

地质封存 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统的影响综述

田地^{1,2}, 马欣^{2①}, 查良松¹, 伍洋², 邹晓霞², 侯晓莉² (1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽 芜湖 241003; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081)

摘要: 地质封存 CO₂ 是当前国际上公认的碳减排的有效措施, 可能成为未来全球 CO₂ 减排的关键性核心技术, 但封存于地下的 CO₂ 存在泄漏风险, 对陆地生态系统, 尤其是近地表陆地生态系统带来潜在威胁。从近地表陆地生态系统的 3 个重要组成部分(地下水、土壤和植被)出发, 概述地下 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统可能产生的影响及过程, 总结了当前国内外关于地下 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统主要领域影响的研究进展和不足, 并在此基础上, 指出未来我国应对地质封存 CO₂ 泄漏影响评估研究的重点领域是农田生态系统, 重点研究内容包括对地质封存 CO₂ 泄漏耐受阈值的界定、CO₂ 泄漏预警体系的构建以及陆地生态系统防灾减灾应对措施体系的提出。

关键词: 地质封存 CO₂; CO₂ 泄漏; 土壤 CO₂ 浓度; 陆地生态系统; 影响

中图分类号: X503.231; K903; S-3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2013)02-0137-09

Review of Impact of CO₂ Leakage From Geologic Storage on Near-Surface Terrestrial Ecological System.

TIAN Di^{1,2}, MA Xin², ZHA Liang-song¹, WU Yang², ZOU Xiao-xia², HOU Xiao-li² (1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Carbon dioxide capture and storage (CCS) has been recognized as an effective way to mitigate emission of CO₂ to the atmosphere and may become a critical technology for global CO₂ mitigation, however, the risk of CO₂ leaking from its geologic storage will pose a potential threat to the terrestrial ecosystem, especially the near-surface terrestrial ecosystem. From the aspects of the three major components (ground water, soil and vegetation) of the near-surface terrestrial ecosystem, a review is presented of the potential impact of the leakage on the ecosystem and its process, and progresses and shortcomings of the researches, abroad and at home, in this field are summarized. On such a basis, it is indicated that the study on impacts of CO₂ leakage from its geologic storage should be focused on evaluation of its impacts on farmland ecosystems, determination of threshold of tolerance of the ecosystems to the leakage, construction of an early warning system for CO₂ leakage, and proposition of a system of countermeasures for the terrestrial ecosystem to avoid or mitigate disasters CO₂ leakage may cause.

Key words: carbon dioxide capture and storage (CCS); CO₂ leakage; soil CO₂ concentration; terrestrial ecological system; impact

地质封存 CO₂ (carbon dioxide capture and storage, CCS) 指将 CO₂ 从工业或相关能源利用产生的 CO₂ 源中分离出来, 输送到一个封存点, 并长期与大气隔绝的过程^[1]。在当前全球变暖的大趋势下, 如何尽可能地减少 CO₂ 排放是应对气候变化的关键所在。国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 对比多种 CO₂ 减排措施后指出: 到 2050 年全球碳减排 35 Gt 情景下, CCS 技术减排贡献量占总减排量的 14%, 减排 48 Gt 情景下 CCS 减排贡献量达到总减排量的 19%; 矿物燃料燃烧结合 CCS 技术甚至可以实现 CO₂ 零排放^[2]。2011 年南非德班气候大会再次明确将 CCS 技术与 CDM (清洁发展

机制)、碳税等一并列举为未来全球 CO₂ 减排的重要措施。到目前为止, 世界 3 大主要 CCS 项目选址于挪威北海斯莱普内尔 (Sleipner) 油田、阿尔及利亚的萨拉赫 (In Salah)^[3] 和加拿大的韦本 (Weyburn), 长期以来大量封存 CO₂, 对 CCS 技术的成功验证引

收稿日期: 2012-08-13

基金项目: 国家科技支撑计划 (2011BAC08B01-01); 国际科技合作计划 (S2012GR0304); 国家软科学研究计划 (2011GXQ4D052); 安徽省软科学项目 (11020503071); 国家自然科学基金面上项目 (41271545)

① 通信作者 E-mail: maxinwork@gmail.com

起许多国家的重视。我国神华集团、华能集团也分别开展了规模较大的 CCS 示范项目^[4-6]。

从安全性角度考虑, CCS 工程将大量超临界 CO₂ 注入地下特定封存点, 其“高效性”取决于“零泄漏”的保障, 即确保 CCS 不发生泄漏且对资源、环境和人类不会构成威胁^[7-9]。但由于各种不稳定因素的作用, 如火山、地震、断层等天然地质活动以及 CO₂ 注入井操控失败等人为原因, CCS 一旦发生泄漏将会抵消其减排的贡献。同时, 在全球气候变化和人类活动频繁影响下的近地表陆地生态系统具有复杂性和脆弱性, 泄漏后的 CO₂ 对其各组成部分的影响将引发整个生态系统失衡, 带来严重的安全隐患。CCS 泄漏将会对近地表陆地生态系统产生直接威胁, 这已经成为 CCS 技术最大的环境风险^[10]。

当前, 国内外学者已经对 CCS 地质封存选址和监测技术进行了深入研究^[11-14], 指出合理选址和实时监测对于避免 CCS 泄漏意义重大。但是, 关于 CCS 泄漏对陆地生态系统风险评估的研究十分缺乏, 尤其是对敏感的农田生态系统影响评估研究甚少。该文在分析 CCS 泄漏途径的基础上, 概括了国内外关于 CCS 泄漏对近地表陆地生态系统影响研究的方法及相关结论, 并提出未来我国 CCS 技术对陆地生态系统安全性研究的重点问题和研究方向, 旨在为我国大规模开展 CCS 示范工程及相关政策的制定提供借鉴, 从而促进 CCS 项目的安全实施,

为全球 CO₂ 减排做出更大的贡献。

1 地质封存 CO₂ 泄漏的途径

CCS 选址需要考虑封存点的地质稳定性、盖层的低渗透性、有效的捕获机理且不存在渗漏路径。早期开采后的油气田、煤床及盐沼池地质构造等都是理想的 CO₂ 封存点。但由于多种因素的作用, CCS 存在泄漏的风险(图 1)。剧烈的地质活动会引起地下 CO₂ 大规模突然泄漏, 以火山活动为例, 世界上许多火山地区 CO₂ 浓度观测结果均表明火山活动会引起地下 CO₂ 的大量释放^[15-17]。假设地质封存点发生火山活动, 地下 CO₂ 的快速大量释放将会产生灾难性的影响^[18-21]。超临界 CO₂ 注入地下后, 在封存空间里不断汇聚, 封存空间内部压力不断增大, 可能引发局部地震、断层等活动。构造断层、地质构造破碎带以及高渗透性的渗流带为地下 CO₂ 的迁移扩散提供了适宜的通道^[22-25]。随着 CO₂ 的不断注入, 地下 CO₂ 对盖层压力的不断增大也会引起地质封存点附近地面按一定的速度不断上升^[26-29], 一旦压力增加到能够突破盖层的水平, 地下 CO₂ 就会向上迁移到淡水层或者直接到达近地表^[30]。另外, 进入地下盐水层中的超临界 CO₂ 也有可能随地下水流从封闭的环境中流出, 最终逃逸到大气或者海洋中^[1]。

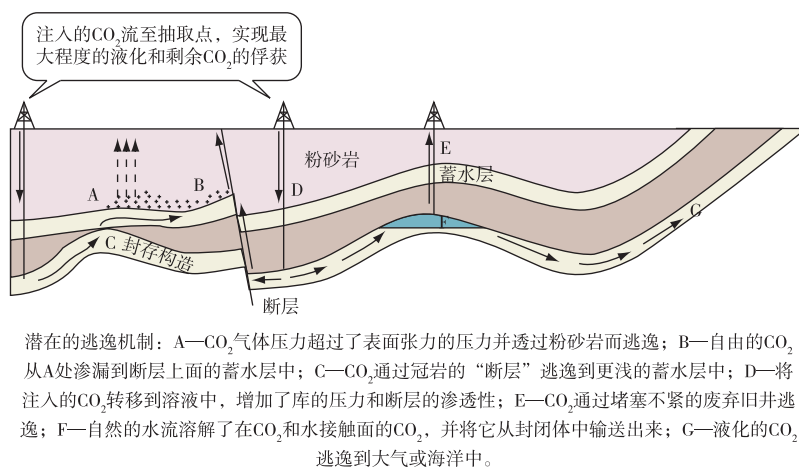


图 1 盐沼池封存 CO₂ 的潜在泄漏途径^[1]

Fig. 1 Routes of potential leakage of CO₂ trapped in salt marsh

从人为因素分析, CO₂ 灌注井、监测井和废弃井的不妥善处理是引起地下 CO₂ 泄漏的主要原因^[31]。未经封闭处理的油气井和浅层水井都可能成为地下 CO₂ 泄漏的直接通道, 由于水泥井口和外壳之间

的空隙、水泥井与套管之间的空隙都会成为 CO₂ 泄漏的潜在路径^[32-34], 所以即使是泄漏处已被堵塞的井口也不能确保封存 CO₂ 的安全性。由于封存于深部盐沼池构造中的 CO₂ 带有大量含盐卤水, 可能

会通过水泥井材料反应而产生腐蚀作用,从而造成封存 CO₂ 沿井的泄漏^[35]。另外,一些与 CCS 无关的人类活动(如耕作、挖掘)、人为管理的疏忽等也会造成封存 CO₂ 的泄漏^[36-37]。根据对 CCS 潜在泄漏途径的认识,通过合理选址能够有效地避免 CO₂ 泄漏的发生,实时监控也可以在一定程度上确保 CCS 工程的安全性。

2 地质封存 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统影响的研究方法

自 CCS 技术最初实施于强化采油(enhanced oil recovery, EOR)中以来,国内外专家就不断进行 CCS 泄漏影响的相关研究,研究方法由对天然 CO₂ 排放源的野外调查、数值模型模拟、实验室创造条件进行批次试验,逐渐发展到构建人工控制释放 CO₂ 模拟 CCS 泄漏风险评估平台进行试验研究的层面。

CCS 工程地质学方面的研究主要是借助一系列数值模型进行的。TOUGH2/EOS7CA 模型、TOUGH-REACT 模型和 FEHM 数值模型都是非等温的多相模型,具备参数设定灵活、模拟时间跨度大等优点,被广泛应用于模拟地下 CO₂ 泄漏后的迁移运行状况^[35,38-41]。但由于泄漏的 CO₂ 在不同介质中的迁移扩散具有复杂性,加上受数据量的限制,数值模型很难准确模拟地下 CO₂ 泄漏后在各种介质中具体的扩散路径。CO₂ 泄漏对地下水影响的主要研究方法包括实验室模拟试验与数值模型模拟相结合的方法,如利用反应输送模型(reactive transport simulation)和 TOUGHREACT V2 模型模拟 CCS 泄漏情景下地下水化学性质的变化及反应过程^[42-43]。另外,天然 CO₂ 排放源的直接观测法也为 CCS 泄漏对地下水的影响研究提供了比较^[44-47]。

CCS 泄漏对土壤生态系统影响的研究对象包括土壤气体、土壤动物、土壤微生物和植被等。其中,对土壤呼吸的监测主要是利用静态箱或 PVC 采气罩进行土壤 CO₂ 通量的长期连续监测,结合 LiCOR-6400 光合仪进行土壤呼吸的分析,或在地下一定深度处理设传感器来收集相关数据^[18];利用气相色谱仪或便携式红外气体分析仪等工具对土壤气体进行分析也是常用的研究方法。CCS 泄漏对植被影响的研究主要通过天然 CO₂ 排放源区(如火山口、CO₂ 泉和断层破碎带等区域)植被生长发育状况的调查,包括利用树木年轮、同位素追踪、高光谱遥感和地质调查等野外调查法^[48-55]。另外,还可借助对天然 CO₂ 排放源区土壤样本的分析,进行

CCS 泄漏对土壤理化性质、土壤微生物和土壤动物的影响评估研究^[56]。

近年来,随着 CCS 技术日益受到重视,为应对 CCS 潜在泄漏风险,国际上监测 CCS 泄漏对生态系统影响的“封存 CO₂ 泄漏的安全与影响(Research into Impacts and Safety in CO₂ Storage Project, RISCS)”项目已经启动^[57],其中英国“人工控制 CO₂ 气体与生态系统响应(Artificial Soil Gassing and Response Detection, ASGARD)”项目组、美国“零泄漏(Zero-Emission Research and Technology Centre, ZERT)”研究组、欧洲共同体成立的“CO₂ 地理网(Geo-Net)”等组织已经实施了多项人工控制地下 CO₂ 释放的模拟试验,探测近地表陆地生态系统对地下 CO₂ 泄漏的响应状况^[9,58-62]。我国 CCS 影响评估研究也在逐步开展。在农作物根际通气研究的基础上,模拟 CCS 泄漏的盆栽试验得以实施,目的在于研究农作物对地下 CO₂ 泄漏的响应及耐受性^[63-69]。但由于地下控制释放 CO₂ 试验很难准确量化 CCS 泄漏通量,CCS 泄漏风险评估模拟平台不能全面反映 CCS 泄漏后的真实情景,对植被/作物承受影响的定量分析和机理研究存在困难,因此迫切需要改进和探索更有效的 CCS 泄漏影响评估研究方法。

3 地质封存 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统的影响

3.1 地质封存 CO₂ 泄漏对浅层地下水的影响

CCS 泄漏后沿泄漏通道可能进入地下含水层,给浅层地下水带来潜在的威胁。

封存于废弃煤、气田以及盆地构造中的 CO₂, 泄漏后沿断层、渗流带和气孔等通道逐渐上升,进入浅层地下水,一部分溶解于地下水中。由于 CO₂ 呈酸性,所以大量 CO₂ 的溶解会引起地下水酸化,pH 值下降,进而引起地下水中溶解矿物的增加,其中包含一些毒性痕量元素,毒性痕量元素浓度上升会对饮用水水质产生安全隐患^[70-71],这是 CCS 泄漏对地下水风险评估研究的热点。从压力层面分析,大规模泄漏的 CO₂ 进入地下含水层,还可能导致浅层地下水水位上升^[72-73],并引起一系列的连锁反应。

盐沼池构造封存 CO₂ 泄漏对浅层地下水的影响会更加复杂。纯净的 CO₂ 本身不会对地下水产生重大影响,但带有大量盐水的 CO₂ 羽流随地下水循环进入浅层地下水,与地下水、岩石和矿物发生一系列化学反应,会改变地下水的化学性质,最主

要表现为地下水 pH 值下降,地下水酸化^[74-79]。在酸化的地下水中,重金属元素从含水层母岩中解析出来,其中碳酸盐在水中的大量溶解使得碳酸盐中的重金属离子相对活跃,对地下水水质构成潜在的重大威胁^[46,74-75],尤其是部分毒性有机化合物含量的增加,使得地下水进入饮用水中后,对人类和动物产生灾难性风险^[76]。另外,大量深层含盐卤水随泄漏的 CO₂ 进入浅层地下水,也存在增加地下水盐度的可能性^[77]。

通过实验室模拟地下水中高浓度 CO₂ 情景试验,发现地下水 pH 值显著降低,地下水中碳酸盐含量明显增加,以 Mn 和 Ba 为主的重金属含量增加, Ca 和 U 离子浓度上升;受泄漏 CO₂ 侵入的影响,地下水中 As 和 Pb 浓度明显升高,引起地下水中毒性痕量元素的持久性活跃^[42,78-79]。ZERT 人工控释 CO₂ 模拟试验中,在向地下一定深度处注入定量的 CO₂ 气体后,发现地下水化学性质发生了明显变化,大量方解石溶解于地下水中后释放 Ca²⁺,地下水 pH 值降低, Ca²⁺ 主导的交换反应促使地下水中主要离子和微量金属含量增加,研究人员由此推测在 CO₂ 泄漏情景下,地下水中阳离子交换和吸附过程是影响地下水化学性质变化的主导因素^[43,71]。实验室和野外模拟 CO₂-水-岩石试验以及 CO₂ 泄漏对地下水影响过程的推测均表明,地下水 pH 值和氧化还原电位的变化主要通过影响地下水中多种金属离子的吸附和解吸作用,络合作用,溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)、总无机碳(total inorganic carbon, TIC)含量等而对地下水化学性质的变化起主导作用^[43,79-80]。

CCS 泄漏引起地下水理化性质的变化不仅会对地下水水质构成潜在威胁,而且还会随着地下水纵向、横向的迁移扩散而对上部的土壤生态系统和植被产生间接的负面影响。随着地下水与其他水体的循环,受 CO₂ 泄漏影响的地下水进入河、湖、海洋中,将会对水体生态系统造成一定程度的干扰,给人类的生存和健康带来潜在的威胁。但对不同封存点的 CO₂ 泄漏风险评估,还应根据区域的地质构造特点和生态环境状况进行具体分析。

3.2 地质封存 CO₂ 泄漏对土壤生态系统的影响

土壤生态系统是陆地生态系统十分敏感的重要组成部分。CCS 泄漏主要通过改变土壤气体、土壤水分、土壤 pH 以及土壤微生物群落组成和活性等而引起土壤理化性质和土壤环境的变化,这对土壤动植物的生长发育不利,且会影响土壤固碳能力。另外,土壤水化学性质的变化也会影响饮用水

的安全和农田生态系统的良性循环。

对生态系统稳定性的研究发现,CCS 泄漏致使地质封存点的地层存在下陷的风险,可能引发微地震^[21],破坏整个土壤生态系统的稳定性。从土壤化学角度分析,CO₂ 泄漏引起地下水酸化,酸化的地下水与土壤水的循环会引起土壤 pH 值的降低,造成土壤酸化,进而影响土壤理化性质和演化过程。对天然 CO₂ 排放源区域进行的野外调查与 ZERT、ASGARD 的人工控制释放 CO₂ 试验均显示土壤 pH 值显著降低^[56,58,71,81],但上述研究很少涉及土壤理化性质演化机理及过程方面的内容,这也是未来 CCS 泄漏风险研究的重点方向之一。

泄漏的 CO₂ 进入土壤,使得土壤中 CO₂ 通量不断上升并很快达到最大值^[82]。土壤中大量 CO₂ 的存在置换了土壤 O₂,导致 O₂ 不断减少,形成缺氧的土壤环境,原有的土壤氧化还原反应条件发生改变,这种土壤环境的长期作用使得土壤中氧化矿物减少,还原矿物增加,同时还还原性气体通量有增加趋势^[83-84]。BEAUBIEN 等^[83]对意大利天然 CO₂ 排气口区域土壤的调查显示,靠近 CO₂ 排气口的缺氧环境中钾长石、石英以及微量元素(包括 As 和 Cr)等有增加趋势,土壤 pH 值下降明显。但短期的 CCS 泄漏模拟试验中并未发现土壤矿物成分有明显变化,土壤 pH 值下降趋势却十分明显^[85]。有学者对土壤湿度的研究发现地下 CO₂ 的大量泄漏使得土壤水分存在下降趋势^[33,83-84],原因可能是土壤孔隙被大量 CO₂ 占据,造成土壤水分减少。关于土壤生物的研究结果显示在天然 CO₂ 排放源区域,高浓度 CO₂ 引起土壤 pH 值和 O₂ 浓度降低,对土壤生物系统产生决定性影响^[50-54,86-87]。土壤 pH 值和 O₂ 浓度的降低营造了缺氧的酸性土壤环境,抑制了土壤中微生物活性和酶活性,导致微生物呼吸减弱,微生物总量减少,对土壤根际微生物群落组成和活性产生很大的负面影响^[88-89]。微生物活性和酶活性的降低减缓了土壤中有有机碳的循环,造成土壤固碳能力下降^[89]。WEST 等^[85]通过 ASGARD 平台对英国低地平原土壤生态系统和理化性质的试验研究证实,土壤中较高的 CO₂ 浓度在降低土壤 pH 值的同时,使得土壤有机碳含量下降。ASGARD 平台的另外一项试验发现缺氧的酸性环境对大型土壤动物(蚯蚓等)的生存不利,在经 CO₂ 通气处理后的农田中发现蚯蚓粪大量减少,证实了蚯蚓活性受到抑制^[56]。

土壤中 CO₂ 浓度的升高,导致土壤中气体组分、土壤水、土壤理化性质以及土壤生物的改变,干

扰了土壤生态系统的正常循环,进而会对植被生长发育和物种多样性产生影响,在土壤 CO₂ 浓度很高的地区甚至会产生致命性的影响。

3.3 地质封存 CO₂ 泄漏对植被/农作物的影响

前人对火山、断层和 CO₂ 泉等天然 CO₂ 排放源区域的野外调查发现,高土壤 CO₂ 浓度区域的植被均显示出一定的生存压力特征,表现为叶片枯黄、株高下降、光合作用降低、生物量减少和提前衰老等。美国 Long Valley 地区树木的大量死亡被证实与断层处的 CO₂ 排放存在空间一致性^[48-50]。斯洛文尼亚和冰岛 CO₂ 泉区域猫尾草和甘茂松受高 CO₂ 浓度影响而濒临死亡,生长减缓,株高降低^[54-55]。意大利和德国两处 CO₂ 排气口区域土壤 CO₂ 浓度达到 100%,几乎没有植被生长;随着离排气口中心的距离越远,植被逐渐出现,且土壤 CO₂ 浓度较高的地区单子叶植物占优势,土壤 CO₂ 浓度达到 5% 以上地区双子叶植物无法生存,以耐酸性的厌氧植被为主;在一定的距离外植被生长正常^[52-53,83]。可见,CO₂ 泄漏对植被产生生理压力的大小与地下 CO₂ 排放通量和土壤 CO₂ 浓度有关。

CCS 泄漏情景下,泄漏的 CO₂ 主要有两种扩散结果。一部分 CO₂ 迁移扩散后直接进入大气,造成局部地区大气 CO₂ 浓度的升高。在开放式空气 CO₂ 浓度增高(free air CO₂ enrichment, FACE)技术平台上的研究证实短期暴露于高浓度大气 CO₂ 条件下,其对植被生长具有肥效作用^[90-93],长期暴露情景下,植被生理、形态特征和基因均发生了适应性的变化^[94-95]。另一部分 CO₂ 滞留于地下,进行复杂的迁移扩散,扰乱土壤生态系统物质循环,对植被生长发育和物种多样性产生负面影响。已经观测到大气和土壤中 CO₂ 浓度上升会对植被生长发育产生截然相反的影响,但有关不同来源的 CO₂ 对植被产生影响的定量试验研究尚未开展,这方面的机理研究尚鲜见。

ZERT 人工控制释放 CO₂ 试验中,研究人员观测到在 CO₂ 泄漏源中心区域植被生长萎缩、枯死,新植被替代了原有植被^[18,82]。ASGARD 地下控制释放 CO₂ 试验中发现植物叶绿素含量和生物量下降,植被颜色呈现不健康迹象;大豆发芽与生长受到严重抑制,牧草的生长也受到负面影响^[56,58],春季蚕豆发生严重的枯黄病,生长减缓,结荚数、生物量和根系生长受到抑制,作物死亡数上升^[96]。我国学者通过气雾栽培法和盆栽通气试验,发现作物根际 CO₂ 达到一定浓度后会抑制作物的生长,对作物株高、茎粗、生物量(地上部/地下部)、茎块产量、叶

片光和果实发育产生负面影响^[63-68]。对玉米进行不同通量的 CO₂ 处理,发现 500 g · m⁻² · d⁻¹ 泄漏通量条件下玉米开始出现生存压力征兆,2 000 g · m⁻² · d⁻¹ 泄漏情景下,玉米植株枯死^[69]。

尽管前人研究已经发现地下 CO₂ 泄漏对植被的消极影响,但土壤中高浓度 CO₂ 对植物造成负面影响的机理尚未明确。地下泄漏的 CO₂ 在近地表汇聚,使得植被根部承受低氧胁迫,植物根呼吸受到抑制,导致植被窒息而亡^[58,96-98],这一推测具有一定的可信度,但尚未得到试验的完全证实,难点在于土壤呼吸与植被根呼吸的定量化区分。高浓度 CO₂ 在土壤中持续作用,改变了土壤 pH 值、氧化还原电位和自然状态下的微生物环境,这也可能是对植被造成影响的原因所在^[99]。另外,有关植被受高浓度土壤 CO₂ 影响后能否恢复的研究较少。有研究指出在淹水、地面板结导致的土壤通气不畅情景下,水稻^[97]、豆类植物和柑橘^[100]等作物并未受根部 CO₂ 浓度升高、O₂ 缺乏的影响,玉米受高浓度土壤 CO₂ 短期影响后能够得到恢复^[98]。因此,地下 CO₂ 泄漏对不同植被/农作物的影响机理仍存在争论,对此应分别进行充分的试验研究,才能得出明确的结论。

4 结论

国内外学者对天然 CO₂ 泄漏源和人工模拟 CCS 泄漏试验平台的相关风险评估问题做了大量研究,在不断完善研究方法的前提下,认识到地下 CO₂ 泄漏对近地表陆地生态系统构成威胁,尤其是对农田生态系统具有负面影响,但依然存在以下问题:

(1)天然 CO₂ 泄漏源的调查研究缺乏泄漏前的数据支撑,无法进行时间尺度的比较研究,也无法了解 CO₂ 泄漏对陆地生态系统影响发生的全过程;人工控制 CO₂ 释放模拟试验结合数值模型可以较好地模拟 CCS 泄漏情景,但受数据量和试验条件的限制,加上 CO₂ 泄漏后进入大气和土壤中所产生的两种相反的影响难以进行定量区分,CCS 泄漏风险评估的准确性有待提高。

(2)CO₂ 泄漏对陆地生态系统各领域影响的具体评估依然缺乏不同时间尺度下定量化的数据基础,地下水、土壤和植被等组分对地下 CO₂ 泄漏的耐受性缺乏时间阈值和空间阈值;包含 CO₂ 泄漏监测、预警、防灾减灾和灾后恢复等在内的一整套陆地生态系统应对 CCS 泄漏的体系尚未开发。

(3)CO₂ 泄漏对陆地生态系统影响的机理尚未明确,陆地生态系统中各组成部分对 CO₂ 泄漏的响

应及相互间的循环转化过程也并不清晰,从宏观上评估 CCS 泄漏对整个陆地生态系统的影响还存在一定的困难。

我国农田生态系统十分脆弱,CCS 泄漏影响作物生长发育,导致生产力下降,对国家粮食安全构成直接威胁,因此对农田生态系统进行风险评估研究是未来我国 CCS 泄漏影响评估研究的重点领域之一。根据国际能源署温室气体研发计划(IEA GHG)于 2007 年提出的 CCS 泄漏对生态系统的潜在风险的论题,参考 CCS 泄漏对近地表陆地生态系统影响的现有研究结果,结合我国农田生态系统的脆弱性现状,笔者建议未来我国农田生态系统 CCS 泄漏影响评估的研究内容主要包括:不同时间尺度下不同种类农作物受 CCS 泄漏影响的定量数据的积累,确定农田生态系统中对 CCS 泄漏最为敏感的指标,制定 CCS 泄漏预警指标体系;重点就 CCS 泄漏对农田生态系统影响机理展开研究,确立一套完整的 CCS 泄漏影响评估技术体系;确定农田生态系统对地下 CO₂ 泄漏通量、CO₂ 泄漏影响时间、CO₂ 泄漏空间分布上的耐受阈值,构建农田生态系统应对 CCS 泄漏的防灾减灾技术体系,确保农业生产和粮食安全。

通过上述研究,进一步深化了我国关于 CCS 泄漏对陆地生态系统影响的研究,为评估 CCS 泄漏风险以及应对地下 CO₂ 突然泄漏和持续性泄漏提供数据基础,为探索 CCS 泄漏的补救措施和其他相关研究提供参考。

参考文献:

[1] METZ B, DAVIDSON O, DE CONINCK H C, *et al.* IPCC 2005 Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005: 2-3.

[2] International Energy Agency. Energy Technology Perspectives; Scenarios & Strategies to 2050 in Support of G8 Plan of Action[EB/OL]. [2012-08-13]. <http://www.iea.org/Textbase/about/copyright.asp>.

[3] EIKEN O, RINGROSE P, HEMANRUD C, *et al.* Lessons Learned From 14 Years of CCS Operations; Sleipner, In Salah and Snøhvit[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 5541-5548.

[4] 孙典文. 为了经济的可持续发展:神华集团成功封存二氧化碳于千米以下地层纪实[J]. 中国石油和化工, 2011(8): 11-15.

[5] 华能集团. 华能携手美国杜克探索清洁能源开发[EB/OL]. [2009-08-10]. <http://www.chng.com.cn/n31531/n31597/c347085/content.html>.

[6] 中国 21 世纪议程管理中心全球环境处. 中国 21 世纪议程管理中心“中意碳捕集与封存(CCS)技术合作项目”第一次技术

研讨会在京举行[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(6): 3.

[7] HA-DUONG M, LOISEL R. Zero Is the Only Acceptable Leakage Rate for Geologically Stored CO₂: An Editorial Comment[J]. Climatic Change, 2009, 93(3/4): 311-317.

[8] OLDENBURG C M, BRYANT S L, NICOT J P. Certification Framework Based on Effective Trapping for Geologic Carbon Sequestration[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(4): 444-457.

[9] PEARCE J, WEST J. Study of Potential Impacts of Leaks From Onshore CO₂ Storage Projects on Terrestrial Ecosystems[R]. Greenhouse Gas R & D Programme (IEAGHG) Technical Study, 2007.

[10] 刘兰翠, 曹东, 王金南. 碳捕获与封存技术潜在的环境影响与对策建议[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(4): 290-295.

[11] BACHU S, BONIJOLY D, BRADSHAW J, *et al.* CO₂ Storage Capacity Estimation: Methodology and Gaps[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007, 1(4): 430-443.

[12] GIBSON-POOL C M, SVENDSEN L, UNDERSCHULTZ J, *et al.* Site Characterisation of a Basin-Scale CO₂ Geological Storage System; Gippsland Basin, Southeast Australia[J]. Environmental Geology, 2008, 54(1): 1583-1606.

[13] OKWEN R T, STEWART M T, CUNNINGHAM J A. Analytical Model for Screening Potential CO₂ Repositories[J]. Computers & Geosciences, 2011, 15(4): 755-770.

[14] WIELOPOLSKI L, MITRA S. Near-Surface Soil Carbon Detection for Monitoring CO₂ Seepage From a Geological Reservoir[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(2): 307-312.

[15] 上官志冠, 武成智. 中国休眠火山区岩浆来源气体地球化学特征[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2638-2646.

[16] GAO L, WEI H Q, SHANGGUAN Z G, *et al.* Recent Geochemical Variation of the Hot-Spring Gases From the Tianchi Volcano, Changbai Mountains, Northeast China[J]. Earthquake Research in China, 2007, 21(2): 179-188.

[17] 高清武. 长白山天池火山水热活动及气体释放特征[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 345-350.

[18] LAKKARAJU V R, ZHOU X B, APPLE M E, *et al.* Studying the Vegetation Response to Simulated Leakage of Sequestered CO₂ Using Spectral Vegetation Indices[J]. Ecological Informatics, 2010, 5(5): 379-389.

[19] HILL P M. Possible Asphyxiation From Carbon Dioxide of a Cross-Country Skier in Eastern California: A Deadly Volcanic Hazard[J]. Wilderness and Environmental Medicine, 2000, 11(3): 192-195.

[20] DURAND M, SCOTT B J. An Investigation of Geothermal Soil Gas Emissions and Indoor Air Pollution in Selected Rotorua Buildings[R]. Institute of Geological & Nuclear Sciences Science Report, 2003: 28.

[21] HEINRICH J J, HERZOG J H, REINER M D. Environmental Assessment of Geologic Storage of CO₂[R]. Washington DC, USA: The Second National Conference on Carbon Sequestration, 2003: 5-8.

[22] ANNUNZIATELLIS A, BEAUBIEN S E, BIGI S, *et al.* Gas Migration Along Fault Systems and Through the Vadose Zone in the Latera Caldera (Central Italy): Implications for CO₂ Geological Stor-

- age[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 3(2): 353 – 372.
- [23] GIAMMANCO S, GURRIERI S, VALENZA M. Fault-Controlled Soil CO₂ Degassing and Shallow Magma Bodies: Summit and Lower East Rift of Kilauea Volcano (Hawaii) [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(4): 853 – 867.
- [24] 上官志冠, 白春华. 腾冲热海地区现代幔源岩浆气体释放特征 [J]. *中国科学: D 辑*, 2000, 30(4): 408 – 414.
- [25] 张加桂, 胡海涛. 深大断裂对幔源 CO₂ 释放作用研究综述 [J]. *中国岩溶*, 1999, 18(1): 96 – 102.
- [26] VASCO D W, FERRETTI A, NOVALI F. Reservoir Monitoring and Characterization Using Satellite Geodetic Data: Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations From the Krecbba Field, Algeria [J]. *Geophysics*, 2008, 73(6): 113 – 122.
- [27] VASCO D W, RUCCI A, FERRETTI A, *et al.* Satellite-Based Measurements of Surface Deformation Reveal Fluid Flow Associated With the Geological Storage of Carbon Dioxide [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(3): 1 – 5.
- [28] ONUMA T, OHKAWA S. Detection of Surface Deformation Related With CO₂ Injection by DInSAR at In Salah, Algeria [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 2177 – 2184.
- [29] RUTQVIST J, VASCO D W, MYER L. Coupled Reservoir-Geomechanical Analysis of CO₂ Injection and Ground Deformations at In Salah, Algeria [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 2(4): 225 – 230.
- [30] LACKNER K S, BRENNAN S. Envisioning Carbon Capture and Storage: Expanded Possibilities Due to Air Capture, Leakage Insurance, and C¹⁴ Monitoring [J]. *Climatic Change*, 2009, 96(3): 357 – 378.
- [31] 张森琦, 刁玉杰, 程旭学, 等. 二氧化碳地质储存泄漏通道及环境监测研究 [J]. *冰川冻土*, 2010, 12(6): 1251 – 1261.
- [32] HUMEZ P, AUDIGANE P, LIONS J, *et al.* Modeling of CO₂ Leakage Up Through an Abandoned Well From Deep Saline Aquifer to Shallow Fresh Groundwaters [J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 90(1): 153 – 181.
- [33] NICOT J P. A Survey of Oil and Gas Wells in the Texas Gulf Coast, USA and Implications for Geological Sequestration of CO₂ [J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(7): 1625 – 1638.
- [34] PAWAR R J, WATSON B T L, GABLE C W. Numerical Simulation of CO₂ Leakage Through Abandoned Wells: Model for an Abandoned Site With Observed Gas Migration in Alberta, Canada [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 3625 – 3632.
- [35] KUTCHKO B G, STRAZISAR B R, DZOMBAK D A, *et al.* Degradation of Well Cement by CO₂ Under Geologic Sequestration Conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(13): 4787 – 4792.
- [36] STENHOUSE M, ARTHUR R, WEI Z. Assessing Environmental Impacts From Geological CO₂ Storage [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1895 – 1902.
- [37] DAMEN K, FAAIJ A E, TURKENBURG W. Health, Safety and Environmental Risks of Underground CO₂ Storage: Overview of Mechanisms and Current Knowledge [J]. *Climate Change*, 2006, 74(1/2/3): 289 – 318.
- [38] OLDENBURG C M, LEWICKI J L, DOBECK L, *et al.* Modeling Gas Transport in the Shallow Subsurface During the ZERT CO₂ Release Test [J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 82(1): 77 – 92.
- [39] OLDENBURG C M, LEWICKI J L, PAN L, *et al.* Origin of the Patchy Emission Pattern at the ZERT CO₂ Release Test [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 241 – 250.
- [40] XU T F, SPYCHER N, SONNENTHAL E, *et al.* TOUGHREACT Version 2.0: A Simulator for Subsurface Reactive Transport Under Non-Isothermal Multiphase Flow Conditions [J]. *Computers & Geosciences*, 2011, 37(6): 763 – 774.
- [41] GELONI C, GIORGIS T, BATTISTELLI A. Modeling of Rocks and Cement Alteration due to CO₂ Injection in An Exploited Gas Reservoir [J]. *Transport In Porous Media*, 2011, 90(1): 183 – 200.
- [42] APPS J A, ZHENG L, ZHANG Y, *et al.* Evaluation of Potential Changes in Groundwater Quality in Response to CO₂ Leakage From Deep Geologic Storage [J]. *Transport In Porous Media*, 2010, 82(1): 215 – 246.
- [43] ZHENG L G, APPS J A, SPYCHER N, *et al.* Geochemical Modeling of Changes in Shallow Groundwater Chemistry Observed During the MSU-ZERT CO₂ Injection Experiment [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2012, 7(1): 202 – 217.
- [44] FEDERICO C, AIUPPA A, FAVARA R, *et al.* Geochemical Monitoring of Groundwaters (1998 – 2001) at Vesuvius Volcano (Italy) [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 133(1/2/3/4): 81 – 104.
- [45] LU X L, WATSON A, GORIN A V, *et al.* Measurements in a Low Temperature CO₂-Driven Geysering Well, Viewed in Relation to Natural Geysers [J]. *Geothermics*, 2005, 34(4): 389 – 410.
- [46] KETING E H, FESSENDEN J, KANJORSKI N, *et al.* The Impact of CO₂ on Shallow Groundwater Chemistry: Observations at a Natural Analog Site and Implications for Carbon Sequestration [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(3): 521 – 536.
- [47] WILKIN R T, DIGIULIO D C. Geochemical Impacts to Groundwater From Geologic Carbon Sequestration: Controls on pH and Inorganic Carbon Concentrations From Reaction Path and Kinetic Modeling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(12): 4821 – 4827.
- [48] FARRAR C D, SOREY M L, EVANS W C, *et al.* Forest-Killing Diffuse CO₂ Emission at Mammoth Mountain as a Sign of Magmatic Unrest [J]. *Nature*, 1995, 24(376): 675 – 677.
- [49] BERGFELD D, EVANS W C, HOWLE J F, *et al.* Carbon Dioxide Emissions From Vegetation-Kill Zones Around the Resurgent Dome of Long Valley Caldera, Eastern California, USA [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2006, 152(1/2): 140 – 156.
- [50] MARTINI B A, SILVER E A, POTTS D C, *et al.* Geological and Geobotanical Studies of Long Valley Caldera, CA, USA, Utilizing New 5 m Hyperspectral Imagery [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, 2000: 24 – 28.*
- [51] BATESON L, VELLICO M, BEAUBIEN S E, *et al.* The Application of Remote-Sensing Techniques to Monitor CO₂-Storage Sites for Surface Leakage: Method Development and Testing at Latera (Ita-

- ly) Where Naturally Produced CO₂ Is Leaking to the Atmosphere [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2008, 2(3): 388 – 400.
- [52] KRÜGER M, WEST J, FRERICHS J, *et al.* Ecosystem Effects of Elevated CO₂ Concentrations on Microbial Populations at a Terrestrial CO₂ Vent at Laacher See, Germany [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 1933 – 1939.
- [53] KRÜGER M, JONES D, FRERICHS J, *et al.* Ecosystem Effects of Elevated CO₂ Concentrations on Microbial Populations at a Terrestrial CO₂ Vent at Laacher See, Germany [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(4): 1093 – 1098.
- [54] 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.
- [55] COOK A C, TISSUE D T, ROBERTS S W, *et al.* Effects of Long-Term Elevated CO₂ From Natural CO₂ Springs on *Nardus stricta*: Photosynthesis, Biochemistry, Growth and Phenology [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21(4): 417 – 425.
- [56] PIERCE S, SJÖGERSTEN S. Effects of Below Ground CO₂ Emissions on Plant and Microbial Communities [J]. *Plant Soil*, 2009, 325(1/2): 197 – 205.
- [57] STEVEN M D, SMITH K L. Initial Review Document. Document D3. 14, RISCs Project: Research Into Impacts and Safety in CO₂ Storage [R]. Sixth Framework Programme, European Commission, Brussels, Belgium, 2010.
- [58] PATIL R H, COLLS J J, STEVEN M D. Effects of CO₂ Gas as Leaks From Geological Storage Sites on Agro-Ecosystems [J]. *Energy*, 2010, 35(12): 1 – 5.
- [59] FESSEN J E, CLEGG S M, RAHN T A, *et al.* Novel MVA Tools to Track CO₂ Seepage, Tested at the ZERT Controlled Release site in Bozeman, MT [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 325 – 334.
- [60] WELLS A, STRAZISAR B, DIEHL J R, *et al.* Atmospheric Tracer Monitoring and Surface Plume Development at the ZERT Pilot Test in Bozeman, Montana, USA [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 299 – 305.
- [61] OLDENBURG C M, LEWICKI J L, PAN L, *et al.* Origin of the Patchy Emission Pattern at the ZERT CO₂ Release Test [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 241 – 250.
- [62] OLDENBURG C M, LEWICKI J L, DOBECK L, *et al.* Modeling Gas Transport in the Shallow Subsurface During the ZERT CO₂ Release Test [J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 82(1): 77 – 92.
- [63] 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.
- [64] 赵旭, 李天来, 孙周平, 等. 短期根际不同 CO₂ 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.
- [65] 刘义玲, 李天来, 孙周平, 等. 根际 CO₂ 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.
- [66] 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.
- [67] 李天来, 陈亚东, 刘义玲, 等. 根际 CO₂ 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.
- [68] 郭超, 牛全文. 根际通气对盆栽玉米生长与根系活力的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(6): 1194 – 1198.
- [69] 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.
- [70] LEMIEUX J M. Review: The Potential Impact of Underground Geological Storage of Carbon Dioxide in Deep Saline Aquifers on Shallow Groundwater Resources [J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(4): 757 – 778.
- [71] KHARAKA Y K, THORSEN 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.
- [72] BERGMAN P D, WINTER E M. Disposal of Carbon Dioxide in Aquifers in the U. S [J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36(6/7/8/9): 523 – 526.
- [73] BIRKHOLZER J, ZHOU Q L, RUTQVIST J, *et al.* Research Project on CO₂ Geological Storage and Groundwater Resources: Large-Scale Hydrogeological Evaluation and Impact on Groundwater Systems [R]. NETL Annual Report, 2007 – 2008: 55 – 59.
- [74] KHARAKA Y K, COLE D R, HOVORKA S D, *et al.* Gas-Water-Rock Interactions in Frio Formation Following CO₂ Injection: Implications for the Storage of Green-House Gases in Sedimentary Basins [J]. *Geology*, 2006, 34(7): 577 – 580.
- [75] KHARAKA Y K, THORSEN J J, HOVORKA S D, *et al.* Potential Environmental Issues of CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers: Geochemical Results From the Frio-I Brine Pilot Test, Texas, USA [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(6): 1106 – 1112.
- [76] COURT B, CELIA M A, NORDBOTTEN J M, *et al.* Active and Integrated Management of Water Resources Throughout CO₂ Capture and Sequestration Operations [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 4221 – 4229.
- [77] LU J M, PARTIN J W, HOVORKA S D, *et al.* Potential Risks to Freshwater Resources as a Result of Leakage From CO₂ Geological Storage: A Batch-Reaction Experiment [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2): 335 – 348.
- [78] KEATING E H, HAKALA J A, VISWANATHAN H, *et al.* The Challenge of Predicting Groundwater Quality Impacts in a CO₂ Leakage Scenario: Results From Field, Laboratory, and Modeling Studies at a Natural Analog Site in New Mexico, USA [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 3239 – 3245.
- [79] WANG S, JAFFE P R. Dissolution of a Mineral Phase in Potable Aquifers Due to CO₂ Releases From Deep Formations: Effect of Dissolution Kinetics [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(18/19): 2833 – 2848.
- [80] ZHENG Lian-ge, APPS J A, ZHANG Y Q, *et al.* Reactive Transport Simulations to Study Groundwater Quality Changes in Response to CO₂ Leakage From Deep Geological Storage [J]. *Energy Procedia*,

- 2009, 1(1):1887-1894.
- [81] MALE E J, PICKLES W L, SILVER E A, *et al.* Using Hyperspectral Plant Signatures for CO₂ Leak Detection During the 2008 ZERT CO₂ Sequestration Field Experiment in Bozeman, Montana [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(2):251-261.
- [82] 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.
- [83] 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, 3(2):373-387.
- [84] HASHIMOTO S, KOMATSU H. Relationships Between Soil CO₂ Concentration and CO₂ Production, Temperature, Water Content, and Gas Diffusivity: Implications for Field Studies Through Sensitivity Analyses [J]. *Journal of Forest Research*, 2006, 11(1):41-50.
- [85] WEST J M, PEARCE J M, COOMBS P, *et al.* The Impact of Controlled Injection of CO₂ on the Soil Ecosystem and Chemistry of an English Lowland Pasture [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1):1863-1870.
- [86] SOREY M, EVANS W, KENNEDY B, *et al.* Carbon Dioxide and Helium Emissions From a Reservoir of Magmatic Gas Beneath Mammoth Mountain, California [J]. *Geophysics Research*, 1998, 103(B7):15303-15323.
- [87] BIONDI F, FESSENDEN J E. Response of Lodgepole Pine Growth to CO₂ Degassing at Mammoth Mountain, California [J]. *Ecology*, 1999, 80(7):2420-2426.
- [88] ŠANTRUČKOVÁ H, ŠIMEK M. Effect of Soil CO₂ Concentration on Microbial Biomass [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25(3):269-273.
- [89] MOROZOVA D, ZETTLITZER M, LET D. Monitoring of the Microbial Community Composition in Deep Subsurface Saline Aquifers During CO₂ Storage in Ketzin, Germany [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4(6):4362-4370.
- [90] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [91] 林光辉. 大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响: 国外十余年来模拟实验研究之主要手段及基本结论 [J]. *植物生态学报*, 1997, 21(6):489-502.
- [92] 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.
- [93] HEIDI-ANDERSON T, HEINEMEYER O, WEIGEL H J. Changes in the Fungal-to-Bacterial Respiratory Ratio and Microbial Biomass in Agriculturally Managed Soils Under Free-Air CO₂ Enrichment (FACE): A Six-Year Survey of a Field Study [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(5):895-904.
- [94] PFANZ H, VODNIK D, WITTMAN C, *et al.* Plants and Geothermal CO₂ Exhalations: Survival in and Adaptation to a High CO₂ Environment [J]. *Progress in Botany*, 2004, 65(1):499-537.
- [95] NAKAMURA I, ONODA Y, MATSUSHIMA N, *et al.* Phenotypic and Genetic Differences in a Perennial Herb Across a Natural Gradient of CO₂ Concentration [J]. *Oecologia*, 2011, 165(3):809-818.
- [96] AL-TRABOULSI M, SJÖGERSTEN S, COLLS J, *et al.* Potential Impact of CO₂ 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.
- [97] BORU G, VANTOAI T, ALVES J, *et al.* Response of Soybean to Oxygen and Elevated Root-Zone Carbon Dioxide Concentration [J]. *Annals of Botany*, 2003, 91(4):447-453.
- [98] NOOMEN M F, SKIDMORE A K. The Effects of High Soil CO₂ Concentrations on Leaf Reflectance of Maize Plants [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(2):481-497.
- [99] NOOMEN M F, SKIDMORE A K, VAN DER MEER F D, *et al.* Continuum Removed Band Depth Analysis for Detecting the Effects of Natural Gas, Methane and Ethane on Maize Reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(3):262-270.
- [100] BOUMA T J, NIELSEN K L, EISENATAT D M, *et al.* Soil CO₂ Concentration Does Not Affect Growth or Root Respiration in Bean or Citrus [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1997, 20(12):1495-1505.

作者简介: 田地(1989—), 女, 安徽阜阳人, 硕士生, 主要从事气候变化与人类活动响应、地质封存 CO₂ 泄漏对农田生态系统的风险评估方面的研究。E-mail: tdwy22@sina.com