

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2018.05.22

青藏高原冻土区湿地甲烷排放及同位素特征研究

张舜尧^{1,2,3}, 杨帆^{2,3}, 张富贵^{2,3}, 施泽明¹, 杨志斌^{2,3},
周亚龙^{2,3}, 王惠艳^{2,3}

(1. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;
3. 中国地质科学院 地球表层碳—汞地球化学循环重点实验室, 河北 廊坊 065000)

摘要: 青藏高原冻土区是我国最重要的湿地分布区之一, 其碳循环系统在陆地生态环境中具有重要的作用。为了系统地研究青藏高原冻土区湿地甲烷排放特征, 采用静态箱采气法, 通过对近地表游离气甲烷碳同位素含量进行现场测定; 结合吸附气烃类气相色谱分析, 利用已有的天然气气源判别图解, 对研究区甲烷气源成因进行判别。结果显示, 在青藏高原冻土区木里地区, 土壤甲烷排放放在春季最高, 以生物成因为主, 夏季为混合成因, 秋季较低, 且以热成因为主, 生物作用是影响该区甲烷排放的主要因素, 同时地下天然气水合物中的气体逸散作用也在一定程度上影响了研究区地表甲烷浓度。

关键词: 青藏高原; 甲烷排放; 甲烷碳同位素; 天然气水合物

中图分类号: P595; P618.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2018)05-1089-08

Research on the Methane Emission and Carbon Isotope of Permafrost Wetland in Qinghai-Tibet Plateau

ZHANG Shunyao^{1,2,3}, YANG Fan^{2,3}, ZHANG Fugui^{2,3}, SHI Zeming¹,
YANG Zhibin^{2,3}, ZHOU Yalong^{2,3}, WANG Huiyan^{2,3}

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;
2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000, China;
3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: As one of the most important wetland area component, carbon cycle in Qinghai-Tibet Plateau plays a critical role in the terrestrial ecosystem. For systematically studying the methane emission of permafrost wetland in Qinghai-Tibet Plateau, by using the chamber method, we made a field measurement on the methane carbon isotope. Furthermore, combining with the adsorbed gas chromatography result, we conducted the gas source discrimination. The results show that the soil methane emission is the highest and mainly on biogenic source in spring. In summer, methane of soil emission is mainly on mixed-genetic source. In autumn, the soil methane

收稿日期: 2018-03-05; 改回日期: 2018-07-12; 责任编辑: 戚开静。
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20179192); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项基金项目 (AS2015J02, AS2016Y01)。
作者简介: 张舜尧, 男, 工程师, 博士研究生, 1986 年出生, 地球化学专业, 主要从事勘查地球化学研究工作。
Email: zhangshunyao@igge.cn。
通信作者: 杨帆, 男, 高级工程师, 1983 年出生, 地球化学专业, 主要从事勘查地球化学研究工作。
Email: yangfan@igge.cn。
引用格式: 张舜尧, 杨帆, 张富贵, 等. 青藏高原冻土区湿地甲烷排放及同位素特征研究 [J]. 现代地质, 2018, 32(5): 1089-1096.
ZHANG Shunyao, YANG Fan, ZHANG Fugui, et al. Research on the Methane Emission and Carbon Isotope of Permafrost Wetland in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geoscience, 2018, 32(5): 1089-1096.

emission is the lowest and mainly on thermo genic gas. The biological action is the main influence factor of methane emission. Meanwhile, the gas escaped from the natural gas hydrate underground also influenced the atmospheric methane content to some extent.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; methane emission; methane carbon isotope; natural gas hydrate

0 引 言

湿地是陆地生态系统中最大的碳库, 储存了陆地 30% 以上的土壤有机碳^[1-5]。同时, 作为自然界最大的甲烷释放源, 湿地土壤的甲烷排放作用已经受到了广泛关注^[6-9]。大量研究显示, 湿地土壤甲烷排放主要集中在生长季节, 土壤温度的增加及水体的分布均会促进土壤甲烷排放, 同时还受动植物及人类活动等因素影响^[10-20]。湿地碳循环系统的变化对陆地生态系统、环境和气候条件能够产生巨大影响, 甚至灾难性破坏^[21]。

青藏高原冻土区是我国最重要的湿地分布区之一, 湿地面积达 13 万 km²^[22-25]。近年来的研究显示, 青藏高原湿地冻土区目前表现为碳汇作用, 这种碳汇作用是通过净生态系统碳交换通量 (Net Ecology Carbon Exchange) 监测^[26-28] 和土壤有机碳含量 (Soil Oganic Carbon) 检测得出的^[29-30]。但是最近公布的监测结果显示, 在青藏高原冻土区湿地, 大气本底甲烷的浓度上升趋势高于同期全球平均水平^[31-36], 而对于此种高含量甲烷的成因及气源条件, 目前尚缺乏系统性研究。

另一方面, 随着近年来陆域天然气水合物资源勘查工作的进行, 大量研究认为, 青藏高原冻土区湿地具备良好的天然气水合物形成条件^[37-47]。2008—2009 年, 中国地质调查局在祁连山木里地区进行天然气水合物科学钻探试验, 并在冻土层以下钻获天然气水合物样品, 这是世界上首次在低纬度冻土区发现天然气水合物^[48]。之后, 该区的多口钻井再次获取天然气水合物实物样品或相关异常显示, 充分证明了该区天然气水合物的存在^[49]。对取得的天然气水合物实物样品进行成分分析的结果显示, 气体成分以甲烷为主, 气源显示为热成因气^[50-51]。2014—2015 年, 中国地质调查局分别在开心岭和乌鲁地区进行了天然气水合物钻探试验, 并发现了气泡、井涌、自生矿物、低温异常等多种水合物存在的证据^[52-54]。祝有海等学者根据中国冻土区形成天然气水合物的气源条件、温压条件, 认为青藏高原湿地冻土

区广泛发育天然气水合物富集层, 并以微渗漏的方式逸散到地表, 形成地球化学异常^[55-63]。而这种地下天然气水合物中甲烷的逸散作用是地史时期全球变暖事件的重要诱因^[64-71]。

为了对青藏高原冻土区湿地甲烷排放进行成因及气源研究, 笔者所在项目组采用静态箱取气法, 对青藏高原木里地区近地表游离气进行甲烷碳同位素含量现场测定, 结合土壤吸附气相色谱分析, 利用已有天然气气源判别图解, 对该区地表土壤-大气交换甲烷进行气源判别, 为青藏高原冻土区湿地碳循环系统的研究提供新的地质证据及方法借鉴。

1 研究区概况

研究区地处祁连山南缘, 地理坐标为 E99°01′—E99°15′, N38°04′—N38°12′ (图 1), 行政区划上隶属青海省海西州天峻县木里镇管辖。该区位于中祁连区的大通河流域的上游南岸, 地貌上属于高海拔丘陵地区, 地形总体上呈西高东低、南高北低之势, 海拔 4 128 ~ 4 026 m, 相对高差 102 m。区内冻土发育, 厚度一般为 60 ~ 95 m, 冻土下界大致与年平均气温 -2.0 ~ -2.5 °C 等温线相当^[72]。由于受季节变化和气温的影响, 每年 4 月份冻土开始融化, 至 9 月份回冻, 最大融化深度小于 3 m^[57]。研究区属于高寒草地生态系统, 植被类型以天然高寒草甸草原为主^[73], 其单位面积产草量较高, 土壤有机碳主要分布在土壤表层^[74]。

研究区在大地构造上属于中祁连陆块西段木里坳陷^[75], 整体为一复式背向斜构造^[76-78]。矿区出露的地层主要包括中侏罗统江仓组 (J_{2j}) 和木里组 (J_{2m}), 他们均含多个可采煤层, 其中, 前者以黑色、灰色油页岩、泥岩为主, 夹灰色的粉砂岩、细砂岩、中粒岩; 后者以灰色、灰白色粉砂岩、细砂岩、中砂岩、(含砾)粗砂岩, 夹深灰色泥岩 (油页岩)。第四系在钻探区内广泛分布, 为冲积、洪积成因的腐殖土、砂、砾石, 坡积的角砾, 冰积的泥砂、冰层、漂砾等。

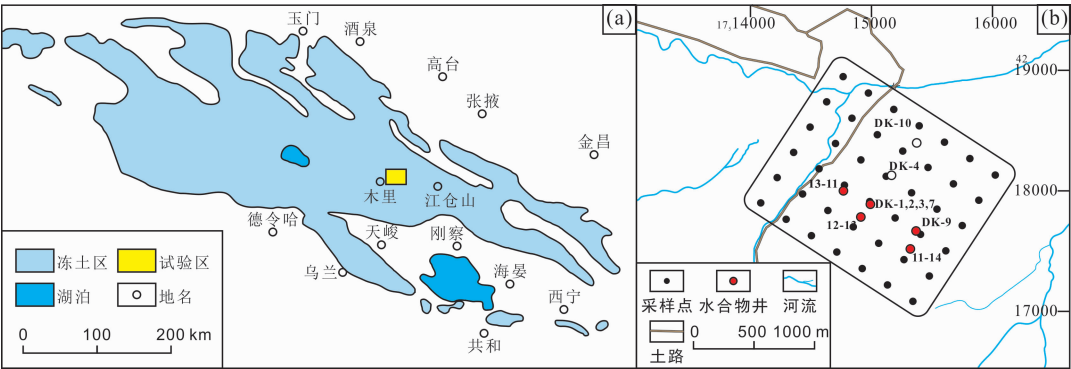


图 1 研究区地理位置及采样点位图(底图据文献[72])

Fig. 1 Location and sampling points of the Muli area

2 监测方法

监测围绕选择木里湿地三露天地区，网格化布置采样点，采样点间距 250 m，试验区面积约 2.6 km²，涵盖中国地质调查局天然气水合物试采井(图 1)。

甲烷碳同位素监测采用静态箱法(叶室法)，叶室底面积 0.19 m²，内体积 19.2 L，叶室进出口为 1/4 英寸接头套管。测量时把叶室密封于预先挖好的深度为 10 cm 的坑中。监测使用 Picarro 公司生产的 G2132i 型甲烷碳同位素分析仪，同步监测甲烷稳定碳同位素含量。仪器采用波长扫描光腔衰荡光谱法，甲烷稳定碳同位素精度 < 0.8‰。监测时连接好叶室和主机，采用高精度模式，自动记录监测数据。

吸附气检测采用顶空气分析技术，通过将土壤样品装在有溶剂的玻璃瓶中，利用气相色谱技术测试出瓶中气相的轻烃，进而分析出土壤介质中的烃类气体含量^[79-80]。样品采集 30 cm 深度土壤，野外样品弃去碎石、草根等；在预装 200 mL 饱和盐水的瓶中装入土样，使饱和盐水的液面升

至 400 mL；装完样品的瓶子拧紧螺丝和瓶盖，在室内倒置摆放；运输过程中样品瓶倒置摆放。每次测定前，首先进行标准气体标定，保证测定结果的相对误差 < 3%。测试时，用注射器取 50 mL 正压顶空间气，注入富集进样口，同时秒表计时。经 40 秒分离掉空气后，转动六通阀至解析位，同时启动色谱程序，绘制色谱图和采集数据。

监测分别在 5 月、8 月和 10 月进行，现场测定近地表吸附气甲烷碳同位素含量，同时采集土壤样品，进行烃类气体气相色谱分析。

3 试验结果及分析

对试验区近地表游离气甲烷碳同位素现场监测和土壤样品吸附气烃类气相色谱分析数据进行统计(表 1)，数据分布特征如图 2 所示。

试验区，近地表游离气甲烷碳同位素 5 月份、8 月份、10 月份平均值分别为 -57.27‰(PDB)、-52.52‰(PDB)和 -39.78‰(PDB)，呈依次增加趋势，中位数结果与平均值结果变化趋势一致，说明试验区近地表游离气甲烷碳同位素整体含量递增的趋势，反映出在木里湿地冻土区春季到秋季

表 1 研究区游离气甲烷碳同位素、顶空气甲烷含量及干燥系数数据统计表

Table 1 Methane content in top space gas, $\delta^{13}\text{C}_1$ in free gas and dry coefficient in the Muli area

	5 月份实验数据			8 月份实验数据			10 月份实验数据		
	$\delta^{13}\text{C}_1$ /	T-CH ₄ /	C ₁ /	$\delta^{13}\text{C}_1$ /	T-CH ₄ /	C ₁ /	$\delta^{13}\text{C}_1$ /	T-CH ₄ /	C ₁ /
	‰	($\mu\text{L/L}$)	(C ₂ +C ₃)	‰	($\mu\text{L/L}$)	(C ₂ +C ₃)	‰	($\mu\text{L/L}$)	(C ₂ +C ₃)
样品数	42	42	42	42	42	42	42	42	42
最大值	-38.76	7 272.98	7 797.45	-41.16	3 958.93	5 036.51	-29.16	3 470.45	938.92
最小值	-84.11	3.98	5.16	-64.45	7.17	11.67	-56.45	3.00	5.52
平均值	-57.27	736.73	763.63	-52.52	465.04	547.09	-39.78	256.89	116.30
中位数	-57.41	8.49	31.34	-53.09	11.22	32.45	-38.16	5.97	40.53
标准差	13.28	1 682.34	1 679.13	7.84	903.90	1 075.17	6.46	756.36	200.92

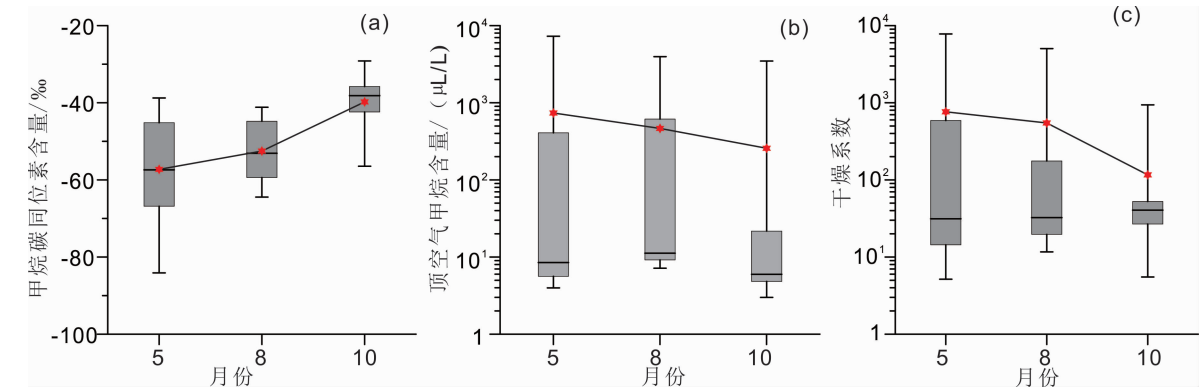


图2 研究区游离气甲烷碳同位素含量、顶空气甲烷含量及干燥系数数据分布特征

Fig.2 Distribution of $\delta^{13}\text{C}_1$, CH_4 and dry coefficient of the Muli area

(a) 甲烷碳同位素数据; (b) 吸附气甲烷含量数据; (c) 吸附气干燥系数数据; 箱线图指示最大值, 最小值, 上、下四分位值及中位数; 红色六角形为平均值

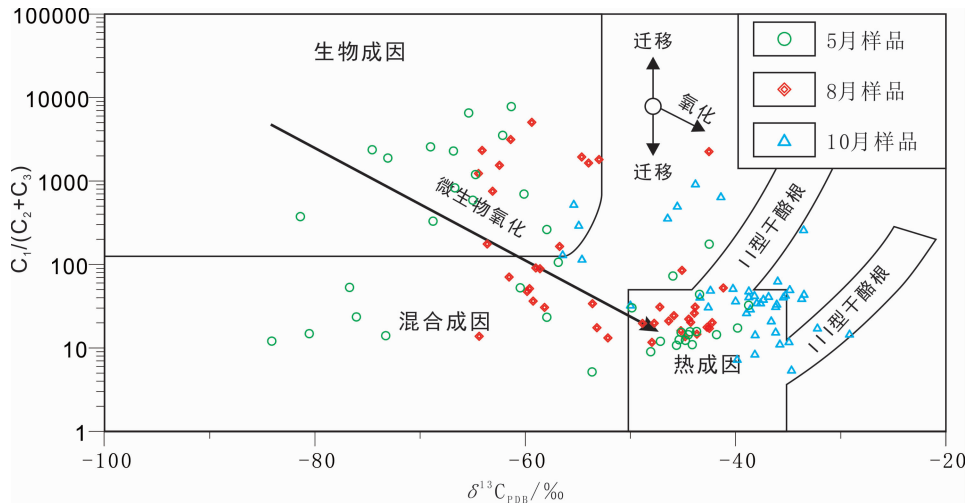


图3 研究区近地表甲烷气源成因判别图

Fig.3 Discrimination diagram of methane source in the Muli area

的过程中, 近地表游离烃甲烷成因的变化。同时, 3 次监测数据的标准偏差随时间递减, 推测甲烷成因可能由多成因向单一成因变化。

土壤吸附气甲烷含量在 5 月、8 月、10 月平均值分别为 736.73 $\mu\text{L/L}$, 465.04 $\mu\text{L/L}$, 256.89 $\mu\text{L/L}$, 呈依次减小趋势, 说明试验区土壤吸附气含量整体含量递减的趋势。另外, 3 次监测数据的标准差也随时间递减, 在一定程度上反映数据单一化趋势。

Bernard 对墨西哥湾 18 个天然气样品的统计发现, 天然气 $\delta^{13}\text{C}$ 含量在 $-39.9\text{‰} \sim -65.5\text{‰}$ 之间, $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ 为 68 到大于 1 000, 根据已取得的天然气成分特征, Bernard 认为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ 两个特征值可以区分热成因和生物成因天然气^[81]。Whiticar 认为这种较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是由于同

位素动力学分馏作用 (Kinetic Isotope Effect) 造成的, 并提出了天然气成因判别图解^[82]。利用该图解进行木里地区甲烷成因判别, 结果如图 3 所示。

判别结果显示, 5 月份的样品分布范围最广, 有 14 个样品被判定为生物成因, 15 个样品为热成因, 其余为混合成因; 8 月份的样品分布范围减小, 但仍具有生物成因与热成因混合的特征, 其中生物成因甲烷为 11 个, 热成因甲烷样品为 16 个; 而 10 月样品分布较为集中, 以热成因为主, 与数据统计显示的标准偏差依次递减的现象吻合。5 月份各监测指标数据标准偏差均为最大, 因此, 我们可以推测在 5 月份具有独立于其他时期的甲烷排放源。在已知的包括温度、湿度、湿地水位、动植物活动等环境因素范围内, 只有冻土融化作用与河流水位变化具有较强的独立性。另外, 由

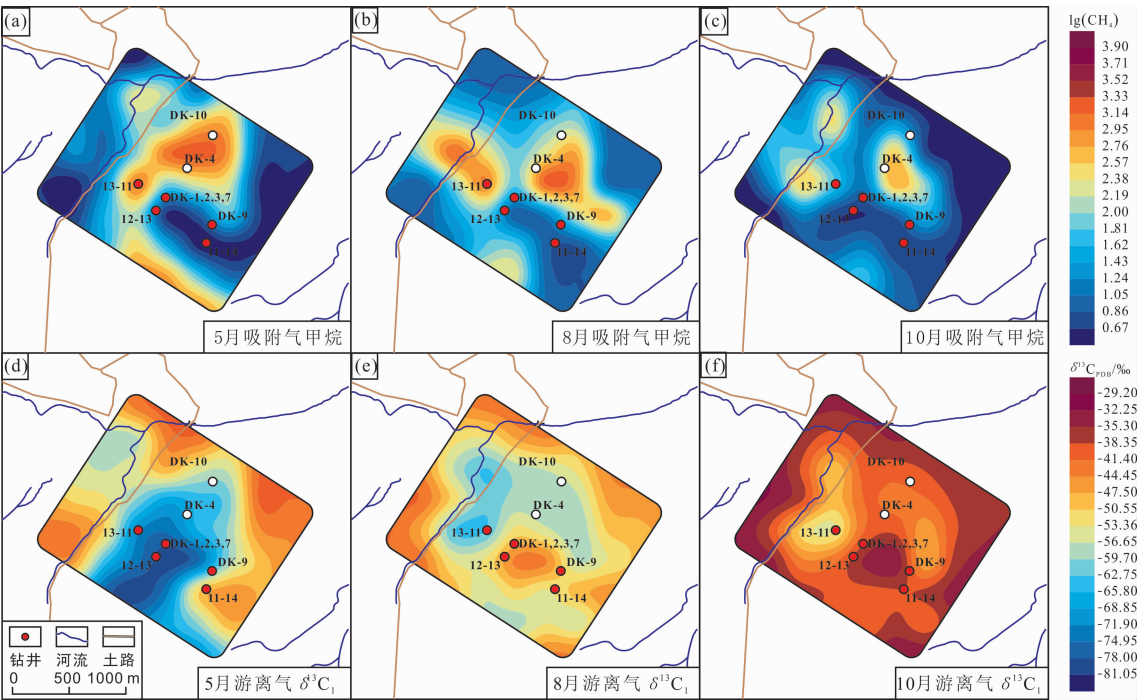


图 4 研究区近地表吸附气甲烷含量及游离气甲烷碳同位素分布图

Fig. 4 Geochemical anomaly of methane content in top space gas and $\delta^{13}\text{C}_1$ in free gas in the Muli area

于 DK-1-DK-8 井钻探工作是在监测试验之前进行的，虽然在监测试验当年并未有钻探工作，但是，所钻穿的冻土层有可能形成新的地下气体渗漏通道，能地表甲烷循环造成影响。为了对此因素进行判别，分别对 3 次监测结果进行地球化学成图，结果如图 4 所示。

在游离气甲烷碳同位素地球化学图上，8—10 月份在 DK-1 井东南侧出现甲烷碳同位素高值区，且含量值呈增加趋势，有可能是随温度增加，冻土融化，导致钻井区形成地下气体渗漏通道，水合物中烃类气体逸散造成的。但是，从地球化学图(图 4)上可以看出，钻井区影响范围较小，并不能成为影响试验区甲烷排放的主导因素。同时，吸附气含量与游离气甲烷碳同位素值在 8—10 月份在 13-11 井和 DK-4 到 DK-9 井地区也具有一定的对应关系，这种较大范围的相关性应该是造成数据统计中较大相关系数的主因。而在 5 月份地球化学图中，游离气甲烷碳同位素在 12-13 井到 DK-1 井地区的低值异常具有一定的独立性，这种独立性同样反应在吸附气甲烷地球化学图试验区北侧和西侧较高值异常区，此异常区一定程度上对应了河流分布，反映出河流对湿地甲烷排放的影响，Liu 等对内蒙古湿地甲烷排放的监测研究中提出，水体能够作为烃类载体，发挥甲烷排放源

的作用，从理论角度解释这种近水区域近地表甲烷含量增加的现象^[83]。

Jin 等研究认为，青藏高原地区冻土融化与上冻作用能够在影响湿地甲烷排放^[84-85]，而此点在极地冻土区湿地甲烷排放中也有所体现^[86]。在祁连山地区，冻土融化与上冻分别发生在 4—5 月份与 9—10 月份^[57]，冻土融化导致湿地水位上升^[87]，因此对生物甲烷排放造成较大影响，从甲烷碳同位素对气源的指示作用角度分析，这种生物成因甲烷从 8—10 月份的减少对应了甲烷碳同位素地球化学图中甲烷碳同位素值的增加趋势。

4 结 论

根据本次试验所取得的冻土区湿地甲烷含量检测数据，我们可以得出以下结论。

(1)在青藏高原冻土区湿地，从 5—10 月份，游离烃甲烷碳同位素含量平均值呈整体增加，数据标准偏差值呈整体减小的变化特征，反映了近地表生物成因甲烷所占比例降低，热成因甲烷所占比例增加的趋势。

(2)在青藏高原冻土区湿地，从 5—10 月份，近地表吸附气甲烷含量平均值及吸附气干燥系数均表现为整体减小的变化特征，反映出近地表吸附气甲烷含量减小，但所占比例增加的趋势。

(3)在青藏高原冻土区湿地, 河流分布区吸附气甲烷含量较高, 反映出河流对湿地甲烷排放的正向影响作用。

参考文献:

[1] GORHAM E. Northern Peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming [J]. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 182–195.

[2] MITRA S, WASSMANN R, VLEK P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock [J]. *Current Science*, 2005, 88(1): 25–35.

[3] LIMPENS J, BERENDSE F, BLODAU C, et al. Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications: a synthesis [J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(6): 1475–1491.

[4] 杨柯, 刘国栋, 刘飞, 等. 扎龙湿地水旱交错区土壤呼吸研究 [J]. *地学前缘*, 2011, 18(6): 94–100.

[5] MITSCH W J, BERNAL B, NAHLIK A M, et al. Wetlands, carbon, and climate change [J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583–597.

[6] SUN L, SONG C, LAFLEUR P M, et al. Wetland-atmosphere methane exchange in Northeast China: A comparison of permafrost peatland and freshwater wetlands [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017, 249: 239–249.

[7] MATTHEWS E, FUNG I. Methane emission from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, 1(1): 61–86.

[8] BARTLETT K B, HARRISS R C. Review and assessment of methane emissions from wetlands [J]. *Chemosphere*, 1993, 26: 261–320.

[9] ZEDLER J B, KERCHER S. Wetland resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability [J]. *Annual Review of Environment & Resources*, 2005, 15: 39–74.

[10] FRANKENBERG C, MEIRINK J F, VAN W M, et al. Assessing methane emissions from global space-borne observations [J]. *Science*, 2005, 308: 1010.

[11] 陈槐, 高永恒, 姚守平, 等. 若尔盖高原湿地甲烷排放的时空异质性 [J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3425–3437.

[12] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(5): 726–733.

[13] HIROTA M, KAWADA K, HU Q, et al. Net primary productivity and spatial distribution of vegetation in an alpine wetland, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Limnology*, 2007, 8(2): 161–170.

[14] CHEN H, WU N, YAO S P, et al. Diurnal variation of methane emissions from an alpine wetland on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau. [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2010, 164(1/4): 21–28.

[15] 魏达, 旭日, 王迎红, 等. 青藏高原纳木错高寒草原温室气体通量及与环境因子关系研究 [J]. *草地学报*, 2011, 19

(3): 412–419.

[16] 王广帅, 杨晓霞, 任飞, 等. 青藏高原高寒草甸非生长季温室气体排放特征及其年度贡献 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 1994–2001.

[17] CUI M, MA A, QI H, et al. Warmer temperature accelerates methane emissions from the Zoige wetland on the Tibetan Plateau without changing methanogenic community composition [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11616.

[18] 旦增塔庆, 旭日, 魏学红, 等. 西藏纳木错高寒草原、高寒草甸和沼泽化草甸主要温室气体通量对比研究 [J]. *草地学报*, 2014, 22(3): 493–501.

[19] 耿晓东, 旭日, 魏达. 多梯度增温对青藏高原高寒草甸温室气体通量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 445–452.

[20] ZHOU W, CUI L, WANG Y, et al. Methane emissions from natural and drained peatlands in the Zoigê, eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(3): 539–547.

[21] 赵传冬, 刘国栋, 杨柯, 等. 黑龙江省扎龙湿地及其周边地区土壤碳储量估算与1986年以来的变化趋势研究 [J]. *地学前缘*, 2011, 18(6): 27–33.

[22] 赵魁义. 中国沼泽志 [M]. 北京: 科学出版社, 1999, 1: 99.

[23] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 666–672.

[24] 孙志高, 刘景双, 李彬. 中国湿地资源的现状、问题与可持续利用对策 [J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(2): 83–88.

[25] 赵志龙, 张懿锂, 刘林山, 等. 青藏高原湿地研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(9): 1218–1230.

[26] SHI P L, ZHANG X Z, ZHONG Z M, et al. Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2006, 137(3): 220–233.

[27] ZHANG F, LIU A, LI Y, et al. CO₂ flux in alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 453–462.

[28] PENG F, XUE X, YOU Q, et al. Warming effects on carbon release in a permafrost area of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(1): 57–66.

[29] SHI P, SUN X, XU L, et al. Net ecosystem CO₂ exchange and controlling factors in a steppe—Kobresia, meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(2): 207–218.

[30] LU X, FAN J, YAN Y, et al. Responses of soil CO₂ fluxes to short-term experimental warming in alpine steppe ecosystem, Northern Tibet [J]. *Plos One*, 2013, 8(3): e59054.

[31] 中国气象局. 2016年中国温室气体公报[EB/OL]. (2017–11–11) [2018–01–17]. http://www.cma.gov.cn/root7/auto13139/201801/t20180117_460485.

[32] LINDERHOLM H W. Growing season changes in the last century [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2006, 137(1): 1

- 14.

[33] CHAI X, SHI P, ZONG N, et al. A growing season climatic index to simulate gross primary productivity and carbon budget in a Tibetan alpine meadow [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 285 – 294.

[34] MILICH L. The role of methane in global warming: where might mitigation strategies be focused [J]. *Global Environmental Change*, 1999, 9(3): 179 – 201.

[35] 周杰, 官莉. 青藏高原上空甲烷的时空分布特征及其夏季高值形成机制分析 [J]. *气候与环境研究*, 2017, 22(3): 315 – 321.

[36] ZHANG Z, ZIMMERMANN N E, STENKE A, et al. Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017; 201618765.

[37] 徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 201 – 204.

[38] 张立新, 徐学祖, 马巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物 [J]. *天然气地球科学*, 2001, 12(1): 22 – 26.

[39] 黄朋, 潘桂棠, 王立全, 等. 青藏高原天然气水合物资源预测 [J]. *地质通报*, 2002, 21(11): 794 – 798.

[40] 伊海生, 王造成. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成潜力及远景 [J]. *西藏地质*, 2002(1): 45 – 52.

[41] 刘怀山, 韩晓丽. 西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测 [J]. *西北地质*, 2004, 37(4): 33 – 38.

[42] 陈多福, 王茂春, 夏斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 165 – 172.

[43] 吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 等. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系 [J]. *地质通报*, 2006, 25(1): 29 – 33.

[44] 祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件 [J]. *地质通报*, 2006, 25(z1): 58 – 63.

[45] 卢振权, 吴必豪, 饶竹, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常 [J]. *地质通报*, 2007, 26(8): 1029 – 1040.

[46] 张洪涛, 张海启, 祝有海. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展 [J]. *中国地质*, 2007, 34(6): 953 – 961.

[47] 库新勃, 吴青柏, 蒋观利. 青藏高原多年冻土区天然气水合物可能分布范围研究 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 588 – 592.

[48] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物 [J]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1762 – 1771.

[49] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征 [J]. *地球学报*, 2010, 31(1): 7 – 16.

[50] 黄霞, 祝有海, 王平康, 等. 祁连山冻土区天然气水合物烃类气体组分的特征和成因 [J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1851 – 1856.

[51] 戴金星, 倪海燕, 黄士鹏, 等. 中国天然气水合物气的成因类型 [J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(6): 837 – 848.

[52] 祝有海, 赵省民, 卢振权. 中国冻土区天然气水合物的找矿选区及其资源潜力 [J]. *天然气工业*, 2011, 31(1): 13 – 19.

[53] 杨德寿, 龚建明, 贺行良, 等. 青藏高原乌丽冻土区二氧化碳成因探讨 [J]. *现代地质*, 2013, 18(6): 1392 – 1398.

[54] LIU S, JIANG Z, LIU H, et al. The natural-gas hydrate exploration prospects of the Nayixiong Formation in the Kaixinling-Wuli Permafrost, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2016, 72: 179 – 192.

[55] 梅博文, 吴萌, 孙忠军, 等. 青海省天峻县木里地区天然气水合物微生物地球化学检测法 (MGCE) 试验 [J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1891 – 1895.

[56] 杨志斌, 孙忠军, 李广之, 等. 青海省天峻县木里地区天然气水合物发现区浅表地球化学特征 [J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1883 – 1890.

[57] 杨志斌, 周亚龙, 孙忠军, 等. 祁连山木里地区天然气水合物地球化学勘查 [J]. *物探与化探*, 2013, 37(6): 988 – 992.

[58] 杨志斌, 周亚龙, 孙忠军, 等. 羌塘盆地泥火山发育区天然气水合物地球化学勘查 [J]. *物探与化探*, 2017, 41(3): 452 – 458.

[59] 张富贵, 唐瑞玲, 杨志斌, 等. 陆域天然气水合物地球化学勘查技术试验研究 [J]. *物探与化探*, 2013, 37(6): 1043 – 1048.

[60] 张富贵, 杨志斌, 唐瑞玲, 等. 酸解烃技术在青海祁连山天然气水合物勘探中的应用 [J]. *中国矿业*, 2016, 25(s2): 227 – 233.

[61] SUN Z, YANG Z, MEI H, et al. Geochemical characteristics of the shallow soil above the Muli gas hydrate reservoir in the permafrost region of the Qilian Mountains, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139(1): 160 – 169.

[62] 孙忠军, 杨志斌, 卢振权, 等. 青海木里三露天天然气水合物矿藏土壤微量元素地球化学特征 [J]. *现代地质*, 2015, 29(5): 1164 – 1172.

[63] 孙忠军, 杨志斌, 秦爱华, 等. 中纬度带天然气水合物地球化学勘查技术 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(4): 1063 – 1070.

[64] NORRIS R D, RÖHL U. Carbon cycling and chronology of climate warming during the Palaeocene/Eocene transition [J]. *Nature*, 1999, 401: 775 – 778.

[65] KENNETT J P, STOTT L D. Abrupt deepsea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene [J]. *Nature*, 1991, 353: 225 – 229.

[66] ZACHOS J C, LOHMANN K C, WALKER J C G, et al. Abrupt climate change and transient climates during the Paleogene: A marine perspective [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 191 – 213.

[67] DICKENS GERALD R, O'NEIL JAMES R, REA DAVID K, et al. Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10(6): 965 – 971.

[68] GERALD R D, MARIA M C, JAMES C G W. A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dis-

sociation of oceanic methane hydrate [J]. *Geology*, 1997, 25 (3): 259 – 262.

[69] NORRIS R D, RÖHL U. Carbon cycling and chronology of climate warming during the Palaeocene/Eocene transition [J]. *Nature*, 1999, 401: 775 – 778.

[70] BAINS S, CORFIELD R M, NORRIS R D. Mechanisms of climate warming at the end of the aleocene [J]. *Science*, 1999, 285: 724 – 727.

[71] LI A, DAVIES R J, MATHIAS S. Methane hydrate recycling offshore of Mauritania probably after the last glacial maximum [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2017, 84: 323 – 331.

[72] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 329 – 353.

[73] 王红荣, 费迎霞, 祁迎林, 等. 海西州天然草地产草量地面监测报告 [J]. *青海草业*, 2007, 16(1): 47 – 53.

[74] 秦彧, 宜树华, 李乃杰, 等. 青藏高原草地生态系统碳循环研究进展 [J]. *草业学报*, 2012, 21(6): 275 – 285.

[75] 符俊辉, 周立发. 南祁连盆地石炭—侏罗纪地层区划及石油地质特征 [J]. *西北地质科学*, 1998, 19(2): 47 – 54.

[76] DALLIMORE S R, COLLETT T S. Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [J]. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 2005, 585: 1 – 140.

[77] 文怀军, 鲁静, 尚璐君, 等. 青海聚乎更矿区侏罗纪含煤岩系层序地层研究 [J]. *中国煤田地质*, 2006, 18(5): 19 – 21.

[78] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程概况 [J]. *地质通报*, 2011, 30(12): 1717 – 1822.

[79] 缪九军, 李广之, 吴向华, 等. 静态顶空气分析技术在油气化探中的应用 [J]. *物探与化探*, 2003, 27(4): 255 – 258.

[80] 李广之, 袁子艳, 胡斌, 等. 利用顶空气判别凝析气(油)储层 [J]. *天然气地球科学*, 2006, 3(6): 309 – 312.

[81] BERNARD B B, BROOKS J M, SACKETT W M. Natural gas seepage in the Gulf of Mexico [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1976, 31(1): 48 – 54.

[82] WHITICAR M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 291 – 314.

[83] LIU C, HOLST J, YAO Z, et al. Growing season methane budget of an Inner Mongolian steppe [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 3086 – 3095.

[84] JIN H, JIE W, CHENG G, et al. Methane emissions from wetlands on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44: 2282 – 2286.

[85] JIN Z, ZHUANG Q, HE J S, et al. Net exchanges of methane and carbon dioxide on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2100 [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(8): 85022 – 86007.

[86] SONG C, WANG Y, WANG Y, et al. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 6879 – 6885.

[87] YANG G, CHEN H, WU N, et al. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH₄, emissions from the Zoige peatland in China [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 78: 83 – 89.