准噶尔盆地南缘独山子泥火山温室气体排放通量

马向贤^①, 郑国东^{①*}, 郭正府^②, ETIOPE Giuseppe^{①③}, FORTIN Danielle^{①④}, 佐野有司^{①⑤}

① 甘肃省油气资源研究重点实验室, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 兰州 730000;

② 中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

③ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Rome 00143, Italy;

④ Department of Earth Sciences, The University of Ottawa, Ottawa K1N 6N5, Canada;

⑤ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa 131-0044, Japan

* 联系人, E-mail: gdzhhj@mail.iggcas.ac.cn

2014-06-09 收稿, 2014-07-17 接受, 2014-10-08 网络版发表

国家自然科学基金(41273112)、中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB3-03)、中国科学院外国专家特聘研究员计划(2010T2Z03, 2011T1Z36)和甘肃省重点实验室专项(1309RTSA041)资助

摘要 泥火山是深部构造作用和地下流体上侵活动在地表的直接表现, 向大气圈排放大量以甲烷为主的温室气体, 然而对其温室气体排放通量的研究报道却较少. 我国新疆独山子泥火山是典型的、且非常活跃的泥火山, 正在排放各种温室气体. 利用密闭气室连接甲烷探测器方法对排放气体进行原位测量, 结合泥火山排放气体的组成特征, 估算了研究区泥火山所排放的温室气体通量. 结果表明, 新疆独山子 DSZ-01 和 DSZ-03 等两处泥火山通过宏观渗漏每年向大气排放约 161 kg 的温室气体, DSZ-01 泥火山喷口周围 314 m², DSZ-02 泥火山喷口周围 8400 m² 和 DSZ-03 泥火山喷口周围 706 m² 等 3 个区域通过微观渗漏每年向大气排放约 16.6 t 的温室气体.

关键词

泥火山
温室气体
碳排放
独山子
准噶尔盆地

甲烷被认为是仅次于二氧化碳的温室气体, 并且其单位质量造成的大气温室效应至少是二氧化碳的 21~22 倍^[1], 甲烷对全球气候的影响显得尤其重要^[2]. 泥火山是最重要的甲烷自然排放源之一, 是地层深部以气体、水和泥砂等为主的地质流体向地表的垂向泄漏喷溢作用在地表形成的地质体, 喷溢活动酷似火山, 而其地下部分通常具有流体向上逸散运移的通道, 地表以上构成部分的外貌往往形似火山锥, 喷逸出的流体包括气、水和泥, 有时候还会有原油. 与地下油气藏有关的泥火山普遍蕴藏着大量的水和烃类等气体, 并具有很高的压力, 沿着裂隙上涌喷溢出地表, 经常伴随着喷气(也包含水蒸气)、喷泥, 有时候可见喷火(甲烷等气体在高温下自燃)^[3,4]. 实际上, 泥火山不仅是典型的油气苗, 具有实际的油气资源勘探意义, 而且泥火山也是地质来源碳排放的一个重要类型, 备受科学家的密切关注, 目前已经成

为国际环境科学研究的一个热点问题^[5]. 近年来, 意大利、罗马尼亚、阿塞拜疆、日本和中国台湾等地的泥火山温室气体排放已经得到了较为系统的调查研究, 例如, Etiope 和 Klusman^[6]利用密闭气室法率先对意大利南部泥火山的土壤气微观渗漏通量进行了原位测量, 结果显示, 该泥火山 1.5 km² 范围内 CH₄ 微观渗漏排放通量高达 400 t/a. 2004 年 Etiope 等人^[7]再次利用密闭气室法测得罗马尼亚东部泥火山的宏观排放量为 28 t/a, 土壤微观渗漏通量为 10²~10⁵ mg/(m² d), 并综合计算得出该泥火山 2.3 km² 范围内的 CH₄ 排放总量为 1.2 × 10³ t/a. 之后他们还测量了日本中部新潟盆地的 Murono 和 Kamou 两处泥火山的 CH₄ 排放通量分别为 20 和 3.7 t/a, CO₂ 排放通量分别为 3.6 和 0.4 t/a^[8]. 阿塞拜疆 Dshgil 泥火山 0.6 km² 内每年可释放 CH₄ 727 t^[9]. Yang 等人^[3]对台湾南部中崙濁水潭地区的泥火山温室气体排放通量进行了原位测量,

引用格式: 马向贤, 郑国东, 郭正府, 等. 准噶尔盆地南缘独山子泥火山温室气体排放通量. 科学通报, 2014, 59: 3190–3196

Ma X X, Zheng G D, Guo Z F, et al. Estimation of greenhouse gas flux from mud volcanoes in the Dushanzi area, southern Junggar Basin of Northwest China (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 3190–3196, doi: 10.1360/N972014-00361

测得该泥火山 CH_4 宏观排放通量为 1.4 t/a, CO_2 宏观排放通量为 28 t/a. 通过已有的数据初步推算全球泥火山的甲烷排放通量介于 $6 \times 10^6 \sim 12.6 \times 10^6$ t/a^[10,11], 根据泥火山气体组分判断, CO_2 排放通量约为 CH_4 排放量的 1/4~1/10. 这些工作也推动了政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第四次报告(2007 年)中把地质来源的碳排放单独列项, 并更正了以前低估的排放通量数据^[5]. 我国大陆分布着一些泥火山, 也正在向大气释放各种温室气体. 戴金星等人^[12]在论述准噶尔盆地南缘泥火山天然气地球化学特征时, 通过计时收集定量体积的气体, 估算出准噶尔盆地南缘 9 处泥火山每年喷发约 1125 m^3 的气体, 而其他相关的科学考察则主要侧重在油气资源调查意义和地震地质研究等方面^[13,14], 目前还缺乏对我国泥火山温室气体(甲烷和二氧化碳)排放通量的专门调查研究. 本文将主要报道基于野外地质调查和原位测量, 结合实验室测试分析, 对新疆准噶尔盆地南缘独山子泥火山温室气体排放通量初步的估算结果.

1 地质背景与泥火山特征

独山子泥火山位于新疆维吾尔自治区的北部, 东经 $84^\circ 50'$, 北纬 $44^\circ 18'$, 海拔约 950 m, 按照区域构造划分, 该地区属于准噶尔盆地南缘, 与北天山山脉

相连. 准噶尔盆地地质背景复杂, 构造活动强烈, 南缘发育有大量的泥火山, 独山子泥火山是其中之一^[15,16]. 准噶尔盆地南缘的沉积充填始于二叠纪, 三叠系-第四系陆相沉积层序发育较为完整, 累计厚度 16 km. 大地热流值较低(35 mW/m^2), 平均地温梯度 18.5°C/km ^[17,18]. 位于北天山山前拗陷带的独山子背斜为一封闭的储油气构造, 在背斜轴部分布着数条正断层和张性破裂带, 构成该油气构造的古近系为主要含油气层, 新近系含泥、砂质地层为封闭层, 油气构造中具有异常高的层间压力和背斜核部发育的张性破裂是独山子泥火山活动的主要地质条件^[19](图 1). 独山子泥火山喷口沉积物和孔隙水的地球化学研究结果显示其仍在活动^[20].

独山子泥火山现有 3 处明显活动的喷口, 其中最大的泥火山喷口形成于 1995 年, 现为不规则的椭圆形凹坑, 中间积水, 成为一个泥火山湖, 其长轴达 120 m 左右. 另外两个泥火山喷口相对较小, 一个半径约 1.2 m, 另一个半径约 0.2 m, 且后者形成约 2 m 多高的泥锥(图 2). 现场测定 3 处泥火山泥(水)浆的温度在 $14 \sim 19.5^\circ\text{C}$ 之间, 呈弱碱性(pH 在 8.0~9.0 之间), 盐度高(最高的达 16.2‰), 导电性在 $5 \sim 25 \text{ mS/cm}$ 之间, 氧化还原电位较低(小于 -48 mV), 显示还原环境(表 1). 基本地球化学参数的测量是用德国 SCHOTT

图 1 研究区地理位置图

(a) 新疆与准噶尔盆地位置和边界; (b) 独山子泥火山的位置分布图(据文献[12]修改)

图 2 准噶尔盆地南缘独山子泥火山喷口照片

(a) DSZ-01; (b) DSZ-02; (c) DSZ-03

表 1 泥火山位置、喷口大小及其泥(水)浆的基本地球化学参数

参数	DSZ-01	DSZ-02	DSZ-03
位置	84°50.355'N 44°18.234'E	84°50.843'N 44°18.315'E	84°50.781'N 44°18.312'E
海拔(m)	949	942	939
喷口大小(m)	1.1(直径)	120×35	0.2×0.2
pH	7.92	9.03	7.90
Eh(mV)	-49	-119	-48
温度 T(℃)	19.5	18.7	14.5
导电率(mS/cm)	18.7	5.32	24.4
盐度(‰)	11.2	2.8	16.2
溶氧度(ppm)	0.23	0.10	0.42

公司制造的 handylab multi 12 多功能参数仪在现场进行的, 各参数测量误差如下: pH ± 0.01, Eh ± 1 mV, T ± 0.1℃, 盐度 ± 0.2‰, 导电率和溶氧度 ± 0.5%.

2 泥火山甲烷测试方法与样品采集

2.1 甲烷排放通量测试方法

泥火山系统的气体排放主要有两种方式: 一种是宏观渗漏, 主要指可以通过肉眼观测到的排气现象, 如气泡, 喷发(火)等; 另一种是微观渗漏, 指肉眼不能直接观察到的排气现象, 如土壤排气等, 但一般有效排气量应大于 1 mg/(m² d)^[6]. 宏观渗漏排放的甲烷通量一般采用统计和测量泥火山喷发气泡的频率和大小, 结合气体组分计算; 也有直接应用排空法对喷口渗漏通量进行测定^[12,21]. 但一些活动非常强烈的喷气孔的排放通量, 例如台湾大屯火山区小油坑的主喷气孔^[22], 目前仍然缺乏有效的测量方法. 微观渗漏排放的甲烷通常采用密闭箱式法进行测量, 原位测量所用的集气箱是用 5 mm 厚的灰色不透明的聚四氟乙烯制成的圆柱体, 其内径为 50 cm, 高为 30 cm, 箱体顶部装有内置电动小风扇, 分别设置进气口和出气口. 电动小风扇保证了箱体内气体的均匀混合, 以保证测量结果的准确性, 进气口和出气口用硅胶管分别与甲烷检测仪的进气端和出气端相连, 连接进气口的硅胶管与检测器之间附设长 5 cm, 半径 1 cm 的圆柱形塑料盒, 内装硅胶, 其主要目的是尽可能避免潮湿地区水蒸气对甲烷探测的影响. 测量时, 选好测量点, 将箱体压入地表 3~5 cm 以下(坚硬地表用铲子挖开, 但对应密闭箱的部分应尽量保持原样不动), 然后用泥土封住通量箱外边缘并压实.

安装好箱体后, 将箱体和甲烷检测器相连, 用秒表开始计数, 并读取各时间点上甲烷检测器上的排放量计数, 每个测量点至少要有 20 个数据点. 将相隔 2 个读数时间点的差值与相隔两个甲烷排放量的差值拟合计算, 结合箱体的体积参数, 求出每个测点平均每天每平方米释放的甲烷通量. 本研究使用的甲烷探测器是意大利制造的 METREX 2 型便携式甲烷检测仪, 甲烷检测限为 5 ppm(1 ppm=1×10⁻⁶ g/g, 下同).

2.2 气体采集方法及其组分

气体样品的采集是用漏斗集气法, 将玻璃漏斗置于泥火山气体喷口之上(气泡), 液面以下, 用三通阀将漏斗、手动抽气泵和采气瓶连接起来, 形成一个封闭系统. 首先, 利用抽气泵将连接的橡胶管抽成真空, 然后将漏斗内的气体导入橡胶管, 洗涤橡胶管, 至少重复 3 次, 以便尽量排出连接橡胶管内的空气. 然后打开采气瓶阀门, 同理洗涤采气瓶, 至少重复 3 次. 最后将连接漏斗一端的阀门关闭, 将橡胶管和采样瓶抽成真空, 之后打开连接漏斗端的阀门和采样瓶的阀门, 使气体进入采气瓶, 关闭进气阀门, 获得气体样品.

每个泥火山喷口采集 3 个平行气体样品, 在 MAT271 质谱仪和 A9860 色谱仪上联合测定气体组分, 求出平均值(表 2). 本次所测气体组分结果同文献^[12]报道基本相近.

表 2 泥火山喷口气泡大小、频率与喷出气体组成特征^{a)}

样品编号	DSZ-01	DSZ-02	DSZ-03
气泡直径(cm)	6	—	6
频率 f(1/min)	1.4	—	7.3
气体组分(%)			
C ₁	90.1	91.0	77.8
C ₂	4.65	4.84	4.54
C ₃	0.030	0.190	0.460
iC ₄	0.0028	0.0240	0.1200
nC ₄	0.0010	0.0035	0.0320
iC ₅	0.0085	0.0080	0.0640
nC ₅	0.0025	0.0064	0.0016
C ₆	0.0510	0.0370	0.0324
CO ₂	3.22	0.60	2.62
N ₂	1.92	3.25	14.20
Ar	0.0170	0.0510	0.1300
CO ₂ /CH ₄ (vol)	0.0357	0.00659	0.0337

a) “—”代表未测量, 气泡直径和频率是 3 次观测的平均值

3 独山子区泥火山甲烷排放通量计算

3.1 宏观渗漏排放通量

通过对 3 处泥火山喷口的气泡尺寸和释放频率统计(表 2), 通过下式计算宏观排放通量:

$$F_{\text{macro}} = V \times C_{\text{CH}_4} \times M / 22.4 \times f \times 60 \times 24 \times 365 / 1000000, \quad (1)$$

式中 F_{macro} 为各冒泡处 CH_4 宏观排放通量, kg/a ; V 为各冒泡处的气体体积, mL ; C_{CH_4} 为各冒泡处气体的 CH_4 浓度, $\text{vol}\%$; 22.4 为标准状态下的气体摩尔体积, L/mol ; M 为 CH_4 的摩尔质量, g/mol ; f 气泡释放的频率, 实测的频率列于表 2 中。因此

$$F_{\text{macro-CH}_4}^{\text{DSZ-01}} = 26.8 \text{ kg/a}, \quad F_{\text{macro-CH}_4}^{\text{DSZ-03}} = 120.5 \text{ kg/a}.$$

DSZ-02 现是一个泥火山湖, 由于目前开展统计工作难度非常大, 本次未做研究。

二氧化碳的排放量可根据气体组分中 CO_2/CH_4 的体积比计算, 因此 DSZ-01 和 DSZ-03 两处泥火山

二氧化碳的宏观渗漏通量为

$$F_{\text{macro-CO}_2}^{\text{DSZ-01}} = 2.6 \text{ kg/a}, \quad F_{\text{macro-CO}_2}^{\text{DSZ-03}} = 11.1 \text{ kg/a}.$$

综上所述, DSZ-01 泥火山通过宏观渗漏每年排放温室气体 29.4 kg , DSZ-03 泥火山通过宏观渗漏每年排放温室气体 131.6 kg 。

3.2 微观渗漏排放通量

由原位测量所得数据, 对每个测点进行甲烷渗漏总量进行计算, CH_4 微观渗漏排放通量计算公式如下

$$F_{\text{micro}} = \frac{(V_c / A_c) \times (C_2 - C_1) / (t_2 - t_1) \times A_s}{22.4} \times M \times 3600 \times 24, \quad (2)$$

式中 F_{micro} 为各测量点 CH_4 微观渗漏通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \text{ d})$; V_c 为箱体体积, L ; A_c 为箱体底面积, m^2 ; A_s 为测量点的面积, m^2 ; C_1, C_2 分别是时间 t_1, t_2 时箱体内的 CH_4 浓度, $\text{vol}\%$ 。

DSZ-01 泥火山区共设置了 16 个测点(图 3(a)),

图 3 各处泥火山温室气体排放测点布置图

(a) DSZ-01; (b) DSZ-02; (c) DSZ-03

在离喷口周围 10 m 处, 甲烷探测器在短时间内(15 min)未检测出甲烷异常(表 3), 因此 DSZ-01 泥火山在距喷口 10 m 的区域内(314 m²)内平均每天每平方米释放 7597.6 mg 的甲烷, 因此 DSZ-01 泥火山区通过微观渗漏释放的甲烷通量为

表 3 泥火山各测量点甲烷释放通量
(2011 年 9 月 25~26 日实测)^{a)}

序号	释放通量(mg/(m ² d))	序号	释放通量(mg/(m ² d))
DSZ-01		03	17390
01	19460	04	55317
02	18170	05	n.d.
03	28640	06	n.d.
04	26370	07	56967
05	12050	08	22846
06	5056	09	4755
07	n.d.	10	28003
08	n.d.	11	17865
09	1450	12	27620
10	n.d.	13	n.d.
11	1506	14	11076
12	n.d.	15	n.d.
13	n.d.	16	14265
14	n.d.	17	13594
15	n.d.	18	20587
16	2860	19	27044
平均	7597.6	20	12531
DSZ-02		21	3244
01	n.d.	22	n.d.
02	n.d.	23	14961
03	n.d.	24	n.d.
04	40280	25	n.d.
05	1538	26	n.d.
06	n.d.	27	8378
07	4028	28	2010
08	n.d.	29	1675
09	n.d.	30	n.d.
10	9113	31	21290
11	n.d.	32	25318
12	n.d.	33	10573
13	8861	34	21930
14	n.d.	35	7048
15	6050	36	24167
16	6042	37	17262
17	9700	38	5102
18	n.d.	39	4430
19	8056	40	8861
20	5370	41	6766
21	n.d.	42	n.d.
22	n.d.	43	n.d.
23	n.d.	44	n.d.
24	4840	45	n.d.
25	n.d.	46	3927
26	n.d.	47	4795
平均	3995.3	48	2702
DSZ-03		49	n.d.
01	7750	50	n.d.
02	8279	平均	10806.6

a) n.d. 未检测出。天气条件: 晴, 温度 22℃, 微风

$$F_{\text{micro-CH}_4}^{\text{DSZ-01}} = F_{\text{average}}^{\text{DSZ-01}} \times A \times 365 \\ = 7597.6 \times 3.14 \times (10)^2 \times 365 \times 10^{-9} = 0.9 \text{ t/a.}$$

DSZ-01 泥火山区释放的二氧化碳通量按照气体组分 CO₂/CH₄ 的体积比, 可以计算得出:

$$F_{\text{micro-CO}_2}^{\text{DSZ-01}} = 0.1 \text{ t/a.}$$

因此 DSZ-01 泥火山喷口周边 314 m² 区域内通过微观渗漏每年向大气释放温室气体 1.0 t.

DSZ-02 泥火山区由于在湖内无法布置测点, 只能沿湖周边布置, 共有 26 个测点(图 3(b)), 平均每个测点每天每平方米释放 3995.3 mg 的甲烷(表 3), 这个平均值应代表该泥火山湖和周围与泥火山湖面大小相同区域的甲烷排放量, 因此 DSZ-02 泥火山区通过微观渗漏释放的甲烷通量为

$$F_{\text{micro-CH}_4}^{\text{DSZ-02}} = F_{\text{average}}^{\text{DSZ-02}} \times A \times 365 \\ = 3995.3 \times 120 \times 35 \times 2 \times 365 \times 10^{-9} = 12.3 \text{ t/a.}$$

DSZ-02 泥火山区释放的二氧化碳通量按照气体组分 CO₂/CH₄ 的体积比, 可以计算得出:

$$F_{\text{micro-CO}_2}^{\text{DSZ-02}} = 0.2 \text{ t/a.}$$

因此 DSZ-02 泥火山喷口周边 8400 m² 的区域通过微观渗漏每年向大气释放温室气体 12.5 t.

DSZ-03 泥火山沿喷口周边共布置了 50 个测点(图 3(c)), 平均每个测点每天每平方米释放 10806.6 mg 的甲烷, 在第 15, 24, 50 等距离喷口约为 15 m 的测点处甲烷探测器在短时间内(15 min)内未检测到甲烷的信号, 因此 DSZ-03 泥火山喷口周边半径为 15 m 的区域内, 通过微观渗漏释放的甲烷通量为

$$F_{\text{micro-CH}_4}^{\text{DSZ-03}} = F_{\text{average}}^{\text{DSZ-03}} \times A \times 365 \\ = 10806.6 \times 3.14 \times (15)^2 \times 365 \times 10^{-9} = 2.8 \text{ t/a.}$$

DSZ-03 泥火山区释放的二氧化碳通量按照气体组分 CO₂/CH₄ 的体积比计算得出:

$$F_{\text{micro-CO}_2}^{\text{DSZ-03}} = 0.3 \text{ t/a.}$$

因此 DSZ-03 泥火山喷口周围 706 m² 的区域每年向大气释放温室气体 3.1 t.

通过对 DSZ-03 泥火山周边甲烷微观渗漏的详细测量, 发现甲烷释放通量随着离喷口距离的增加递减的非常快, 基本符合指数递减(图 4), 显示该处泥火山可能存在主要的喷气通道, 而且相对独立.

本次泥火山温室气体排放测量主要参考和借鉴意大利 Etiope 等人^[6]的研究方法. 宏观渗漏量测定的

图4 DSZ-03 泥火山甲烷释放通量与距喷口远近的关系

准确性主要和气泡大小和释放频率密切相关, 本文报道的气泡大小和释放频率是1天内3次观察和测量的平均值. DSZ-01 泥火山宏观渗漏的温室气体的量为 29.4 kg/a, 比戴金星等人^[12]2012 年报道的泥火山喷口总气体排量(约 17.2 kg/a)要大, 可能主要因为2012年该喷口有两处冒泡, 17.2 kg/a 的气体排放量主要是针对其中相对活跃一处的计算量. DSZ-03 泥火山宏观渗漏的温室气体量为 131.6 kg/a, 这和戴金星等人^[12]2012年测量的值(约 141.2 kg/a 的总气体)基本相当. DSZ-02 是一个巨大的泥火山湖, 从湖边可以看到湖内边缘存在很多小气泡和麻坑, 从目测角度看该处泥火山喷口宏观渗漏量要比 DSZ-01 和 DSZ-03 两处释放的温室气体更多, 但由于喷气强烈, 目前要进行封闭测量难度很大, 其准确测定有待后续工作开展. DSZ-01, DSZ-02 和 DSZ-03 等3处泥火山的微观渗漏通量和国际上泥火山土壤微观渗漏

的温室气体排放通量相比明显偏低, 这主要因为本次研究泥火山微观渗漏的面积相对较小之故, 如 Etiope 等人^[9]报道的排放通量较高的阿塞拜疆 Dshgil 泥火山 0.6 km² 范围内土壤微观渗漏的甲烷通量为 727 t, 而本次研究的独山子 3 处泥火山总面积约为 0.0094 km², 该面积与 Dshgil 泥火山测量范围相差近 64 倍, 如果将本次计算的甲烷排放通量扩大 64 倍, 即可达到 1062 t/a 的排放通量, 但图 4 显示了随着距喷口的距离增加, 其释放通量快速降低, 微观渗漏通量也将小于 1062 t/a, 但与国际上泥火山温室气体排放通量应处于同一个量级.

4 结论

新疆独山子泥火山排放气体中的甲烷成分占 78%~92%, 并向大气排放一定数量的温室气体, 其排放方式主要为微观渗漏, DSZ-01 和 DSZ-02 等两座泥火山通过宏观渗漏每年至少向大气排放 161.1 kg 甲烷. DSZ-01, DSZ-02 和 DSZ-03 等3处泥火山周围约 0.01 km² 面积内微观渗漏的贡献量约为 16.6 t/a. 通过对 DSZ-03 泥火山周边 700 余平方米区域甲烷微观渗漏的详细测量发现, 微观渗漏排放的甲烷通量与距离喷气口的远近呈指数关系, 衰减速度很快.

需要说明的是, 本文仅是对独山子泥火山碳排放通量的初步研究结果, 更精确的排放通量估算还需要对整个独山子泥火山进行更为详尽的原位测量和长时期监测. 实践证明, METREX 2 型便携式甲烷检测仪对我国泥火山微观渗漏的测量效果良好, 测量精度尚可, 便于推广使用.

致谢 两位评审专家的建设性意见对本文质量的提高起到重要作用. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心梁明亮博士和兰州大学张妮硕士在野外实测和样品采集方面提供了很多帮助.

参考文献

- 1 Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 2 Etiope G, Feyzullayev A, Baci C L. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin. Mar Pet Geol, 2009, 26: 333-344
- 3 Yang T F, Yeh G H, Fu C C, et al. Composition and exhalation flux of gases from mud volcanoes in Taiwan. Environ Geol, 2006, 46: 1001-1013
- 4 何家雄, 祝有海, 翁荣南, 等. 南海北部边缘盆地泥底辟及泥火山特征及其与油气运聚关系. 地球科学, 2010, 35: 75-86
- 5 马向贤, 郑国东, 梁收运, 等. 地质甲烷对大气甲烷源与汇的贡献. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31: 141-147
- 6 Etiope G, Klusman R W. Geologic emissions of methane to the atmosphere. Chemosphere, 2002, 49: 777-789

- 7 Etiope G, Nakada R, Tanaka K, et al. Gas seepage from Tokamachi mud volcanoes, onshore Niigata Basin (Japan): Origin, post-genetic alterations and CH₄-CO₂ fluxes. *Appl Geochem*, 2011, 26: 348–359
- 8 Etiope G, Baciuc C, Caracausi A, et al. Gas flux to the atmosphere from mud volcanoes in eastern Romania. *Terra Nova*, 2004, 16: 179–184
- 9 Etiope G, Feyzullayev A, Baciuc C L, et al. Methane emission from mud volcanoes in eastern Azerbaijan. *Geology*, 2004, 32: 465–468
- 10 Etiope G, Milkov A V, Derbyshire E. Did geologic emissions of methane play any role in Quaternary climate change. *Glob Plan Change*, 2008, 61: 79–88
- 11 Dimitrov L. Mud volcanoes-the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Sci Rev*, 2002, 59: 49–76
- 12 戴金星, 吴小奇, 倪云燕, 等. 准噶尔盆地南缘泥火山天然气的地球化学特征. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 178–190
- 13 杜建国, 周晓成, 陈志, 等. 北天山泥火山对 2012 年 6 月 30 日新源 M_s6.6 地震的响应. *地震学报*, 2013, 35: 876–887
- 14 高苑, 王永莉, 郑国东, 等. 新疆准噶尔盆地独山子泥火山天然气地球化学特征. *地球学报*, 2012, 33: 899–894
- 15 Fu B H, Zheng G D, Ninomiya Y, et al. Mapping hydrocarbon induced mineralogical alterations in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data. *Terra Nova*, 2007, 19: 225–231
- 16 Zheng G D, Fu B H, Takahashi Y, et al. Chemical speciation of redox sensitive elements during hydrocarbon leaching in the Junggar Basin, northwest China. *J Asian Earth Sci*, 2010, 39: 713–723
- 17 Qiu N S, Zhang Z H, Xu E S. Geothermal regime and Jurassic source rock maturity of the Junggar Basin, northwest China. *J Asian Earth Sci*, 2008, 31: 464–478
- 18 Nakada R, Takahashi Y, Tsunogai U, et al. A geochemical study on mud volcanoes in the Junggar Basin, China. *Appl Geochem*, 2011, 27: 1065–1176
- 19 王道, 李茂玮, 李猛, 等. 新疆独山子泥火山喷发的初步研究. *地震地质*, 1997, 19: 14–16
- 20 Li N, Huang H G, Chen D F. Fluid sources and chemical processes inferred from geochemistry of pore fluids and sediments of mud volcanoes in the southern margin of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwestern China. *Appl Geochem*, 2014, 46: 1–9
- 21 Di P, Feng D, Chen D F. *In-situ* and on-line measurement of gas flux at a hydrocarbon seep from the northern South China Sea. *Cont Shelf Res*, 2014, 81: 80–87
- 22 Yang T F. Report of advance in mud volcanoes research and gas emission *in-situ* measurement. Workshop on Earth Degassing. 2011

Estimation of greenhouse gas flux from mud volcanoes in the Dushanzi area, southern Junggar Basin of Northwest China

MA XiangXian¹, ZHENG GuoDong¹, GUO ZhengFu², ETIOPE Giuseppe^{1,3}, FORTIN Danielle^{1,4} & SANO Yuji^{1,5}

¹Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province / Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

²Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Rome 00143, Italy;

⁴Department of Earth Sciences, The University of Ottawa, Ottawa K1N 6N5, Canada;

⁵Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa 131-0044, Japan

Mud volcanoes are a direct manifestation of deep tectonic and subsurface fluid invasion activities near the earth surface. Such activity emits large amounts of greenhouse gases, predominantly methane, and is also responsible for an important part of the total geologic carbon flux to the atmosphere. However, there is little research on estimation of greenhouse gas flux from mud volcanoes in China. The mud volcanoes in the Dushanzi area of the Xinjiang Uygur Autonomous Region are typical and very active, emitting various types of greenhouse gases. We used a sealed chamber connected to a methane detector to measure the *in situ* gas emission rate and estimate flux. Based on well-known research methods, experience with greenhouse gas emissions from mud volcanoes abroad, and gas composition data, we estimated total flux of those gases emitted from the Dushanzi mud volcanoes. Greenhouse gas fluxes from macro-seeps in areas DSZ-01 and DSZ-03 exceeded 161 kg/a. Flux by micro-seepage in areas DSZ-01 (314 m²), DSZ-02 (8400 m²), and DSZ-03 (314 m²) was 16.6 t/a.

mud volcano, greenhouse gas, carbon emission, Dushanzi, Junggar Basin

doi: 10.1360/N972014-00361