

文章编号: 1007-0435(2005)03-0242-06

积雪对藏北高寒草甸 CO₂ 和水汽通量的影响

赵 亮¹, 徐世晓¹, 伏玉玲², 古 松¹, 李英年¹, 王勤学³, 杜明远⁴, 赵新全¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3. 日本国立环境研究所, 日本 筑波 3050053; 4. 日本农林环境技术研究所, 日本 筑波 30508604)

摘要: 于 2002 和 2003 年冬季运用涡度相关法测定藏北草甸在有积雪和无雪条件下的 CO₂ 和水汽通量。结果表明: 在同一层次 CO₂ 浓度, 在有雪时 CO₂ 浓度低于无雪时, 其中只有 20 cm 和 160 cm 层次间差异极显著 ($P < 0.01$); 在同一层次, 前者的水汽浓度极显著地高于后者 ($P < 0.01$); 积雪时, CO₂ 通量与 5 cm 土温相关不显著, 高寒草甸 CO₂ 交换量, 随着积雪时间的延长呈线性降低, 而高寒灌丛和沼泽则相反; 沼泽和草甸在有雪时, CO₂ 通量值极显著高于无雪时 ($P < 0.01$), 而灌丛在这两个条件下 CO₂ 通量值之间差异不显著。

关键词: 青藏高原; 积雪; CO₂ 通量; 涡度相关法

中图分类号: S812 **文献标识码:** A

Effects of Snow Cover on CO₂ Flux of Northern Alpine Meadow on Qinghai-Tibetan Plateau

ZHAO Liang^{1*}, XU Shi-xiao¹, FU Yu-ling², GU Song³, LI Ying-nian¹,
WANG Qin-xue³, DU Ming-yuan⁴, ZHAO Xin-quan¹

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, CAS, Xining, Qinghai Province 810001 China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Research, CAS, Beijing 100101 China;

3. National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 3050053, Japan;

4. National Institute of Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, 30508604, Japan)

Abstract: The alpine meadow ecosystem on Qinghai-Tibetan plateau plays a significant role in the regional carbon cycle. To assess the CO₂ flux and its relationship to environmental controls in the ecosystems, eddy covariance of CO₂ was measured from both snow-covered areas and on snow areas with open-path system in an alpine meadow of the plateau, during the winters of 2002 and 2003. The results indicated: At the same height, average CO₂ concentration in snow-covered conditions was less intense than in no snow conditions, but significant differences occurred between 20 cm height and 160 cm level ($P < 0.01$). The average H₂O concentration in snow covered conditions was significantly more intense than in no snow conditions, respectively ($P < 0.01$). In snow covered conditions, there was no significant relationship between CO₂ flux and 5 cm soil temperature. There was a significant, linearity relationship between CO₂ flux and the number of snow-covered days in the alpine meadow; however, no such relationship existed in both the shrub meadow and the swamp meadow. Net ecosystem CO₂ exchange in snow-covered condition was significantly more frequent than in no snow conditions ($P < 0.01$). The CO₂ flux of the shrub meadow in snow covered condition (0.86 g/m² d), however was not significantly different from no snow condition (0.60 g/m² d). The seasonal snow influences the C cycling in winter of the Qinghai-Tibetan plateau.

Key word: Qinghai-Tibetan plateau; Snow pack; CO₂ flux; Eddy covariance

全球碳循环动态与气候变化及人类活动的影响有着密切关系。作为大气中 CO₂ 的源和汇, 陆地生态系

统碳循环是全球碳循环中的重要环节, 已经成为碳循环研究的焦点。积雪在可见光区反射率高且变化大以

收稿日期: 2004-06-28; 修回日期: 2005-03-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-SW-01-01A5); 国家 973(2002cb412501); 亚太地区环境创新战略计划 (APEIS) 及中日合作温带高山草原生态系统碳素动态和温暖化影响研究项目

作者简介: 赵亮(1974-), 青海乐都人, 助理研究员, 主要从事高原生态学研究工作, E-mail: Lzhao@nwipb.ac.cn

及导热率低等特点, 影响陆面与大气之间的能量交换。目前已有对北极圈^[2], 高原生态系统^[3,4]和森林生态系统^[5,6]非生长季节的 CO₂ 通量, 以及积雪对 CO₂ 通量影响进行研究。

青藏高原的形成和发展, 强烈地影响着东亚, 甚至北半球的气候, 是全球变化的“敏感区”; 它集中了丰富的冰雪资源, 其中冰川面积达 30, 831 km², 冬季积雪贮量约 121. 9 亿 m³, 积雪最短时间一般在 40~ 60 d, 并且分布有多种植被类型, 青藏高原的草地生态系统面积约为 2. 5 × 10⁶ km², 其中高寒草甸、高寒灌丛草甸和高寒沼泽化草甸分别为 0. 48 × 10⁶, 0. 106 × 10⁶ 和 0. 049 × 10⁶ km², 是分布面积最广的草地生态系统, 所以探讨这 3 种生态系统的碳循环对认识整个青藏高原草地生态系统乃至世界上高海拔草原生态系统的碳循环都具有重要的意义。然而, 至今积雪对这 3 种生态系统非生长季节的 CO₂ 和水汽通量影响的研究较少。本文通过运用湿度相关法测定高寒草甸、高寒沼泽化草甸和高寒灌丛草甸冬季 CO₂ 通量, 以确定在积雪条件下, 不同植被类型的 CO₂ 通量与积雪之间的关系。

1 材料与方法

1.1 区域自然概况

本研究于 2002 和 2003 年冬季在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)进行。对该站的地理位置及自然环境已有大量的报道^[7], 本文不在赘述。

1.2 研究方法

本文以矮嵩草(*Kobresia tibetica*)草甸、金露梅灌丛(*Potentilla fruticosa*)草甸、藏嵩草(*K. tibetica*)沼泽草甸为研究对象。观测点设置在高寒草甸、高寒灌丛草甸和高寒沼泽草甸。在观测站中心点方圆 600 m 内, 地势平坦, 地形开阔, 具有足够的“风浪区”。观测系统离地面 220 cm 高, 主要部分有 CSA T 型超声风速仪、温度计(CSI)和 LI-7500 CO₂/H₂O 红外分析仪(LI-COR, Inc)。用 Moore^[11]的方法进行行通量的纠正, 运用 Webb 等^[8]对通量值进行修正。观测项目见表 1。

表 1 仪器及其架设高度

Table 1 Measurements of elements and instruments used

气象元素 Meteorological elements	仪器 Instrument or sensor (Model, Company, Country)	高度(cm) Location
净辐射 Net radiation	辐射表(CNR-1/Kipp & Zonen) Net radiometer(CNR-1, Kipp and Zonen, The Netherlands)	150
土壤热通量 Soil heat flux	电热版(HFT-3/CSI) Soil heat flux plate (HFT-3, CSI, USA)	-2
CO ₂ 通量 CO ₂ flux	三维风速温度计及 LI-7500 CO ₂ /H ₂ O 红外分析仪 (CS-7500/CSI) CO ₂ /H ₂ O analyzer (LI-7500, LI-COR, USA)	220
土壤温度 Soil temperature	热电偶 Themocouple	-5 -10 -20 -40 -80
数据采集器 Datalogger	CR10X, CR23X or CR5000 (CSI Campbell Scientific Inc., UT, USA)	100
CO ₂ 和 H ₂ O 浓度 CO ₂ and H ₂ O concentrations	LI-6262 CO ₂ /H ₂ O (LI-COR, Inc.)	20 40 80 160 320 640

在高寒草甸的观测场架设 6 层 CO₂ 和 H₂O 廓线系统。所测数据由 CR5000 数据采集器(CSI)计算, 采样频率每秒 10 次。

实验数据分为积雪组(SA)和无积雪组(NS)。选择积雪厚度 5 cm 日期的通量观察数据作为积雪组, 选择降雪前 5 d 和雪融后 5 d 的通量数据为无积雪组(表 2)。所测数据在 SAS 8.1(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.)软件上分析, 用双尾 T 检验差异性。

1.3 数据处理

表 2 积雪厚度、积雪时间、水汽压(220 cm)、空气温度和土壤温度(5 cm)

Table 2 The maximum snowpack depth, the number of days, water vapor, air temperature, 5 cm soil temperature, CO₂/water concentrations of each treatment groups

时间段 Time	实验组 Group	最大积雪厚度 Maximum snowpack depth(cm)	积雪天数 Number of days(d)	水汽压 Water vapor (kpa)	气温 Air temperature (°C)	土壤温度 5 cm soil temperature (°C)	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentrations (mg/m ³)	水汽浓度 Water concentrations (g/m ³)
2002.10.11	积雪 Snow covered	15	23	0.46	-3.75	2.53	479.92	3.09
2002.11.23	无雪 No snow	-	-	0.37	-7.46	-0.14	506.09	2.23
2003.11.05	积雪 Snow covered	7	7	0.27	-7.72	0.59	508.96	1.63
2003.11.14	无雪 No snow	-	-	0.42	-2.82	0.72	480.79	3.02
2003.11.15	积雪 Snow covered	10	9	0.25	-8.94	-0.19	507.09	1.54
2003.11.24	无雪 No snow	-	-	0.15	-11.52	-1.83	498.61	1.63

2 结果和分析

2.1 不同条件下 5 cm 土温变化

在地表积雪时, 5 cm 土温低于无雪者, 二者日变化亦明显不同, 前者土温变化振幅小, 最大值和最小值分别为 2.22 和 -0.65 ; 而后者变化振幅大, 分别为 8.46 和 -3.08 , 土温最大值超过 5 (图 1)。

2.2 不同高度 CO₂ 和水汽浓度变化

在冬季因受土壤微生物活动周期性变化的影响, 陆地大气 CO₂ 单位时间平均浓度也存在相应的日变化。这种日变化随着地表状态及距地面高度不同差异

很大。

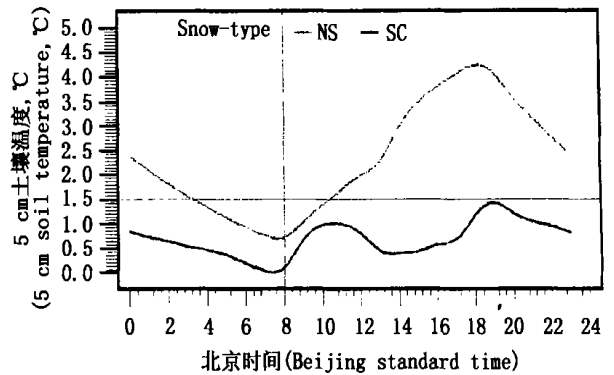


图 1 在地表积雪和无雪条件下 5 cm 土温日变化

Fig 1 The daily variation of 5 cm soil temperature (T_s-5cm, °C) in snow covered and no snow conditions

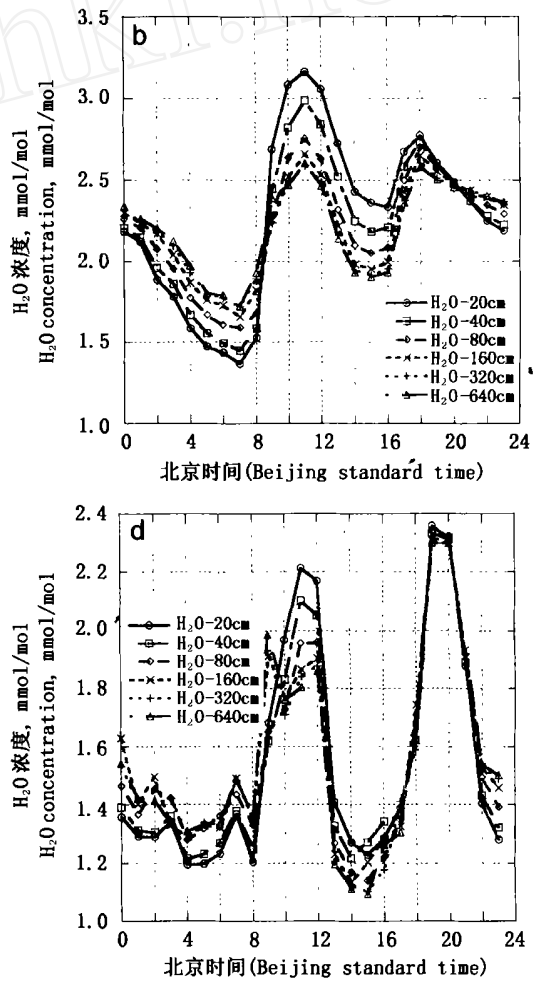
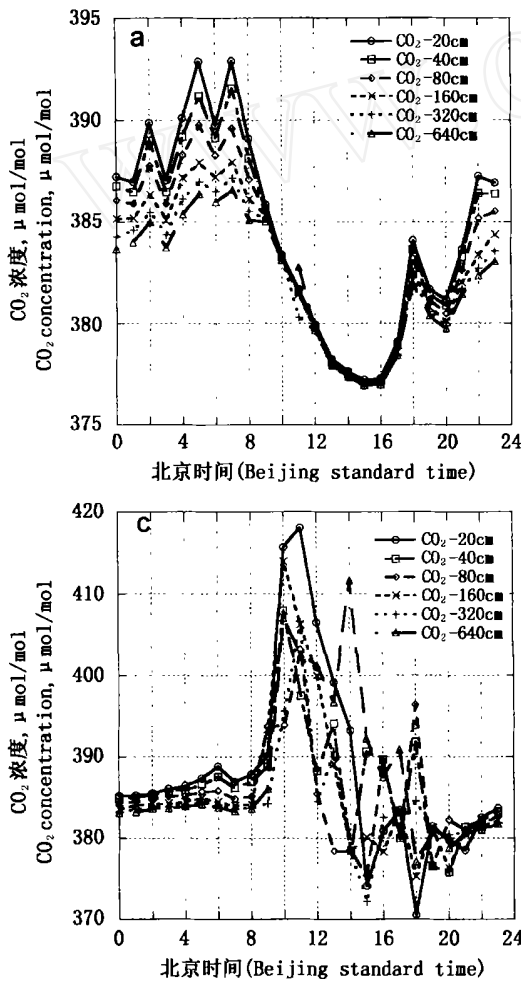


图 2 在地表积雪 (a, b) 和无雪 (c, d) 时不同高度大气 CO₂ 和水汽浓度日变化

Fig 2 The daily variation of CO₂ and H₂O concentration in different levels from both snow covered (a, b) and no snow (c, d) conditions

2.2.1 积雪时 CO₂ 和水汽浓度日变化与无雪者差异显著。有雪时, CO₂ 和水汽浓度在 0~ 12 h 段变化步调呈现相反的趋势(图 2)。在晚上 CO₂ 浓度较高且波动较大, 凌晨 6 h, CO₂ 浓度开始下降, 逐渐接近最小值,

而水汽浓度与 CO₂ 浓度变化相反, 晚上较低, 凌晨 7 h 水汽浓度开始上升, 达到最大值, 尔后再逐渐下降(图 2); 无雪时, CO₂ 和水汽浓度在 0~ 12 h 段变化步调呈现一致(图 2)。CO₂ 浓度晚上较平稳而白天波动较大,

在凌晨 8 h, CO₂ 与水汽浓度开始上升, 逐渐达到最大值, 尔后下降, 出现两个峰值。积雪时大气 CO₂ 和水汽浓度最大值分别出现在晚上 5~ 7 h 和 8~ 12 h, 最小值出现在 15 h 左右和晚上 6~ 7 h, 而无雪时最大值分别出现在 10 h 左右和 10~ 12 h, 最小值在 14 h 左右和 14~ 16 h (图 2)。

2.2.2 地表有积雪和无积雪时不同高度的 CO₂ 和水汽浓度的分布明显不同。前者在晚上和傍晚时 CO₂ 浓度随着高度的升高而降低, 不同高度间差异显著, 而水汽浓度则与之相反, 随着高度的升高而升高, 在白天不同高度的 CO₂ 浓度基本上相等, 而水汽浓度则随着高

度的升高而降低; 无雪时, 在晚上和傍晚, CO₂ 和水汽浓度随着高度的变化与有雪者结果一致, 但不同高度之间 CO₂ 浓度相差相对较小, 白天时 CO₂ 浓度波动较大, 变化不稳定, 而水汽浓度随着高度的升高而降低, 在 18~ 22 h 不同高度的水汽浓度基本相等。

2.2.3 在地表有雪和无雪条件下, 不同层次 CO₂ 和水汽浓度各异。相同层次 CO₂ 浓度, 在有雪时低于无雪者 (表 3), 但是只有 20 cm 和 160 cm 间 CO₂ 浓度差异显著, 其余相同层次间, 有雪时水汽浓度显著地高于无雪 (表 3)。

表 3 不同层次 CO₂ 浓度 (μmol/mol) 和水汽浓度 (mmol/mol)
Table 3 Mean values of CO₂/water concentrations of each height

变量 Variable	实验组 Group	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	实验组差 Differ	T-检验 T-test		
							df	T	P
CO ₂ -20	SC	384.63	5.8344	375.73	406.68	-3.6290	356	-2.10	0.04
	NS	388.26	30.735	301.94	574.54				
CO ₂ -40	SC	384.14	5.3205	375.73	400.09	-2.5970	363	-1.85	0.07
	NS	386.74	24.863	307.32	580.56				
CO ₂ -80	SC	383.56	4.7830	375.54	396.47	-1.7380	370	-1.47	0.14
	NS	385.29	20.850	310.89	580.68				
CO ₂ -160	SC	382.88	4.2348	375.64	393.44	-2.8910	347	-2.01	0.05
	NS	385.77	25.694	308.00	576.65				
CO ₂ -320	SC	382.40	4.0408	367.76	392.72	-1.7970	358	-1.59	0.11
	NS	384.20	20.070	302.51	567.88				
CO ₂ -640	SC	382.21	3.8693	375.59	398.10	-5.7290	340	-3.54	0.00
	NS	387.94	29.754	334.70	587.61				
H ₂ O-20	SC	2.2719	0.8076	0.8471	4.4589	0.7500	623	11.07	0.00
	NS	1.5219	0.8888	0.0001	6.5411				
H ₂ O-40	SC	2.2258	0.7502	0.9138	4.4178	0.7081	624	11.02	0.00
	NS	1.5176	0.8571	0.0001	6.3805				
H ₂ O-80	SC	2.2065	0.6950	1.0261	4.4614	0.6773	625	11.08	0.00
	NS	1.5292	0.8352	0.0001	6.2502				
H ₂ O-160	SC	2.2063	0.6736	1.0790	4.4610	0.6526	620	10.86	0.00
	NS	1.5536	0.8274	0.0001	6.2126				
H ₂ O-320	SC	2.2016	0.6572	1.1325	4.4319	0.6641	622	11.19	0.00
	NS	1.5375	0.8282	0.0002	6.1555				
H ₂ O-640	SC	2.2118	0.6670	1.1073	4.4507	0.6742	622	11.24	0.00
	NS	1.5376	0.8334	0.0003	6.1550				

2.3 CO₂ 通量与地温和积雪时间的关系

积雪时, CO₂ 通量与 5 cm 土温之间相关不显著, 而与积雪时间的相关则因下垫不同而异 (图 3)。其中灌丛和沼泽草甸 CO₂ 通量与积雪时间相关不显著而高寒草甸与积雪时间之间呈极显著线性相关, ($R^2 = 0.7258$, $P < 0.01$), CO₂ 通量随着积雪时间的增加而下降。

2.4 CO₂ 通量日变化

地表积雪时, CO₂ 通量日变化与无雪者一致, 都是晚上低, 白天高 (图 4), 但二者通量值显著不同, 沼泽和草甸在积雪时, CO₂ 通量值显著地高于无雪者, 而灌

丛在这两个条件下 CO₂ 通量值差异不显著 (表 4)。

3 讨论

3.1 积雪对 CO₂ 和水汽浓度的影响

3.1.1 CO₂ 是地球大气中最重要温室气体, 大气 CO₂ 的浓度分布变化与自然发展环境有着密切关系, 它在整个循环过程中最敏感, 最易受其它源、汇影响而波动最大。本文的结果表明, 积雪对 CO₂ 浓度影响较大。晚上 CO₂ 浓度随着离地表高度的升高而降低, 白天随着离地表面高度升高而增大。究其原因, 一方面由

于 CO₂ 的密度大于空气密度, 当大气结层处于稳定时, CO₂ 下沉, 聚集在地表, 造成晚上离地表表面较近处 CO₂ 浓度较高, 而较远处浓度较低(图 1); 另一方面该地区在晚上存在逆温层(图 5), 引起空气向下运动, 造成晚上 CO₂ 浓度随着离地表高度的升高而降低。

表 4 不同条件下 3 种植被类型 CO₂ 通量

Table 4 Mean CO₂ flux of 3 types of vegetation under different condition

	CO ₂ 通量(g/m ² ·d) CO ₂ flux		t-value	df	P
	积雪 SC	无雪 NS			
草甸(Meadow)	1.17	0.73	4.10	3240	0.0001
灌丛(Shrub)	0.86	0.60	0.78	1792	0.4361
沼泽(Swamp)	3.33	2.45	3.97	1689	0.0001

3.1.2 在青藏高原, 积雪不但对大气中 CO₂ 浓度有显著的影响, 而且对其日变化也有明显的影响。当地表无雪时, 凌晨 CO₂ 浓度有一个明显上升阶段, 而在有积雪时则没有这个阶段。因为凌晨随着太阳高角的增大, 近地层气温升高, 聚集在地表面的 CO₂ 大量向上运动, 引起上层 CO₂ 浓度突然升高, 并且升高速度相当快。另一方面, 在无雪时, 5cm 土温开始上升(图 1), 并且最高时超过 5℃,

达到土壤微生物活动的温度, 而在有积雪时, 5 cm 的土温较平稳, 并且最高温度没有超过 5℃, 这样引起两个条件下的凌晨的 CO₂ 浓度变化趋势不同。

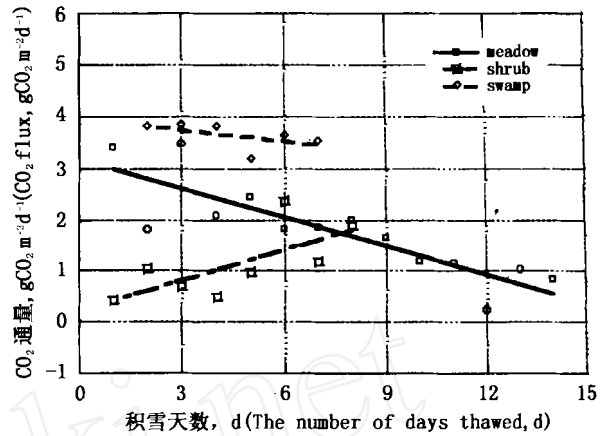


图 3 草甸, 灌丛草甸, 沼泽草甸日均 CO₂ 通量与积雪天数的关系

Fig 3 Relationship between the mean daily CO₂ flux and the number of days thawed in different vegetation types (include: the alpine meadow (meadow), the shrub meadow (shrub) and the swamp meadow (swamp))

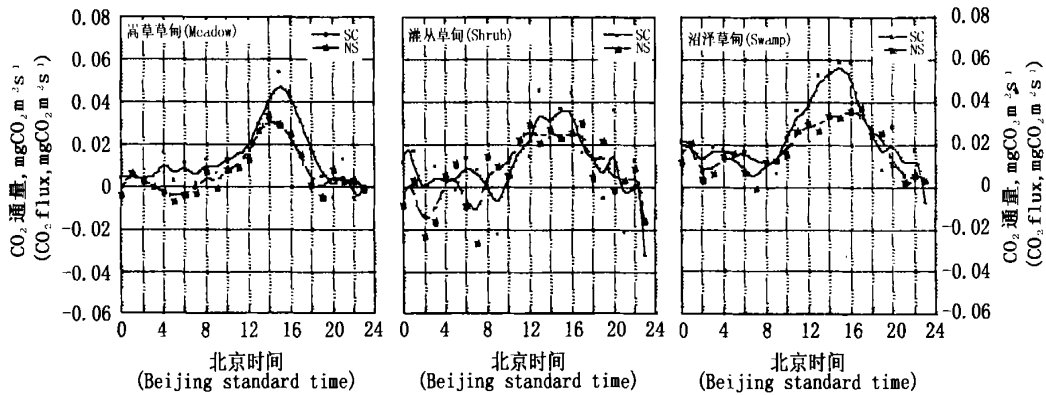


图 4 在地表积雪和无雪条件下不同植被类型 CO₂ 通量日变化

Fig 4 The daily variation of CO₂ flux in different vegetation types (include: the alpine meadow, the shrub meadow and the swamp meadow) for both snow covered and no snow areas

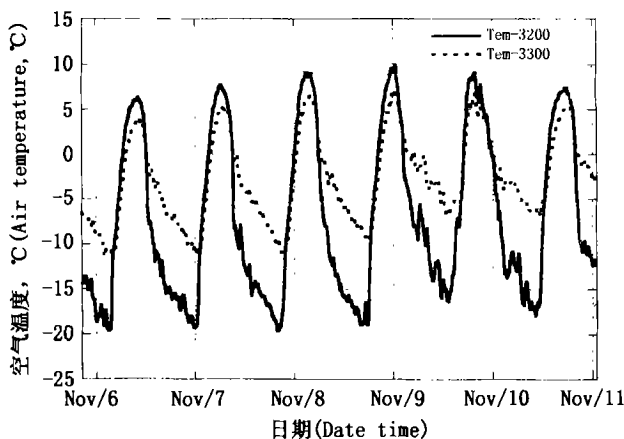


图 5 不同海拔高度气温(Ta, °C)日变化

Fig 5 The daily variation of the air temperature (Ta, °C) in different elevations

在青藏高原, 积雪对水汽浓度的日变化趋势没有影响, 但对不同层次平均水汽浓度有影响, 在有雪时水汽浓度显著地高于无雪者。这是由于积雪的融化和升华造成的。

3.2 积雪对 CO₂ 通量的影响

3.2.1 有关季节性的积雪对 CO₂ 通量的影响已经进行了大量的研究^[2,6], 这些研究认为, 当地表有积雪时, 土壤温度与 CO₂ 通量不存在相关关系, 这与本文的实验结果一致, 有积雪时, CO₂ 通量与 5 cm 土壤温度间不存在相关关系。虽然土壤表层(0~ 5 cm)的温度对植物和微生物的生命活动有着决定性的影响, 它影响土壤排放 CO₂ 的过程, 但是有雪时, 积雪的保温作用超过其冷却作用, 积雪时间越长, 保温作用愈大, 同时积

雪减少了土温的变化,使之处于一个稳定阶段。研究结果表明,当地表面有雪时,5 cm 的土温比较稳定,在-0.65~2.22 范围内波动,最大值没有超过5 ,因而影响了土壤微生物的活动。

3.2.2 CO₂ 通量与积雪时间的相关因下垫面不同而异(图3)。灌丛草甸和沼泽草甸CO₂ 通量与积雪时间相关不显著,而高寒草甸CO₂ 通量与积雪时间相关极显著,CO₂ 通量随着积雪时间的增加而下降($R^2=0.7258$, $P<0.01$),而在北极的一些研究结果表明CO₂ 通量随着积雪时间的增加呈指数增长^[4]。这是因为在北极积雪时间较长,积雪厚度大,不易融化,随着时间的延长,积雪厚度愈来愈厚,而本文的研究地点的积雪是周期性,降雪后,经过一段时间后,雪完全融化,积雪厚度随着时间的推移而减小。另外,积雪时,CO₂ 通量值显著地高于无雪者(表4)。因此,北极的CO₂ 通量随着积雪时间的延长而增加,而藏北地区CO₂ 通量则随着积雪时间的延长而减少。

3.3 积雪对不同生态系统CO₂ 交换量的影响

研究结果表明,积雪对生态系统CO₂ 交换量的影响因生态系统的性质的不同而异,其中高寒草甸CO₂ 交换量,随着积雪时间的延长呈线性降低,而高寒灌丛和高寒沼泽生态系统则不随着积雪时间的延长而降低。这可能是三个生态系统下垫面的不同所致。在灌丛草甸由于植被盖度较高,积雪没有完全覆盖地表,土壤-大气之间存在一定的气体交换通道。沼泽草甸生态系统,在冬季下垫面全是冰面,已经把土壤-大气的物质循环分成了两个较为独立的系统,因而积雪对CO₂ 交换量影响不大;高寒草甸因植被盖度低,约10~15 cm,积雪完全覆盖地表,雪将土壤-大气的物质循环隔离开,形成两个较为独立的系统。虽然积雪把土壤-大气隔离为两个独立系统,但是由于积雪增加大气中的水汽浓度,本研究结果表明,有积雪时,平均水汽通量显著地高于无雪者(图3),增加了CO₂ 交换速度,从而影响了CO₂ 通量。这个影响因生态系统类型的不同而异,沼泽和草甸在有积雪时,CO₂ 通量值显著地高于无雪者($P<0.01$),而灌丛在这两个条件下CO₂ 通量值差异不显著。

4 结 论

首次报道了运用涡度相关法测定青藏高原北部地区地表积雪与无雪时,3种植被类型的CO₂/H₂O 通量与积雪之间关系,为青藏高原高寒草甸生态系统冬季呼吸提供了一个理论依据和数据资料。结果表明:CO₂ 通量与5 cm 土温相关不显著,积雪显著地影响着青藏高原北部地区CO₂ 通量,但这种影响因生态系统类型的不同而异,高寒草甸CO₂ 交换量,随着积雪时间的延长呈线性降低,而高寒灌丛和高寒沼泽生态系统则不随着积雪时间的延长而降低,沼泽和草甸在有积雪时CO₂ 通量显著高于无雪者,而灌丛在这两个条件下CO₂ 通量值差异不显著。因此,在冬季,积雪是影响青藏高原土壤-大气CO₂ 交换量的重要因子。

参考文献

- [1] 王效科,白艳莹,欧阳志云,等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因[J]. 生态学报,2002,22: 94-103
- [2] Zimov S A, Davidov S P, Voropaev Y V, Prosiannikov S F. Planetary maximum CO₂ and ecosystem s of the north. In: V inson T S, Kolchugina T P. (eds). Proceedings of the international workshop of carbon cycling in boreal forest and subarctic ecosystem s United States Environmental Protection Agency, Corvallis, 1991. 21-34
- [3] Brooks P D, William s M W, Schmidt S K. Microbial activity under alpine snow packs, Niwot Ridge, CO. Biogeochemistry, 1996 32: 93-113
- [4] Brooks P D, Schmidt S K, William s M W. Winter production of CO₂ and N₂O from alpine tundra: environmental control and relationship to inter-system C and N fluxes[J]. Oecologia, 1997, 110: 403-413
- [5] Wickland K P, Mast M A, Striegl R G, Clow D W. Seasonal comparison of CO₂ and CH₄ fluxes from a subalpine wetland. EOS Trans Am Geophys Union Suppl, 1995 76: 231
- [6] Winston G C, Stephens B B, Sundquist E T, Hardy J P, Davis R E. Seasonal variability in CO₂ transport through snow in a boreal forest. In: Tonnessen K, Williams M, Tranter M (eds). Biogeochemistry of snow-covered catchments. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, 1995, 61-70
- [7] 李英年,赵亮,赵新全,等. 5年模拟增温后矮高草甸群落结构及生产量的变化[J]. 草地学报,2004,12: 236-239
- [8] Webb E K, Peaman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106, 85-100
- [9] 姚德良,张强,沈振西,等. 高寒草甸小气候考察研究[J]. 草地学报,2003,11: 301-305
- [10] 李英年,赵亮,古松,等. 海北高寒草甸地区能量平衡特征[J]. 草地学报,2003,11: 289-295