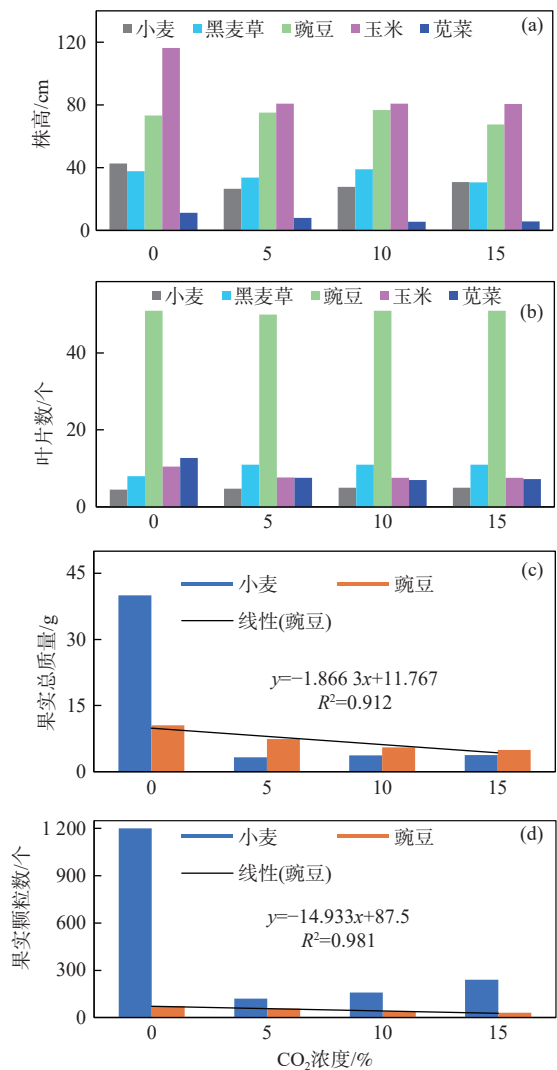


图 3 植株高度 (a)、叶片数量 (b)、果实质量 (c) 及颗粒数 (d) 等的生长情况

Fig. 3 Plant growth analysis including plant height(a), plant leaf number(b), fruit weight(c) and fruit quantity(d)

黑麦草和小麦中的可溶性糖含量远高于玉米、豌豆和苋菜。另外,当 CO₂ 浓度为 5% 时,黑麦草和小麦的含糖量已明显增加;豌豆和玉米在 10% 下才开始增加,苋菜在 15% 时变化较明显。

2.1.5 植物抗逆性

正常情况下植物体内自由基维持在浓度很低的水平,当遭受某种环境胁迫时自由基就会增多,而 SOD、CAT、POD 等酶活性的增强可以清除超氧自由基、H₂O₂ 和过氧化物^[34],减少生物所受的伤害。

图 5 显示,除苋菜外,其他植物中的 POD 远高于 SOD 和 CAT。与对照组相比,黑麦草在 15% CO₂ 影响下,SOD、CAT 的活性有所降低,POD 总体升高;小麦中的 SOD 活性没有明显变化,CAT、POD 先降低后升

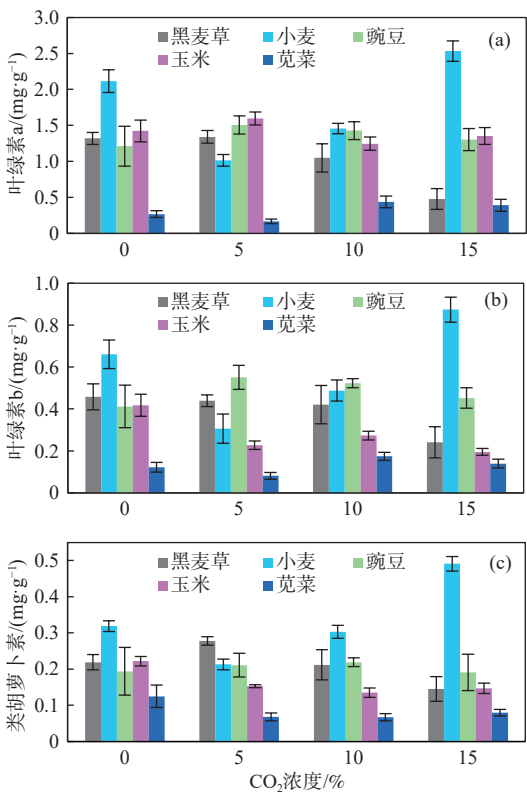


图 4 不同 CO₂ 浓度下植物的光合作用指标

Fig. 4 Photosynthesis of plants under CO₂ exposure

表 1 不同 CO₂ 浓度下植物的可溶性蛋白浓度

Table 1 Soluble protein concentrations of the plants under CO ₂ exposure / (mg·g ⁻¹)					
CO ₂ 浓度/%	黑麦草	小麦	豌豆	玉米	苋菜
0	23.73±4.70	19.87±3.97	16.14±1.94	15.62±2.34	0.86±0.08
5	18.84±2.82	12.49±1.47	13.69±1.70	8.04±0.95	0.79±0.09
10	12.98±1.53	13.16±1.99	15.52±1.44	12.62±1.07	4.03±0.70
15	12.00±1.83	13.34±2.67	15.24±1.86	21.50±4.88	3.54±0.12

表 2 不同 CO₂ 浓度下植物的可溶性糖浓度

Table 2 Soluble saccharide concentrations of the plants under CO ₂ exposure / (μmol·g ⁻¹)					
CO ₂ 浓度/%	黑麦草	小麦	豌豆	玉米	苋菜
0	0.28±0.03	0.26±0.03	0.07±0.01	0.14±0.01	0.12±0.02
5	0.32±0.04	0.32±0.04	0.07±0.01	0.14±0.01	0.10±0.01
10	0.34±0.04	0.39±0.01	0.10±0.02	0.16±0.02	0.12±0.02
15	0.40±0.02	0.41±0.02	0.12±0.02	0.15±0.01	0.15±0.04

高;豌豆中的 SOD、CAT、POD 变化不明显,说明其对外界胁迫的敏感性较低;玉米中的 SOD、CAT 浓度相似,对 CO₂ 不敏感,但在 5% 时 POD 显著增加,随后急剧下降;苋菜体内的 SOD、CAT、POD 含量最低,在 CO₂ 浓度增加时,SOD 降低,CAT 先升高,然后保持稳

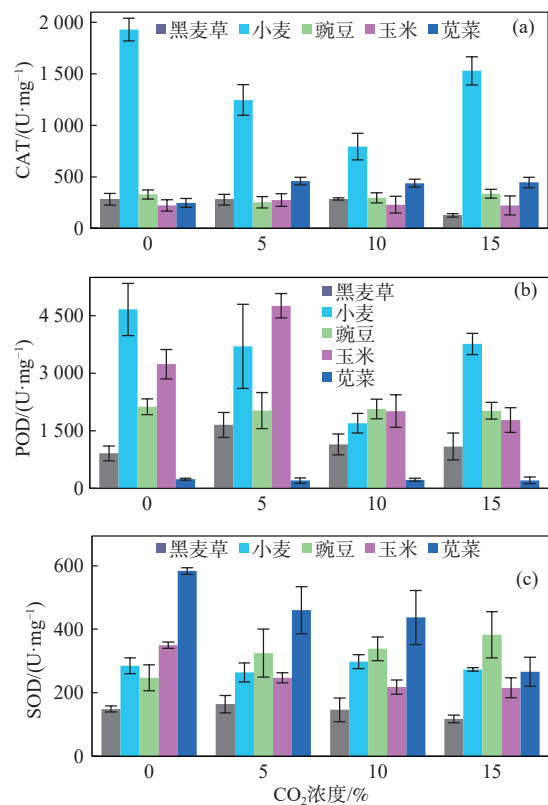


图 5 不同 CO₂ 浓度下植物的抗氧化酶活性
Fig. 5 Antioxidant enzyme activity of plants under the CO₂ exposure

定,而 POD 无明显变化。

植物在处于压力和衰老的状态下产生自由基,会导致膜脂质过氧化作用增强^[35]。MDA 是膜脂质过氧化过程中的重要产物,严重影响膜的健康,因此 MDA 可用作评估膜脂过氧化水平的指标^[35-36]。如表 3 所示,所有植物中的 MDA 浓度都非常低。在 CO₂ 浓度

增加的情况下,黑麦草,小麦,豌豆和玉米中的 MDA 浓度呈上升趋势,且在 15% 和 10% 时,黑麦草和小麦的 MDA 显著增强。苋菜中的 MDA 含量相对稳定。

PRO 是植物蛋白的一种成分,广泛存在于植物的各个部位,包括根、茎、叶、花和果实^[37]。当植物遭受干旱、寒冷、高温和盐分等胁迫时,调节渗透的 PRO 浓度将增加,以降低水势和伤害。从表 4 中可以看出,黑麦草中的 PRO 随 CO₂ 浓度的增加而降低,在 CO₂ 达到 10% 后急剧下降;小麦没有明显的变化趋势,总体上 PRO 浓度下降;豌豆中 PRO 含量随 CO₂ 浓度升高增加明显;玉米在 5% 时增加 31.4%,但在较高的 CO₂ 浓度下又迅速下降;苋菜中 PRO 含量减少,在 10% 条件下含量处于最小值,比对照组减少了 64%。

2.2 土壤理化性质

土壤 pH 值是土壤理化性质的重要参数,通常在 pH 值小于 4 或大于 9 时,植物的代谢功能会受到抑制或破坏。此外, pH 值也会影响植物对 Ca、Mg、N、P 和 K 等离子的吸附。本研究中,原始风干土壤(对照区)的 pH 为 8.85。在注入 CO₂ 后,5%、10% 和 15% 浓度区的 pH 分别为 8.98、9.10、9.12,表明风干土壤 pH 值随 CO₂ 浓度的增加而略微升高。

如图 6 所示,土壤中的 TN 和 TC 浓度范围分别在 0.2 ~ 0.24 g/kg 和 14.18 ~ 16.25 g/kg 之间,并且随着 CO₂ 浓度的增加而降低,最大降幅分别为 16.7% 和 12.7%。土壤中 NH₄⁺(0.73 ~ 13.12 mg/kg)和 NO₃⁻(2.35 ~ 18.09 mg/kg)含量较低,但在 5% 和 10% 时 NH₄⁺含量有明显升高,硝酸盐总体上与总氮的变化一致。土壤中的 TP 含量为 0.505 ~ 0.543 g/kg,CO₂ 入侵可导致 TP 浓度略微升高;AP 的占比很低,仅为 TP 的 2% ~ 2.6%,在

表 3 不同 CO₂ 浓度下植物的丙二醛浓度

Table 3 MDA concentrations of the plants under CO ₂ exposure / (μmol·g ⁻¹)					
CO ₂ 浓度/%	黑麦草	小麦	豌豆	玉米	苋菜
0	0.004 0±0.002 6	0.011 0±0.001 0	0.011 2±0.002 4	0.032 0±0.003 0	0.007 2±0.000 2
5	0.006 5±0.003 9	0.013 0±0.003 0	0.014 9±0.003 2	0.040 1±0.003 0	0.008 6±0.000 2
10	0.007 1±0.002 7	0.016 9±0.002 0	0.015 8±0.002 7	0.040 5±0.004 0	0.006 9±0.000 8
15	0.015 3±0.001 5	0.022 0±0.003 0	0.018 8±0.003 0	0.041 0±0.005 0	0.007 4±0.002 3

表 4 不同 CO₂ 浓度下植物的脯氨酸浓度

Table 4 Proline concentrations of the plants under CO ₂ exposure / (mg·g ⁻¹)					
CO ₂ 浓度/%	黑麦草	小麦	豌豆	玉米	苋菜
0	2 622.80±493.87	253.91±48.29	115.82±15.12	26.45±5.07	40.94±11.35
5	2 570.12±431.96	118.77±21.76	148.93±35.28	34.76±7.62	26.39±6.56
10	1 690.37±234.54	224.89±15.94	161.87±25.23	17.47±4.37	14.74±0.91
15	1 128.91±106.11	181.67±19.17	166.28±10.39	8.53±1.66	17.70±1.40

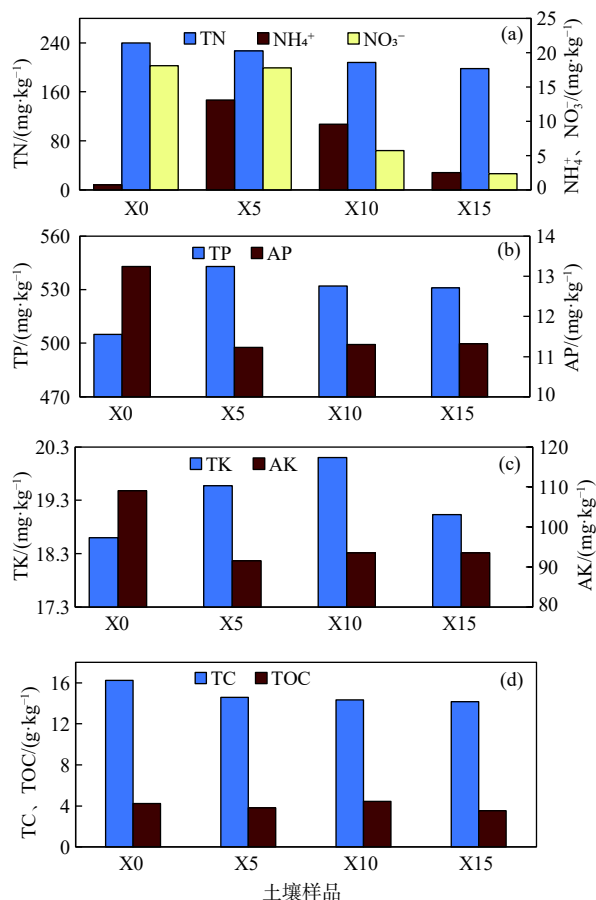


图 6 土壤氮、磷、钾和碳含量随 CO_2 浓度的变化
(X0:对照; X5:5%; X10:10%; X15:15%)

Fig. 6 The concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium and carbon in soil under CO_2 injection (X0: control; X5: 5%, X10: 10%; X15: 15%)

CO_2 入侵的条件下没有明显变化。TK 在 10% CO_2 时含量最高, 为 20.1 g/kg; AK 占比 TK 不足 1%, 在 CO_2 影响下比对照降低了约一半。如图 6(d) 所示: TOC 约占 TC 的 25% ~ 30%, 在 CO_2 胁迫下有较小波动。

图 7 为土壤 XRD 衍射图谱。根据标准图谱, 位于 27°, 28° 和 29.5° 的衍射峰确定为 SiO_2 (silica), 钙长石 - $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (anorthite) 和 CaCO_3 的特征峰; 伊利石 - $\text{KAl}_2[(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ (illite) 的主要特征峰位于 8.8°、27° 2 θ 角, 与 SiO_2 重叠; 高岭石 - $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ (kaolinite) 的最强峰是在 12.5°; 绿泥石和蒙脱石的衍射峰变化不太明显。通过比较峰的位置和强度, 土壤的主要成分是 SiO_2 , 并且在暴露于 CO_2 的情况下, CaCO_3 和钙长石含量稍有增加, 土壤的结晶程度增强, 但总体变化不明显。

2.3 讨论

非饱和带土壤特性对植物的生长至关重要。通

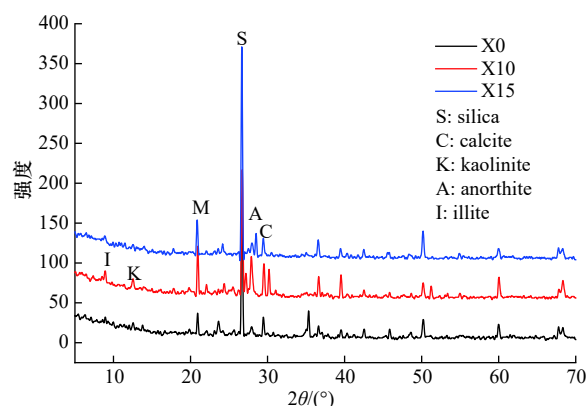


图 7 土壤 XRD 衍射图谱 (X0: 对照; X10: 10%; X15: 15%)

Fig. 7 XRD image of soil (X0: control; X10: 10%; X15: 15%)

常, 土壤是一个复杂的多相系统, 水分、气体成分和矿物质会影响土壤的物理和化学性质。

CO_2 在土壤水相中溶解产生的 H_2CO_3 , 分解为 H^+ 和 HCO_3^- , 会导致土壤 pH 下降^[38]。试验使用土壤原位 pH 计进行了现场测量, 其值在 6.4 ~ 7.8 之间, 此时 CO_2 气体在土壤中处于饱和状态, 土壤含水率较高, CO_2 气体溶于土壤水相, 导致土壤 pH 值较低。而风干土壤 X0 (对照) 的 pH 为 8.85, X5、X10、X15 的 pH 逐渐增加至 9.12。与原位 pH 值不同, 风干土壤中已无 CO_2 气体, 其 pH 值主要受可溶性矿物质的影响。长期注入 CO_2 , 土壤中产生了更多的碱性 CaCO_3 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、钙长石, 从而引起 pH 值略微升高。此外, XRD 测试证实了矿物的结晶及其类型的变化, 这也与以前的研究结果相吻合^[39]。

由于复杂的气-水-土壤多相反应过程, 如溶解、交换、水合作用、水解和腐蚀等过程, 矿物类型和浓度会发生改变^[40-41]。高浓度 CO_2 入侵会导致土壤气相中 CO_2 含量的变化, 并增加 H^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 的浓度, 从而破坏沉淀-溶解平衡, 导致矿物类型和含量、孔隙度、渗透率发生变化^[42]。本文中 CO_2 的入侵也影响了土壤营养元素氮、磷、钾及碳含量。但总体上, 土壤的理化性质变化不明显, 表明在短时期内 CO_2 的入侵不足以给土壤带来显著变化。

土壤特性、天气条件、地貌、植被和土地利用类型都是影响植物生长的主要因素。由于本试验在温室中进行, 因此 CO_2 浓度是影响植物生长的主要因素。试验结果表明, 高浓度 CO_2 对不同植物生长和发育产生的影响比较复杂: 不同植物对不同浓度 CO_2 的响应不同, 但总体上高浓度 CO_2 会抑制植物的生长发育, 可能由于土壤 pH 的降低、 CO_2 浓度的升高抑制了

植物根系的呼吸和对营养物质及微量元素的吸收^[43]。

对于植物的光合作用, CO_2 入侵对不同植物的影响不同。在低浓度 5%, CO_2 可以促进黑麦草、豌豆和玉米的光合作用, 而在较高浓度下会产生抑制作用。相反, 在低 CO_2 浓度下, 小麦和苋菜的光合作用受到抑制, 但在 10% 和 15% 的高 CO_2 浓度下, 光合作用得到增强。这一现象可能是由于不同植物光合作用的 CO_2 饱和点不同所致。

蛋白质和糖类对于植物代谢至关重要。随着 CO_2 含量的增加, C3 植物黑麦草、小麦和豌豆的蛋白质增加, 而 C4 植物玉米和苋菜的蛋白质减少。糖类在所有植物中均有提高, 特别是 C3 植物黑麦草、小麦和豌豆。结果表明与 C4 植物相比, CO_2 入侵对 C3 植物的代谢影响更为显著。

植物中 SOD、CAT 和 POD 浓度与 CO_2 浓度变化没有显著相关性, 这可能是由于 SOD、CAT、POD 的抗逆性阈值不同所致。而且, 不同植物的抗逆性机制是多种多样的: 玉米主要依赖于蛋白质的增加, 黑麦草依赖于糖和 POD, 小麦、豌豆和苋菜主要依赖于糖、SOD 和 CAT。总体上, 黑麦草和玉米对 CO_2 胁迫较为敏感, 具有其作为 CO_2 泄漏指示植物的潜在优势。但由于本研究时间较短, 未获得显著规律, 未来的研究应侧重 CO_2 长期入侵对土壤性质的影响及揭示植物抗逆性的详细机理, 为评估 CO_2 对生态环境带来的潜在威胁提供理论与技术支持。

3 结论

(1) CO_2 入侵非饱和带会导致土壤 pH 的变化。随着 CO_2 浓度的增加, 氮、碳、有效钾、有效磷相对减少, 而 TP、TK 没有明显变化。XRD 表明 CO_2 的入侵可能促进 CaCO_3 、钙长石等矿物的增加, 并提高土壤的晶化程度。

(2) CO_2 入侵对植物的生长、生理生化系统都会产生不利影响: 植物叶片光合作用受到明显抑制, 各植物体内的可溶性糖、蛋白质、PRO 等渗透调节物质以及 CAT、POD、SOD 等抗氧化酶对 CO_2 入侵的响应均有很大差异。相比较而言, 可溶性糖和 POD 的敏感性较高;

(3) 不同植物对 CO_2 胁迫的响应不同, 各因子的变化趋势也不同: C3 单子叶黑麦草和 C4 单子叶玉米比其他植物更敏感, 具有作为监测 CO_2 泄漏的指示植物的潜力。

参考文献 (References) :

- [1] 王齐鑫, 马传明, 花勤健, 等. 安徽省沉积盆地 CO_2 地质储存适宜性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 121 - 130. [WANG Qixin, MA Chuanming, HUA Mengjian, et al. Suitability evaluation of geological storage of CO_2 in sedimentary basin of Anhui Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 121 - 130. (in Chinese with English abstract)]
- [2] STENHOUSE M, ARTHUR R, ZHOU W. Assessing environmental impacts from geological CO_2 storage [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1895 - 1902.
- [3] 彭李晖, 王建军, 尤伟静, 等. 二氧化碳地质储存的主要环境问题及研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 104 - 110. [PENG Lihui, WANG Jianjun, YOU Weijing, et al. Environmental issues and advances of carbon dioxide geological storage [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 104 - 110. (in Chinese with English abstract)]
- [4] MALE E J, PICKLES W L, SILVER E A, et al. Using hyperspectral plant signatures for CO_2 leak detection during the 2008 ZERT CO_2 sequestration field experiment in Bozeman, Montana [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 251 - 261.
- [5] 文冬光, 郭建强, 张森琦, 等. 中国二氧化碳地质储存研究进展 [J]. *中国地质*, 2014, 41(5): 1716 - 1723. [WEN Dongguang, GUO Jianqiang, ZHANG Senqi, et al. The progress in the research on carbon dioxide geological storage in China [J]. *Geology in China*, 2014, 41(5): 1716 - 1723. (in Chinese with English abstract)]
- [6] VONG C Q, JACQUEMET N, PICOT-COLBEAUX G, et al. Reactive transport modeling for impact assessment of a CO_2 intrusion on trace elements mobility within fresh groundwater and its natural attenuation for potential remediation [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3171 - 3178.
- [7] 张森琦, 郭建强, 刁玉杰, 等. 规模化深部咸水含水层 CO_2 地质储存选址方法研究 [J]. *中国地质*, 2011, 38(6): 1640 - 1651. [ZHANG Senqi, GUO Jianqiang, DIAO Yujie, et al. Technical method for selection of CO_2 geological storage project sites in deep saline aquifers [J]. *Geology in China*, 2011, 38(6): 1640 - 1651. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 范基姣, 张森琦, 郭建强, 等. 水环境同位素技术在二氧化碳地质储存中的应用探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 106 - 109. [FAN Jijiao, ZHANG Senqi, GUO Jianqiang, et al. Application of environmental isotope technique to geological storage of carbon

- dioxide[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2013, 40(1): 106 – 109. (in Chinese with English abstract)]
- [9] KHARAKA Y K, THORDSEN J J, KAKOUIROS E, et al. Changes in the chemistry of shallow groundwater related to the 2008 injection of CO₂ at the ZERT field site, Bozeman, Montana[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 273 – 284.
- [10] ARDELAN M V, STEINNES E. Changes in mobility and solubility of the redox sensitive metals Fe, Mn and Co at the seawater-sediment interface following CO₂ seepage[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(2): 569 – 583.
- [11] HUESEMANN M H, SKILLMAN A D, CRECELIUS E A. The inhibition of marine nitrification by ocean disposal of carbon dioxide[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(2): 142 – 148.
- [12] HARVEY O R, QAFOKU N P, CANTRELL K J, et al. Geochemical implications of gas leakage associated with geologic CO₂ storage-A qualitative review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 4: 23 – 36.
- [13] YANG W, MAROTO-VALER M, Steven M D. Environmental consequences of potential leaks of CO₂ in soil[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3224 – 3230.
- [14] 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: 373 – 387.
- [15] LIU Y, HAN S J. Soil and root respiration under elevated CO₂ concentrations during seedling growth of pinus sylvestris var. sylvestriformis[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 600 – 665.
- [16] ALLARD V, ROBIN C, NEWTON P C D, et al. Short and long-term effects of elevated CO₂ on Lolium Perenne rhizodeposition and its consequences on soil organic matter turnover and plant N yield[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 1178 – 1187.
- [17] KANDELER E, MOSIER A R, MORGAN J A, et al. Response of soil microbial biomass and enzyme activities to the transient elevation of carbon dioxide in a semi-arid grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2448 – 2460.
- [18] LI C R, WANG W K, DENG H Z, et al. Effects of elevated carbon dioxide on soil bacterial community structure[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1010/1011/1012: 422 – 428.
- [19] KRVGER 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*, 2011, 5(4): 1093 – 1098.
- [20] 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.
- [21] STOCK W D, LUDWIG F, MORROW C, et al. Long-term effects of elevated atmospheric CO₂ on species composition and productivity of a southern African C4 dominated grassland in the vicinity of a CO₂ exhalation[J]. *Plant Ecology*, 2005, 178(2): 211 – 224.
- [22] 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.
- [23] AL-TRABOULSI M, SJÖGERSTEN S, COLLS J, et al. Potential impact of CO₂ leakage from carbon capture and storage systems on field bean (*Vicia faba*)[J]. *Physiologia plantarum*, 2012, 146(3): 261 – 71.
- [24] WEST J M, PEARCE J M, COOMBS P. 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.
- [25] 伍洋. 地质封存CO₂泄露对玉米和苜蓿影响模拟实验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [WU Yang. Simulation experimental research of the impact of CO₂ leakage from geological storage on maize and alfalfa[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 伍洋, 马欣, 李玉娥, 等. 地质封存CO₂泄露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 Yue, et al. Impact assessment and the tolerance 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)]
- [27] 乔胜英. 土壤理化性质实验指导书[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2012. [QIAO Shengying. Soil physical and chemical properties test instruction[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012. (in Chinese)]
- [28] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. [LI Hesheng. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)]

- [29] 周婵,邹志远,杨允菲.盐碱胁迫对羊草可溶性蛋白质含量的影响[J].东北师大学报(自然科学版),2009,41(3):94-96. [ZHOU Chan, ZOU Zhiyuan, YANG Yunfei. Effect of salt-alkali stress on soluble protein of *leymus chinensis*[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2009, 41(3): 94-96. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 周广.高温胁迫对7种杜鹃生理生化特性的影响[D].南昌:南昌大学,2010. [ZHOU Guang. Effect of the physiological and biochemical character of seven *rhododendron L.* plants under high temperature stress[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 余叔文,汤章城.植物生理和分子生物学[M].北京:科技出版社,1999:39-745. [YU Shuwen, TANG Zhangcheng. Plant physiology and molecular biology[M]. Beijing: Science Press, 1999: 39-745. (in Chinese)]
- [32] 赵江涛,李晓峰,李航,等.可溶性糖在高等植物代谢调节中的生理作用[J].安徽农业科学,2006(24):6423-6425. [ZHAO Jiangtao, LI Xiaofeng, LI Hang, et al. Research on the role of the soluble sugar in the regulation of physiological metabolism in higher plant[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2006(24): 6423-6425. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 吉增宝,王进鑫,李继文,等.不同季节干旱及复水对刺槐幼苗可溶性糖含量的影响[J].西北植物学报,2009,29(7):1358-1363. [JI Zengbao, WANG Jinxin, LI Jiwen, et al. Dynamic changes of soluble sugar in the seedlings of *robinia pseudoacacia* under drought stress and rewatering in different seasons[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(7): 1358-1363. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 张坤生,田荟琳.过氧化氢酶的功能及研究[J].食品科技,2007,32(1):8-10. [ZHANG Kunsheng, TIAN Huilin. Research and function of catalase in organism[J]. *Food Science and Technology*, 2007, 32(1): 8-10. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 赵秀娟,韩雅楠,蔡禄.盐胁迫对植物生理生化特性的影响[J].湖北农业科学,2011,50(19):3897-3899. [ZHAO Xiujuan, HAN Yanan, CAI Lu. Advances in research on physiological and biochemical effects of NaCl stress on plant[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2011, 50(19): 3897-3899. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 王秀香.土壤水分胁迫对不同品种蓖麻叶片丙二醛含量的影响[J].科技资讯,2012(16):137-138. [WANG Xiuxiang. Influence of soil water stress on malondialdehyde content in the different varieties of castor leaves[J]. *Science & Technology Information*, 2012(16): 137-138. (in Chinese)]
- [37] 周青,黄晓华.逆境胁迫下作物积累脯氨酸的生理生态学意义[J].农业环境科学学报,1991,10(6):272-273. [ZHOU Qing, HUANG Xiaohua. Physiological ecology meaning of crop accumulated proline under adversity stress[J]. *Agro-environmental Protection*, 1991, 10(6): 272-273. (in Chinese)]
- [38] 董建兴,李义连,杨国栋,等.CO₂-水-岩相互作用对盖层渗透率影响的数值模拟[J].地质科技情报,2012,31(1):115-121. [DONG Jianxing, LI Yilian, YANG Guodong, et al. Numerical simulation of CO₂-Water-Rock interaction impact on caprock permeability[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(1): 115-121. (in Chinese with English abstract)]
- [39] ZHAO X H, DENG H Z, WANG W K, et al. Impact of naturally leaking carbon dioxide on soil properties and ecosystems in the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3001.
- [40] 吴恒,张信贵,韩立华.水化学场变异对土体性质的影响[J].广西大学学报,1999(2):1-4. [WU Heng, ZHANG Xingui, HAN Lihua. The change of ground water chemical field affect properties of soil mass[J]. *Journal of Guangxi University*, 1999(2): 1-4. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 仵彦卿.地下水与地质灾害[J].地下空间,1999,19(4):303-310. [WU Yanqing. Groundwater and geological disasters[J]. *Underground Space*, 1999, 19(4): 303-310. (in Chinese)]
- [42] 沈天宇.高浓度CO₂入侵对地下水隔水粘土层理化性质的影响[D].西安:长安大学,2018. [SHEN Tianyu. Effects of high concentration CO₂ invasion on physicochemical properties of clay layer of groundwater[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 朱春梧,曾青,朱建国,等.大气CO₂浓度上升对植物地下竞争的影响[J].中国生态农业学报,2007,15(4):185-189. [ZHU Chunwu, ZENG Qing, ZHU Jianguo, et al. Effect of elevated CO₂ on below-ground plant competition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(4): 185-189. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华