

李悦,张绍良. CO<sub>2</sub> 驱油技术对作物生长的影响——以某示范工程区内玉米为例[J]. 江苏农业科学,2017,45(13):238-241.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.13.063

# CO<sub>2</sub> 驱油技术对作物生长的影响

## ——以某示范工程区内玉米为例

李悦,张绍良

(中国矿业大学环境与测绘学院,江苏徐州 221116)

**摘要:**以某 CO<sub>2</sub> 驱油技术(CO<sub>2</sub>-EOR)示范工程为研究对象,通过对 CO<sub>2</sub>-EOR 示范区内玉米长势的监测,采用对比分析、显著性检验等方法,定量分析了 CO<sub>2</sub>-EOR 对玉米生长的影响。结果表明,和对照区相比,监测区内玉米的指标均值波动为 0.23%~5.39%,但长势没有显著差异;油井附近的玉米长势总体优于其他区域,指标均值的波动幅度在 0.33%~3.00%,但是也没有显著差异。究其原因,CO<sub>2</sub>-EOR 过程中从抽油井中携带出来的 CO<sub>2</sub> 轻微提高了油井近地表的 CO<sub>2</sub> 浓度,产生施肥效应。这一结果显示,该 CO<sub>2</sub>-EOR 示范区内玉米没有受到 CO<sub>2</sub> 溢出的负面影响,反而在一定程度上促进了农作物的生长。

**关键词:**CO<sub>2</sub> 地质封存;CO<sub>2</sub> 驱油技术(CO<sub>2</sub>-EOR);玉米;影响分析

**中图分类号:**S162.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)13-0238-04

近年来,人们特别关注 CO<sub>2</sub> 人为排放引起的全球气候变暖问题,将 CO<sub>2</sub> 埋存于地下是解决该问题的有效措施<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub> 驱油技术(CO<sub>2</sub>-EOR, CO<sub>2</sub>-enhanced oil recovery)是 CO<sub>2</sub> 捕获与存储优先发展的技术,也最具商业推广前景<sup>[2-3]</sup>。但是 CO<sub>2</sub> 在运输、注入地下、驱油以及封存过程中,可能会发生泄漏,而不同途径的泄漏对植被、生态系统的影响至今还不清楚<sup>[4-5]</sup>。在中国,很多油井都分布在平原农业生产地区,因此人们担心 CO<sub>2</sub>-EOR 工程会影响农作物的生长。

国内外学者研究发现,地质封存 CO<sub>2</sub> 泄漏导致的大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高,对农作物的影响主要表现在促进植物光合作用、增加其生物量累积;显著提高 C<sub>3</sub> 作物产量,但对 C<sub>4</sub> 作物产量的影响很小;降低了 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 作物气孔导度,非常显著地提高了所有作物的水分利用率等方面<sup>[6-9]</sup>。但也有研究指出,在淹水、地面板结导致的土壤通气不畅情景下,水稻、豆类植物和柑橘等作物并未受根部 CO<sub>2</sub> 浓度升高、O<sub>2</sub> 缺乏的影响,玉米受高浓度土壤 CO<sub>2</sub> 短期影响后能够得到恢复<sup>[10-11]</sup>。因此,地下 CO<sub>2</sub> 泄漏对不同农作物的影响机理仍存在争论,未能得出明确的结论。此外,CO<sub>2</sub> 泄露对生态环境影响的研究方法主要停留在实验室模拟、开放系统中的模拟以及数值模型模拟等方面<sup>[4,6,10-11]</sup>,都是在假设一定浓度 CO<sub>2</sub> 泄漏的基础上,分析其对植被、环境的影响,而缺少对实际 CO<sub>2</sub> 封存工程的监测与研究。

为此,本试验以一个 CO<sub>2</sub>-EOR 工程项目为例,通过对

监测区、对照区、油井附近区和油井远离区的玉米作物长势进行监测,调查 CO<sub>2</sub>-EOR 工程实施对玉米生长的影响,以此探讨 CO<sub>2</sub>-EOR 技术的安全性

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

CO<sub>2</sub>-EOR 示范区位于山东省某油田范围内(图 1),属黄河下游的鲁北平原,北温带季风大陆性气候,春秋短而冬夏长,光照充足,年平均气温 13.10℃,年平均降水量 539.4 mm,年均无霜期 198 d,夏季多雨,冬春多旱。油田位于青城凸起东缘和东营凹陷的西南缘,主要油气层埋藏集中在 900~1 500 m,埋深大于 1 500 m 的中深层油藏主要分布于东区断裂带,探明的含油面积 7.9 km<sup>2</sup>,石油地质储量 0.196 亿 t。区域内主要作物是玉米和小麦,农地水利灌溉设施良好。

#### 1.2 研究方法

**1.2.1 对比区域设置** 本研究设置了监测区与对照区(图 2),监测区位于 CO<sub>2</sub>-EOR 工程实施区域内,面积约 50 km<sup>2</sup>。工程采取一注多采的方式,核心注采区位于监测区中心位置,50 余口采出井则分布在监测区各处。监测区主要分布着耕地和村庄居民点;对照区则位于工程实施区 2 km 以外的西南角,气候条件、耕作方式、灌溉系统及作物种植类型与监测区相同。

为了监测油井附近玉米作物的生长状况,划分油井附近区和远离油井区。根据实地 CO<sub>2</sub> 浓度监测结果,采出井口有较高浓度(6 000 μL/L)(图 3)的 CO<sub>2</sub> 逸散,但 CO<sub>2</sub> 扩散很快,距离采出井 50 m 处没有影响。因此,以 50 m 作为油井附近区和远离油井区划分界限。

**1.2.2 样本调查与数据采集** 采用随机抽样方法,在对照区范围内随机设置 5 个固定样地,在监测区范围内随机设置 18 个固定样地。在每一个样地,布设 3~5 个样方,每个样方内

收稿日期:2016-12-29

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAC24B05)

作者简介:李悦(1993—),女,四川广元人,硕士研究生,从事生态环境监测研究。E-mail:1658826806@qq.com。

通信作者:张绍良,博士,教授,从事生态监测、CO<sub>2</sub> 监测研究。Tel:(0516)83591301;E-mail:cumtztzslly@126.com。

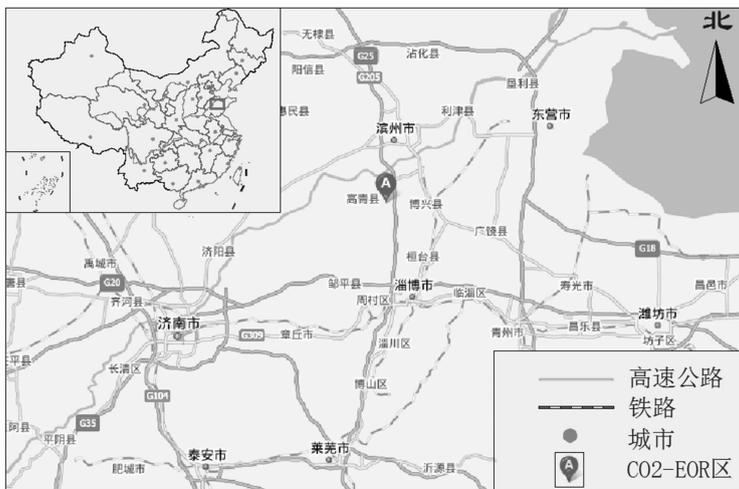


图1 研究区域地理位置

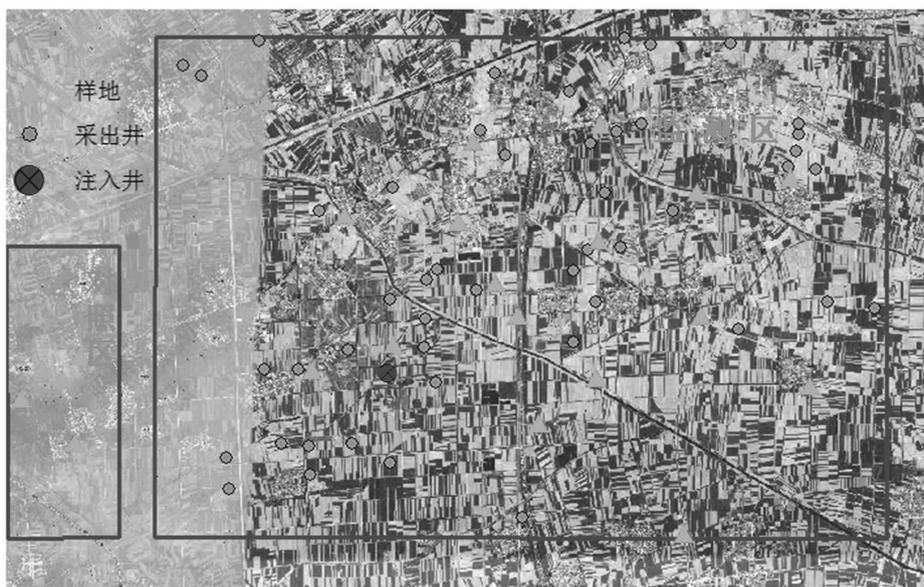


图2 对比区域示意

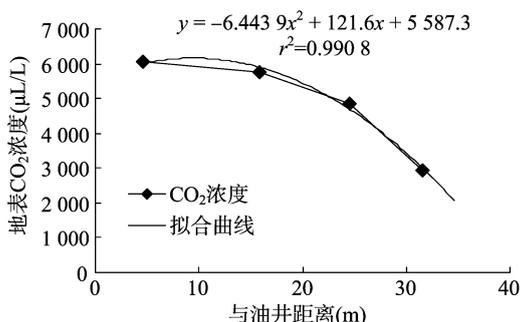


图3 油井附近地表CO<sub>2</sub>浓度变化

比较明显<sup>[12-13]</sup>。株高是一项可反映植被形态、健康状况植被生理指标,大气CO<sub>2</sub>浓度升高能显著增加作物株高,促使作物生长,提高产量<sup>[13]</sup>。采用冠层分析仪测量样方内玉米叶面积指数,软尺测量株高。

1.2.3 数据处理与计算 采用单因素方差分析方法,检验监测区和对照区、油井附近区和远离区的玉米叶面积指数、株高的差异显著性,检验量  $F$  值为:

$$F = \frac{SSA/(k-1)}{SSE/(n-1)}; \quad (1)$$

$$SSA = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2; \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2. \quad (3)$$

式中: $i$ 表示控制变量的第 $i$ 水平,即第 $i$ 总体; $k$ 表示总体数; $n$ 表示样本总数; $x_{ij}$ 表示第 $i$ 总体的第 $j$ 观测值; $\bar{x}_i$ 表示第 $i$ 总体的样本均值; $\bar{x}$ 表示样本总均值;SSA为组间平方和,SSE为组内平方和。

采用 Excel 2010 软件统计数据,用 SPSS 19.0 软件完成

采集玉米作物数据。连续2年监测,分别于2013、2014年8月20日实地调查采样。

叶面积指数、株高是对CO<sub>2</sub>浓度变化敏感的玉米作物长势指标<sup>[12-13]</sup>。叶面积指数是反映作物群体大小的较好的宏观动态指标,在一定的范围内,作物的产量随叶面积指数的增大而提高,CO<sub>2</sub>浓度增加使植被叶面积指数增加,且促进作用

单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 监测区和对照区内玉米长势的对比

2.1.1 描述统计量分析 从表1可知,2013年对照区玉米叶面积指数、株高均值稍大于监测区均值;2014年则相反,监测区玉米叶面积指数和株高均值略大于对照区均值;2年的综合统计结果则是对照区叶面积指数均值稍大于监测区均值,而监测区株高均值稍大于对照区均值。以对照区为基准,监测区内玉米长势指标均值的波动幅度在0.23%~5.39%。2年玉米长势指标中值的比较结果和均值比较结果相同。可见,对照区和监测区的玉米长势不存在明显差异。

表1 监测区和对照区玉米长势指标

对比区域	统计量	2013年		2014年		2013—2014年	
		叶面积指数	株高(cm)	叶面积指数	株高(cm)	叶面积指数	株高(cm)
对照区	均值	2.69	211.67	1.71	225.00	2.41	215.00
	标准差	0.66	19.41	0.74	7.07	0.78	17.73
	中值	2.69	215.00	1.71	225.00	2.32	220.00
	最小值	1.90	180.00	1.19	220.00	1.19	180.00
	最大值	3.67	230.00	2.23	230.00	3.67	230.00
监测区	均值	2.14	202.82	2.56	238.75	2.28	215.50
	标准差	0.80	16.04	0.98	25.77	0.87	26.25
	中值	2.10	200.00	2.43	230.00	2.17	210.00
	最小值	0.90	160.00	0.91	210.00	0.90	160.00
	最大值	4.16	230.00	3.96	295.00	4.16	295.00

2.1.2 单因素方差分析 由检验结果(表2)可以看出,叶面积指数的 $F$ 值为0.125,株高的 $F$ 值为0.000,对照区域内玉米的叶面积指数方差没有显著差异( $P>0.05$ ),株高方差也没有显著差异( $P>0.05$ )。进一步对2013年和2014年的玉米长势指标进行检验(表3)可知,2年间监测区和对照区内玉米叶面积指数、株高的方差也不存在显著差异。

方差检验结果表明,叶面积指数和株高作为对 $CO_2$ 浓度变化敏感的玉米作物长势指标,在 $CO_2$ -EOR区域和对照区域中都没有显著差异,表明玉米的生长没有受到显著影响。

表2 2013—2014年监测区和对照区玉米长势指标 $F$ 检验结果

指标	变异来源	平方和	$df$	均方	$F$ 值	$P$ 值
叶面积指数	组间	0.095	1	0.095	0.125	0.726
	组内	30.378	40	0.759	—	—
	总数	30.473	41	—	—	—
株高	组间	0.024	1	0.024	0	0.995
	组内	24 719.879	39	633.843	—	—
	总数	24 719.902	40	—	—	—

表3 不同年份监测区和对照区玉米长势指标检验结果

对比区域	2013年		2014年	
	叶面积指数	株高(cm)	叶面积指数	株高(cm)
监测区	2.14±0.08a	202.82±16.04a	2.56±0.98a	238.75±25.77a
对照区	2.69±0.66a	211.67±19.41a	1.71±0.74a	225.00±7.07a

注:同列数据后不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。表6同。

### 2.2 油井附近区与远离油井区内玉米长势对比

2.2.1 描述统计分析 由表4可以发现,2013年油井附近

区玉米叶面积指数、株高的均值稍大于远离油井区的均值;2014年玉米2项指标的均值也是油井附近区均值大于远离油井区均值。与远离油井区相比,油井附近区内玉米长势指标均值的波动幅度在0.32%~2.92%。中值的比较结果和均值的比较结果相同,即油井附近区叶面积指数、株高中值略大于远离油井区中值。

表4 油井附近区和远离油井区玉米长势

对比区域	统计量	2013年		2014年		2013—2014年	
		叶面积指数	株高(cm)	叶面积指数	株高(cm)	叶面积指数	株高(cm)
油井附近区	均值	2.15	204.00	2.70	240.00	2.40	216.00
	标准差	0.57	12.96	0.87	28.28	0.74	23.00
	中值	2.19	200.00	2.57	240.00	2.30	220.00
	最小值	1.17	190.00	1.55	220.00	1.17	190.00
	最大值	2.94	220.00	3.96	260.00	3.96	260.00
远离油井区	均值	2.14	201.65	2.67	238.50	2.33	215.30
	标准差	0.88	17.14	1.03	26.88	0.95	27.56
	中值	2.03	200.00	2.65	230.00	2.17	210.00
	最小值	0.90	160.00	0.91	210.00	0.90	160.00
	最大值	4.16	230.00	3.96	295.00	4.16	295.00

2.2.2 单因素方差分析 从表5可知,叶面积指数的 $F$ 值为0.038,株高的 $F$ 值为1.144,对应的 $P$ 值分别是0.846和0.292,均大于0.05的显著性水平,表明没有显著差异。同样地,分别对2013、2014年对比区域内玉米叶面积指数和株高进行 $F$ 检验,结果如表6所示。由表6可以看出,在油井附近区和远离油井区内,玉米2项长势指标没有显著差异。

综上所述,尽管表4的统计结果显示,油井附近的玉米叶面积指数和株高的均值稍大于远离油井区的均值,但是表5和表6的检验结果表明这种差异并不显著( $P>0.05$ ),可见靠近油井的玉米作物长势比远离油井的玉米长势稍好,但不存在显著差异。

表5 2013—2014年油井附近区和远离油井区玉米长势指标 $F$ 检验结果

指标	变异来源	平方和	$df$	均方	$F$ 值	$P$ 值
叶面积指数	组间	0.032	1	0.032	0.038	0.846
	组内	29.822	36	0.828	—	—
	总数	29.854	37	—	—	—
株高	组间	6 027.993	1	6 027.993	1.144	0.292
	组内	184 363.250	35	5 267.521	—	—
	总数	190 391.243	36	—	—	—

表6 不同年份油井附近区和远离油井区玉米长势指标检验结果

对比区域	2013年		2014年	
	叶面积指数	株高(cm)	叶面积指数	株高(cm)
油井附近区	2.15±0.57a	204.00±12.96a	2.70±0.87a	240.00±28.28a
远离油井区	2.14±0.88a	201.65±17.14a	2.67±1.03a	238.50±26.88a

## 3 讨论

现有研究表明,植被短期暴露于高浓度大气 $CO_2$ 条件下,对其生长具有肥效作用,长期暴露情景下,植被生理、形态特征和基因均发生适应性变化<sup>[10,14-15]</sup>。 $CO_2$ 浓度升高对农作物的影响作用主要表现在促进植物光合作用、增加其生

物量累积,显著提高 C<sub>3</sub> 作物产量,但对玉米等 C<sub>4</sub> 作物产量的影响很小<sup>[6]</sup>。CO<sub>2</sub> 驱油过程中,从油井逃逸出来的 CO<sub>2</sub> 导致油井附近地表 CO<sub>2</sub> 浓度增加,对农作物产量稍有促进作用,且影响范围与风向有关<sup>[16]</sup>。据研究区内 CO<sub>2</sub> 浓度监测,距离油井越近,近地表的 CO<sub>2</sub> 浓度越高,最大可达 6 000 μL/L,但随着距离的增加,地表 CO<sub>2</sub> 浓度迅速减小直至恢复一般水平(图 3)。从表 4 可以发现,油井附近区内玉米的叶面积指数和株高均值都比远离油井区的均值稍高,而且连续 2 年监测的结果均相同,这可能就是因为油井抽采时 CO<sub>2</sub> 逸散出来,增高了油井附近的地表 CO<sub>2</sub> 浓度,促进了这些区域内的玉米生长,但是表 5 和表 6 结果显示这种间歇性的逸散对农作物长势促进作用不大,不存在显著差异。

地质封存的 CO<sub>2</sub> 泄漏路径主要有火山等剧烈地质活动、构造断层或破碎带、高渗透性的渗流带、井口等<sup>[10,17-19]</sup>。研究区内可能存在的泄漏途径有 2 种:一是 CO<sub>2</sub> 在驱油过程中随着石油到达井口从而逃逸。从油井附近的 CO<sub>2</sub> 浓度监测结果来看,抽油的同时确实存在 CO<sub>2</sub> 的逸散情况,但是逸散范围小,并对作物生长有轻微的促进作用。另一种途径是从地质断层泄漏至地表。但本研究区内没有发现此类泄漏,原因可能是,该区域油藏深度达 900~1 500 m,上面盖层厚且完整性好,而且 CO<sub>2</sub> 从 2009 年开始注入,注入量仅 4 万 t/年,注入量也不大。从监测区和对照区玉米长势的比较结果可知,CO<sub>2</sub>-EOR 区域玉米长势没有显著变化,这说明示范区实施 CO<sub>2</sub>-EOR 工程对农作物生长没有威胁。

本研究是在连续注入 5 年后开展的监测,且连续监测了 2 年。统计分析表明,示范工程区域内农作物玉米没有受到影响,不过本研究的结论是建立在几个主要生理指标以及实地抽样调查的数据的基础上的,因此,只能表明在本研究区农作物玉米种植区内开展 CO<sub>2</sub>-EOR 工程是安全的。不过,这一结论在一定程度上消除了人们对 CO<sub>2</sub>-EOR 工程实施对地表农作物生产的担忧。

#### 4 结论

本试验以 CO<sub>2</sub>-EOR 示范区域玉米作物为对象,以叶面积指数、株高为指标进行研究,对比分析了监测区和对照区、油井附近区和远离油井区两组区域的玉米长势情况。结果表明,和对照区相比,监测区内玉米指标均值波动为 0.23%~5.39%,但方差分析表明玉米长势没有显著差异;油井附近的玉米长势总体优于其他区域,指标均值的波动幅度在 0.33%~3.00%,但是 F 检验结果发现也没有显著差异;分析其原因,CO<sub>2</sub>-EOR 过程中从抽油井中携带出来的 CO<sub>2</sub> 轻微提高了油井附近地表的 CO<sub>2</sub> 大气浓度,产生了施肥效应。这一结果显示,该 CO<sub>2</sub>-EOR 示范区玉米作物没有受到 CO<sub>2</sub> 溢出的负面影响,反而在一定程度上促进了农作物的生长。

由于受到研究区本身条件、监测指标、调查方法等限制,只能证明本研究区内开展 CO<sub>2</sub>-EOR 工程是安全的,在一定程度上消除了人们对 CO<sub>2</sub> 地质封存的担忧。

致谢:感谢项目组杨永均、刘莘、徐雅晴、黄安平、郝绍金、任雪峰等对资料的收集和整理,为本研究提供了大量分析数据,感谢油田公司和工作人员对我们调研过程中提供的帮助。

#### 参考文献:

- [1]张亮,王舒,张莉,等.胜利油田老区 CO<sub>2</sub> 提高原油采收率及其地质埋存潜力评估[J].石油勘探与开发,2009,36(6):737-742.
- [2]刘瑜.二氧化碳地下封存与强化采油利用基础研究[D].大连:大连理工大学,2011.
- [3]江怀友,沈平平,卢颖,等.CO<sub>2</sub> 提高世界油气资源采收率现状研究[J].特种油气藏,2010,17(2):5-10.
- [4]聂莉娟,马俊杰,赵雪峰,等.模拟 CCS 技术 CO<sub>2</sub> 泄漏对 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 作物土壤化学性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):200-205.
- [5]张森琦,刁玉杰,程旭学,等.二氧化碳地质储存逃逸通道及环境监测研究[J].冰川冻土,2010(6):1251-1261.
- [6]Kimball B A,朱建国,程磊,等.开放系统中农作物对空气 CO<sub>2</sub> 浓度增加的响应[J].应用生态学报,2002,13(10):1323-1338.
- [7]龚伟,宫渊波,胡庭兴,等.CO<sub>2</sub> 浓度升高对湿地松针叶蒸腾特性和水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2005,19(5):178-182.
- [8]李中阳,樊向阳,宋正国,等.CO<sub>2</sub> 浓度升高对不同品种水稻 Cu、Cd 吸收及根际土 Cu、Cd 形态的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):78-82.
- [9]郭建平,高素华.植物对高 CO<sub>2</sub> 和土壤干旱的响应趋势及对策[J].水土保持学报,2004,18(2):170-173.
- [10]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[J].生态与农村环境学报,2013,29(2):137-145.
- [11]聂莉娟,马俊杰,赵雪峰,等.模拟 CCS 技术 CO<sub>2</sub> 泄漏对 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 作物土壤化学性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):200-205.
- [12]袁东敏,郭建平.CO<sub>2</sub> 浓度增加对东北玉米生长影响的数值模拟[J].自然资源学报,2010,25(5):822-829.
- [13]王修兰,徐师华.CO<sub>2</sub> 浓度增加对 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 作物生育和产量影响的实验研究[J].中国农业科学,1998,31(1):55-61.
- [14]Anderson T H,Heinemeyer O,Weigel H J.Changes in the fungal-to-bacterial respiratory ratio and microbial biomass in agriculturally managed soils under free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)—a six-year survey of a field study[J].Soil Biology and Biochemistry,2011,43(5):895-904.
- [15]Nakamura I,Onoda Y,Matsushima N,et al. Phenotypic and genetic differences in a perennial herb across a natural gradient of CO<sub>2</sub> concentration[J].Oecologia,2011,165(3):809-818.
- [16]Xu Y Q,Zhang S L,Hou H P,et al. Influence of CO<sub>2</sub> leakage from oil-producing wells on crop growth based on improved CASA model[J].International Journal of Remote Sensing,2016,37(2):290-308.
- [17]Hill P M. Possible asphyxiation from Carbon dioxide of a cross-country skier in eastern California: a deadly volcanic hazard[J].Wilderness & Environmental Medicine,2000,11(3):192-195.
- [18]Giammanco S,Gurrieri S,Valenza M. Fault-controlled soil CO<sub>2</sub> degassing and shallow magma bodies: Summit and lower East Rift of Kilauea Volcano (Hawaii), 1997 [J]. Pure and Applied Geophysics,2006,163(4):853-867.
- [19]吴莉,马俊杰.浅议 CO<sub>2</sub> 地质封存的潜在风险[J].环境科学导刊,2012,31(6):89-93.