中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 3 期: 341 ~ 351
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子

齐玉春[①], 董云社[①*], 刘立新[②], 刘杏认[①], 彭琴[①③], 肖胜生[①③], 何亚婷[①③]

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
② 中国气象科学研究院, 北京 100081;
③ 中国科学院研究生院, 北京 100049
* 联系人, E-mail: dongys@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2009-06-20; 接受日期: 2009-11-17
国家自然科学基金重点基金(批准号: 40730105)、国家自然科学基金面上基金(批准号: 40673067, 40973057)、国家科技支撑计划重大项目(编号: 2007BAC03A11)资助

摘要 草地生态系统是中国最大的陆地生态系统, 准确测定其土壤呼吸强度对于正确评价我国陆地生态系统碳排放对大气CO_2的定量贡献具有重要意义. 利用静态暗箱法对内蒙古锡林河流域三类主要针茅属草地土壤呼吸强度进行了连续 3 年的野外测定, 比较分析了不同草地土壤呼吸速率的季节变化规律, 计算了 CO_2 年排放总量及其年内与年际变异系数, 并分别建立了土壤呼吸与温度、土壤水分因子的数值关系模式. 结果表明: 草地覆被类型的变化并没有改变土壤呼吸的季节变化规律. 各草地土壤呼吸速率均表现为较大的年内与年际变异, 尤其是在生长季, 土壤呼吸速率波动明显. 生长季土壤呼吸变异系数约为 54.0%~93.0%, 年内变异系数均在 115.0%以上, 年际变异表现为大针茅草原>贝加尔针茅草原>克氏针茅草原. 贝加尔针茅草原、大针茅草原、克氏针茅草原土壤年呼吸总量分别约为 223.62~299.24, 150.62~226.99 以及 111.31~131.55 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 呈现出递减的趋势. 从全年的尺度来看, 拟合最佳的温度因子变化分别能够解释三类草原土壤呼吸变化的 63.5%, 73.0%与 73.2%, 对应的 Q_{10} 值分别为 2.16, 2.98 与 2.40, 且各土壤温度指标 Q_{10} 值三种草地均表现为 10 cm 地温>5 cm 地温>地表温度. 从生长季尺度来看, 土壤呼吸与表层土壤含水量相关性最强, 三类草原 0~10 cm 土壤含水量的变化分别能够解释土壤呼吸变异的 95.2%, 97.4%以及 93.2%.

关键词
温带草地
针茅属(*Stipa* L.)
土壤呼吸
季节变化
年际变异
年排放量
Q_{10}
土壤水分

土壤呼吸是全球碳循环最主要的碳通量之一, 是土壤碳的主要输出途径[1]. 研究土壤呼吸及其影响因子以及其对全球变化的响应是准确计算全球碳收支、有效预测未来全球气候与环境变化的重要前提与基础.

目前已有的研究表明, 不同生物群区(Biomes)之间土壤呼吸往往存在较大差异[2~5]. 草地生态系统作为全球陆地生态系统的主体类型之一, 是我国最大的陆地生态系统, 面积约 4×10^8 hm^2, 约占我国土地总面积的40%以上. 并且类型也多种多样, 共包括18

引用格式: Qi Y C, Dong Y S, Liu L X, et al. Spatial-temporal variation in soil respiration and its controlling factors in three steppes of *Stipa* L. in Inner Mongolia, China. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0039-6

大类、38 亚类, 上千种类型[6]. 由于草原类别的繁多以及干旱与半干旱草原区土壤、微生物、水热等因子分布的高度异质性, 使得我国草地生态系统土壤呼吸的空间变异较其他生态系统更大[7,8]. 由于目前大尺度碳通量的估算几乎均是由局地样点的土壤呼吸测定结果向整个生态系统、区域甚至全球尺度外推[7], 因此, 仅通过少数几个点的研究数据来进行大尺度碳排放量的估算显然是不可行的. 为保证尺度推绎结果的准确性, 加强不同群落土壤呼吸量的准确测定与比较研究是精确估计生态系统碳源汇总量、寻找碳失踪汇的关键.

内蒙古自治区是我国温带草原的主要分布区. 以针茅属植物为建群种所组成的草原群落是中国内蒙古地带性草原植被的主体, 也是欧亚大陆草原区最典型的地带性植物群落, 其分布面积最广, 内蒙古区域内总面积达 2309.88×10^4 hm^2[9]. 在内蒙古草地植被的 13 个主要群系中, 以针茅属植物建群的就有 8 个[10]. 截至目前, 国际上对于草地土壤呼吸虽不及森林生态系统研究较多, 但近年来逐渐受到关注, 相关研究主要集中在北美、澳大利亚、新西兰以及欧洲部分国家[11~23], 其中温带草地的研究以北美居多. 对于草地群落土壤呼吸的研究主要集中于内蒙古草原、松嫩平原、青藏高原等地[24~41], 并取得了一定的研究进展. 例如: 李凌浩等[24]利用碱液吸收法对内蒙古羊草草原土壤呼吸进行了试验测定, 并探讨了气候因子对土壤呼吸的主要影响效应; 贾丙瑞等[40]利用静态箱式方法分析了放牧对草地土壤呼吸的定量影响; 陈全胜等[41]统计分析了典型草原土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的相关关系等. 但综合相关文献可以看出, 目前已有数据多为短期研究结果, 观测也多集中于生长季, 缺乏全年及较长周期的野外定位观测, 也缺乏土壤呼吸的年际比较, 更缺乏多种同属草地群落的同期对比研究.

本研究在我国内蒙古温带草原区选择了分布面积较广、具有广泛代表性的三类针茅属草地群落(克氏针茅草原、大针茅草原与贝加尔针茅草原)作为主要研究对象, 利用静态暗箱法对土壤呼吸的时空变化特征进行了连续三年的野外对比研究(非生长季也进行观测), 并对其主要驱动机制进行了初步了探讨. 重点包括: (1) 三类针茅属草地土壤呼吸季节变化动态及年际比较; (2) 三类针茅属草地生长季与年土壤呼吸总量的计算与比较; (3) 不同针茅属草地群落土壤呼吸变化对水热因子变化的响应程度分析.

1 区域概况及研究方法

1.1 试验区概况

研究区选择在内蒙古高原的锡林河流域. 该流域位于内蒙古高原东部(43°26′~44°39′N, 115°32′~117°12′E), 是我国重要的畜牧业基地, 同时也是联合国教科文组织认定的国际生物圈保护区之一. 由于本地区在气候上处于东亚季风影响的末端, 因此对气候的变化十分敏感, 是目前 IGBP(International Geosphere-Biosphere Program)全球变化研究中国东北陆地样带草原部分的核心区域[42]. 流域内保留着我国北方完整的草原类自然景观, 生物种类比较齐全, 所选三类针茅属草地群落在流域内均有分布. 其中, 大针茅(*Stipa grandis*)草原位于锡林河中游, 是流域内分布最标准、最稳定和最具代表性的一个群系, 是典型草原的主体, 如果生境趋于干旱, 大针茅常被旱生的克氏针茅(*Stipa krylovii*)所代替, 生境趋于湿润, 又被较为中旱生的贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)所取代[43]. 克氏针茅是多年生密丛型旱生禾草, 目前主要分布于锡林河下游, 是典型草原的干旱亚型, 与大针茅相比, 其分布中心区更加靠西、靠北, 直接与荒漠草原相接壤, 通常将其作为划分典型草原与荒漠草原的重要标志[44]. 与前两类草原相比, 贝加尔针茅草原生境的湿润度较高、土壤有机质的积累更加丰富, 组成建群种的多样性程度也更高, 具有较高的生物产量, 其分布中心更向东、向南, 主要分布在锡林河上游, 是内蒙古高原东部重要的放牧场和割草场[45]. 由于所选三类草地(贝加尔针茅草原, 大针茅草原, 克氏针茅草原)分布分别从锡林河上游、中游到下游, 海拔逐渐从高到低, 温度从低到高, 降水量从大到小, 因此在整个流域具有广泛的代表性. 三个采样样地具体的自然地理特征及土壤理化特性见表 1 和 2.

1.2 气体、土壤样品的采集与分析方法

2005 年 1 月~2007 年 12 月, 在所选三个试验样地利用静态暗箱法采集气体样品. 采样箱用 8 mm 厚黑色有机玻璃制成, 箱体尺寸为 50 cm(长)×45 cm(宽)× 30 cm(高). 箱外贴锡箔反光膜, 目的是避免由于太阳辐射而使箱内气温升高过快及其对土壤呼

表 1　三类针茅属草原自然地理特征比较 a)

	贝加尔针茅草原	大针茅草原	克氏针茅草原
经纬度	43°30′45″N, 116°49′38″E	43°32′20″N,116°33′15″E	44°05′12″N, 115°54′16″E
海拔(m)	1343	1130	970
地形	丘陵与高台地	低丘、台地、塔拉	平原及山前洪积扇
干燥度	0.1	1.1	1.9
1 月平均气温(℃)	−19.9	−19.5	−19.5
7 月平均气温(℃)	18	19.1	21.1
多年平均降水量(mm)	>450	350~450	250~350
年平均气温(℃)	−1.4	−0.3~1	1~2
≥10℃积温(℃)	1600~1800	1800~2000	2000~2300
草类组成	中旱生禾草＋中生杂类草	旱生禾草＋中旱生、旱生杂类草	贫杂类草旱生丛生禾草
代表植物	贝加尔针茅、线叶菊、日阴菅、羊茅、羊草、西伯利亚羽茅	大针茅, 羊草, 杂类草	克氏针茅、冷蒿、粗隐子草、星毛委陵菜、寸草苔

a) 表中数据部分引自文献[46, 47]

表 2　三类针茅属草原土壤理化性质比较 a)

草地类型	土壤类型	土壤深度	有机碳(%)	全氮(%)	碳氮比	容重(g·cm^{-3})
贝加尔针茅草原	黑钙土(壤土)	0~10 cm	2.425±0.316	0.220±0.026	11.02±0.58	1.05
		10~20 cm	2.523±0.302	0.226±0.023	11.16±0.45	
		20~30 cm	1.692±0.221	0.160±0.018	10.58±0.66	
大针茅草原	典型栗钙土(砂壤土)	0~10 cm	2.028±0.267	0.200±0.021	10.14±0.55	1.12
		10~20 cm	1.624±0.204	0.176±0.022	9.23±0.46	
		20~30 cm	1.186±0.160	0.131±0.020	9.05±0.35	
克氏针茅草原	淡栗钙土(砂壤土)	0~10 cm	1.133±0.143	0.125±0.018	9.06±0.61	1.34
		10~20 cm	1.120±0.265	0.128±0.033	8.75±0.55	
		20~30 cm	1.006±0.275	0.114±0.034	8.82±0.62	

a) 表中有机碳、全氮数据为 3 年实测数据, 数据格式为平均值±标准偏差, n=48

吸作用产生的促进效应. 对于暗箱法观测土壤呼吸通量的有效性, 相关文献均有报道[48~50].

本试验中, 采样频率在生长季为隔周采样一次, 非生长季为 1 个月 1 次. 每次气体采集三个样地在相对一致的时间采样, 采样时间多选择在上午 9~10 时左右(研究表明, 此时段采样基本上能代表一天的平均状况[51~53]). 采样时选择地势平坦的地方放置采样箱(箱内植物地上部分已于采样前一日齐地面剪掉), 每次采样每个样地设置 3 个重复. 观测时将采样箱放入已插入土壤 5 cm 深处不锈钢底座外缘四周的凹槽中, 并用蒸馏水密封, 以切断箱内外空气的自由交换. 采样箱箱盖装有空气搅拌小风扇、温度传感器以及用于采气用的硅胶导管、采气三通阀等. 每次采气持续时间为 21 min, 分别抽取盖箱后 0, 7, 14 以及 21 min 时的气体样品(非生长季则分别为 0, 10, 20 以及 30 min), 由于采样时间少于半小时, 因此对采样点自然状况基本无明显扰动. 每次采样时抽取观测箱内气体约 200 mL 置于密封气袋中, 待试验后立即将气袋带回实验室利用 Licor6252 型红外 CO_2 分析仪测定其中的 CO_2 浓度.

土壤样品采集与气体采集同步. 每次利用土钻法分 3 个层次采集(0~10, 10~20, 20~30 cm), 每个土壤样品取同层次 10 钻土样的混合样. 样品采集后, 经风干、磨细和过筛(过 100 目筛)处理后, 分别利用重铬酸钾氧化-外加热法以及凯氏定氮法测定土壤样品中的有机碳与全氮含量[54].

1.3　温度与土壤水分等环境因子的测定方法

在每次气体样品采集的同时, 同步采集大气温度, 0, 5 和 10 cm 地温, 箱内温度和土壤水分等环境数

据. 其中, 气温利用 DHM2 型通风干湿表测定, 箱内温度以及 0, 5 和 10 cm 地温利用温度传感器结合北京师范大学司南仪器厂生产的 SN2602 型数字测温仪(温度范围–199.9~50℃, 测量准确度为 0.2℃, 读数分辨率为 0.1℃)测定, 土壤表层水分利用烘干法测得.

1.4 数据分析方法

土壤呼吸速率的计算方法详见文献[32]. 对土壤呼吸速率的统计分析(Pearson 相关分析、独立样本 t 检验以及曲线估计)主要利用 SPSS11.0 软件包完成; 文中图件利用 Excel2003 绘制. 温度敏感性系数 Q_{10} 值采用目前较为常用的 Q_{10} 模型计算[55]: $Q_{10}=e^{10b}$. 式中, b 为土壤呼吸与温度指数模型($R_s=ae^{bT}$)中的拟合常数, R_s 为土壤呼吸速率, a 为拟合常数, T 为温度.

2 结果与分析

2.1 三类针茅属草原土壤呼吸季节及年际变化动态比较

图 1(a)~(c)为 2005 年~2007 年三类针茅属草原土壤呼吸速率的季节变化动态. 从图 1 可以看出, 三类草原土壤呼吸速率表现出类似的季节变化规律. 各草地群落土壤呼吸速率均在每年的 3 月份随着气温的升高逐渐上升, 4 月中下旬至 6 月上升较快, 6 月中旬至 8 月下旬始终保持较高的呼吸速率, 但期间也存在较大波动. 8 月下旬土壤呼吸速率开始逐渐下降, 之后始终保持较低的数值, 呼吸速率最低值多出现在气温较低的 12 月或 1 月, 个别年份出现在 2 月, 且 12 月~2 月土壤覆雪期出现土壤对 CO_2 气体的吸收现

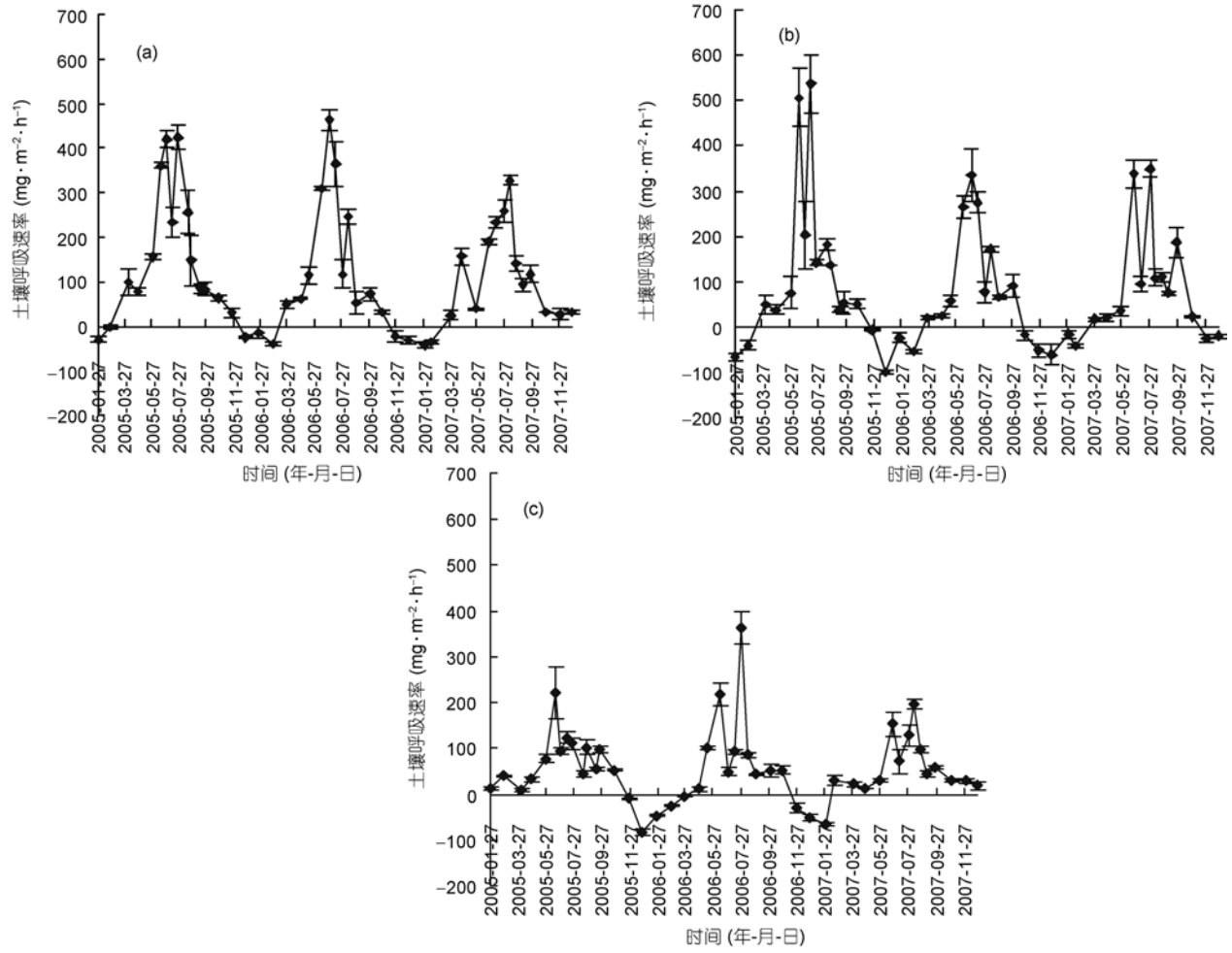

图 1 三类针茅属草地土壤呼吸速率季节变化

(a) 贝加尔针茅草原; (b) 大针茅草原; (c) 克氏针茅草原

象. 各观测年份土壤呼吸波动明显, 三个草地群落生长季土壤呼吸速率变异系数均在 54.0%~93.0%之间变动, 年内变异系数大于 115.0%, 大针茅草原个别年份更高达 200%(表 3). 此外, 从三类草原年内与年际变异的对比关系来看, 年内与年际变异均以大针茅草原最高, 年内变异贝加尔针茅草原最低, 年际变异克氏针茅草原最低. 不同年份生长季内变异以及生长季年际变异也以大针茅草原略高, 但各草地间相差不大.

2.2 三类针茅属草原土壤呼吸生长季及年排放总量比较

利用土壤呼吸速率随时间的变化曲线与时间轴间进行积分求面积的方法, 我们分别计算了三类草原不同年份土壤年呼吸量、生长季呼吸总量(表 4). 2005 年~2007 年贝加尔针茅草原土壤年呼吸总量约为 223.62~299.24 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 大针茅草原年呼吸总量约为 150.62~226.99 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 克氏针茅草原土壤年呼吸量则在 111.31~131.55 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 之间变动, 各年份土壤年呼吸量及生长季呼吸总量均表现为贝加尔针茅草原>大针茅草原>克氏针茅草原.

此外, 利用独立样本 T 检验分析了三类草地 3 年土壤呼吸速率均值间的差异显著性(表 4). 无论是全年还是仅就生长季而言, 除 2006 年外, 其他两个年份贝加尔针茅草原土壤呼吸速率均值均显著高于克氏针茅草原(α<0.05, Two-tailed), 但差异显著的这两个年份两类草原非生长季土壤呼吸差异并不显著(α>0.05), 由此可以推断, 两类草原土壤呼吸速率的差异更多地是源于生长季内土壤呼吸强度的差异. 而贝加尔针茅草原与大针茅草原以及大针茅草原与克氏针茅草原间 3 个年份全年、生长季、非生长季土壤呼吸速率均值间差异均不显著(α>0.05).

2.3 三类针茅属草原土壤呼吸对水热因子变化的响应机制分析

土壤呼吸与温度、水分条件的量化关系是深入了解土壤呼吸主要驱动机制, 正确建立相关预测模型的核心数据[56]. 研究中首先利用 Pearson 相关分析方法分别计算了 3 类草原不同年份与生长季土壤呼吸速率与水、热因子的相关系数. 从全年的尺度来看(表 5), 三类草地土壤呼吸均与各温度指标显著

表 3 不同针茅属草原土壤呼吸季节与年际变异比较 a)

	贝加尔针茅草原			大针茅草原			克氏针茅草原		
	平均值	标准偏差	变异系数(%)	平均值	标准偏差	变异系数(%)	平均值	标准偏差	变异系数(%)
2005 年	125.3	149.3	119.2	95.0	180.2	189.7	55.1	67.9	123.2
2006 年	100.6	152.0	151.1	62.8	127.6	203.2	53.3	106.7	200.2
2007 年	93.6	110.0	117.5	74.0	122.5	165.5	52.6	64.6	122.8
年际变异系数		15.6%			21.1%			2.4%	
2005 年生长季	230.0	136.9	59.5	197.5	183.7	93.0	96.6	53.3	55.2
2006 年生长季	198.9	150.6	75.7	154.0	112.4	73.0	119.3	107.0	89.7
2007 年生长季	163.7	89.3	54.6	143.9	121.5	84.4	86.4	61.2	70.8
年际变异系数		16.8%			17.2%			16.7%	

a) 平均值及标准偏差单位均为 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$

表 4 不同针茅属草原土壤呼吸生长季与年排放总量比较 a)

	年份	贝加尔针茅草原	大针茅草原	克氏针茅草原
年排放总量 ($gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$)	2005 年	299.24 a	226.99 ab	131.55 b
	2006 年	240.44 a	150.62 a	111.31 a
	2007 年	223.62 a	176.84 ab	125.69 b
	三年平均	254.43±39.70	184.82±38.80	122.85±10.41
生长季排放总量 ($gC\cdot m^{-2}$)	2005 年	224.33 a	199.04 ab	96.55 b
	2006 年	203.05 a	156.28 a	107.88 a
	2007 年	163.65 a	141.31 ab	86.47 b
	三年平均	197.01±30.79	165.54±29.96	96.97±10.71

a) 年排放总量统计时段为每年 1 月~12 月; 生长季排放总量计算时段为每年 4 月底~10 月初; 同一行字母相同代表土壤呼吸差异不显著, 字母不同代表差异显著, 显著性水平为 0.05

(α<0.05)或极显著正相关(α<0.01). 其中, 贝加尔针茅草原与克氏针茅草原土壤呼吸与 10 cm 地温的相关性最强, 大针茅草原土壤呼吸则与箱内气温及 5 cm 地温的相关性最为显著. 但从生长季尺度来看(表 6), 土壤呼吸与水分因子的相关性最强, 与温度因子相关性不显著, 甚至负相关.

2.3.1 不同针茅属草原土壤呼吸的温度敏感性比较

表 5 的相关分析结果表明, 温度是全年时间尺度下影响不同针茅属草原土壤呼吸变化的主要环境因子. 由于目前模拟土壤呼吸与温度变化关系的模型以指数模型应用最为广泛, 也最受到认可. 基于此, 本研究利用三年同期呼吸数据与温度数据的平均值进行了温度与土壤呼吸的指数拟合, 并计算了基于不同温度指标的 Q_{10} 值.

利用指数模型模拟三类针茅草原土壤呼吸与温度的关系均具有较好的拟合度, 方程拟合均达到极显著水平(α<0.01)(表 7). 其中, 贝加尔针茅与克氏针茅草原以 10 cm 地温与土壤呼吸的拟合度最高, 大针茅草原以 5 cm 地温拟合度最高, 与相关分析结果相吻合. 三类草原拟合方程的最佳拟合度 R^2 分别为 0.635, 0.730, 0.732. 利用指数模型模拟, 温度变化分别能够解释贝加尔针茅草原、大针茅草原和克氏针茅草原土壤呼吸变化的 63.5%, 73.0%与 73.2%, 对应的 Q_{10} 值分别为 2.16, 2.98 与 2.40, 表现为大针茅草原>克氏针茅草原>贝加尔针茅草原. 且从不同层次地温对应的 Q_{10} 值来看, 各草地类型均表现为 10 cm 地温>5 cm 地温>地表温度, 下层土壤比上层土壤具有更高的温度敏感性. 另外, 从图 2 可以看出, 在温度较低时, 土壤呼吸点聚集在拟合曲线附近, 而在高温时段, 土壤呼吸点相对发散, 说明低温时温度是限制土壤呼吸的主要因子, 土壤呼吸的温度敏感性较强, 而高温时, 温度对土壤呼吸的制约作用减弱, 土壤呼吸很容易受到其他环境因子的影响.

表 5 不同针茅属草原年土壤呼吸变化与水热因子的相关关系 a)

草地类型	观测年份	气温	地表温度	5 cm 地温	10 cm 地温	箱内温度	0~10 cm 土壤含水量	10~20 cm 土壤含水量
贝加尔针茅草原	2005	0.728**	0.777**	0.812**	0.827**	0.770**	–0.241	–0.314
	2006	0.624*	0.647**	0.692**	0.721**	0.638*	0.099	0.044
	2007	0.782**	0.764**	0.812**	0.812**	0.765**	–0.429	–0.472
大针茅草原	2005	0.673**	0.710**	0.745**	0.728**	0.771**	0.067	–0.135
	2006	0.794**	0.765**	0.818**	0.803**	0.826**	0.206	–0.209
	2007	0.727**	0.744**	0.737**	0.720**	0.779**	–0.123	–0.280
克氏针茅草原	2005	0.752**	0.728**	0.755**	0.765**	0.766**	0.359	0.434
	2006	0.728**	0.686*	0.732**	0.759**	0.707**	0.174	–0.369
	2007	0.665**	0.652**	0.686**	0.695**	0.658**	0.206	–0.064

a) *代表相关性达到 0.05 的显著性水平, **代表相关性达到 0.01 的显著性水平, 下同

表 6 不同针茅属草原生长季土壤呼吸变化与水热因子的相关关系

草地类型	观测年份	气温	地表温度	5 cm 地温	10 cm 地温	箱内温度	0~10 cm 土壤含水量	10~20 cm 土壤含水量
贝加尔针茅草原	2005	0.325	0.255	0.460	0.658	0.361	0.342	–0.156
	2006	–0.439	–0.296	–0.586	–0.293	–0.351	0.827*	0.777*
	2007	0.074	0.032	0.436	0.467	0.091	0.767*	0.481
大针茅草原	2005	0.415	0.426	0.567	0.513	0.612	0.923**	0.071
	2006	0.235	–0.276	–0.213	–0.474	0.321	0.817*	0.531
	2007	0.422	0.398	0.232	–0.213	0.691	0.649	0.544
克氏针茅草原	2005	0.154	–0.034	0.045	0.163	0.061	0.754*	0.826**
	2006	0.325	–0.184	0.004	0.121	0.055	0.767*	0.433
	2007	–0.060	–0.294	–0.001	0.087	–0.101	0.870	0.588

表 7　不同针茅属草原土壤呼吸与温度的拟合关系及 Q_{10} 值比较 a)

草地类型	温度指标	拟合方程	R^2	α	Q_{10}
贝加尔针茅草原	气温	$R_s=30.444e^{0.0817T}$	0.459	0.0150	2.26
	地表温度	$R_s=37.515e^{0.0537T}$	0.445	0.0180	1.71
	5 cm 地温	$R_s=43.928e^{0.0685T}$	0.577	0.0040	1.98
	10 cm 地温	$R_s=47.564e^{0.0771T}$	0.635	0.0020	2.16
	箱内温度	$R_s=31.406\ e^{0.0670T}$	0.476	0.0130	1.95
大针茅草原	气温	$R_s=9.087e^{0.1194T}$	0.628	0.0036	3.30
	地表温度	$R_s=9.493e^{0.0929T}$	0.611	0.0045	2.53
	5 cm 地温	$R_s=16.776e^{0.1092T}$	0.730	0.0008	2.98
	10 cm 地温	$R_s=21.103e^{0.1145T}$	0.670	0.0021	3.14
	箱内温度	$R_s=9.122e^{0.0970T}$	0.725	0.0009	2.64
克氏针茅草原	气温	$R_s=7.493e^{0.0960T}$	0.655	0.0014	2.61
	地表温度	$R_s=10.856e^{0.0583T}$	0.490	0.0112	1.79
	5 cm 地温	$R_s=10.974e^{0.0739T}$	0.622	0.0023	2.09
	10 cm 地温	$R_s=11.063e^{0.0877T}$	0.732	0.0004	2.40
	箱内温度	$R_s=9.852e^{0.0695T}$	0.587	0.0036	2.00

a) 表中 R_s 为土壤呼吸, T 为对应的温度指标

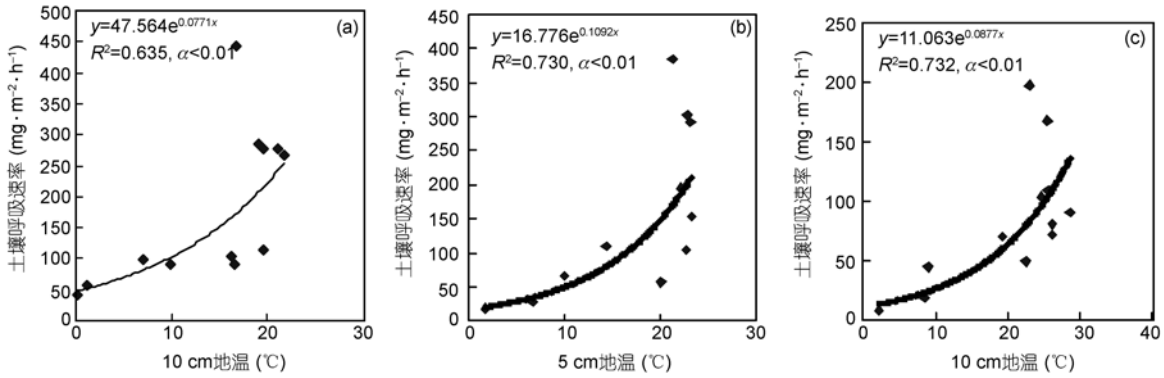

图 2　三类针茅属草原全年时间尺度土壤呼吸与温度的拟合关系

(a) 贝加尔针茅草原; (b) 大针茅草原; (c) 克氏针茅草原

2.3.2　水分因子对土壤呼吸的影响

从表 6 可以看出, 在生长季, 尤其是在气温与地温大于 10℃时段(5 月下旬~9 月下旬), 三种草地群落土壤呼吸均与 0~10 cm 土壤含水量显著相关, 而与温度的相关性较弱. 利用 3 年生长季呼吸速率与同期水分测定数据的平均值对三类草原中两者的关系分别进行了拟合, 并比较了线性、对数、幂函数和指数模型等多种拟合形式, 发现各草地类型均以线性模型的拟合效果最好(图 3), 其拟合度(R^2)均在 0.93 以上. 贝加尔针茅草原、大针茅草原以及克氏针茅草原生长季 0~10 cm 土壤含水量的变化分别能够解释土壤呼吸变异的 95.2%, 97.4%以及 93.2%.

3　讨论与结论

3.1　土壤呼吸的空间与时间变异

研究基于全年观测数据计算得到的 2005~2007 年三类针茅属草原土壤年呼吸量变动范围为 110~300 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 排放量最高的贝加尔针茅草原土壤年呼吸总量约为同期最低的克氏针茅草原呼吸总量的 1.8~2.3 倍, 且差异显著(α<0.05, Two-tailed), 区域尺度土壤呼吸存在较大空间变异. 由于国内目前已有的研究大多以生长季的采样为主, 并利用该数据外推到年[33,36,57]. 例如: 崔骁勇等[33]基于生长季观测资料利用模型估测了内蒙古大针茅草原 1995 年

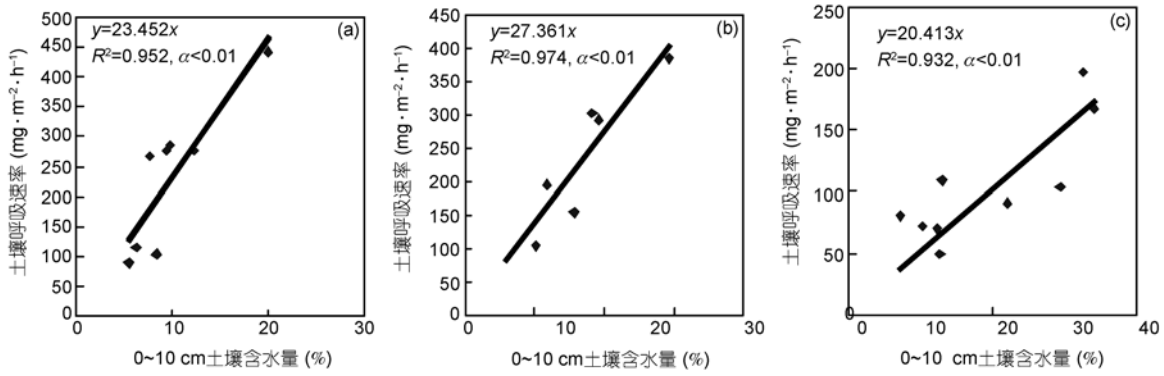

图 3　三类针茅属草原生长季土壤呼吸与土壤水分的拟合关系

(a) 贝加尔针茅草原; (b) 大针茅草原; (c) 克氏针茅草原

与1998年土壤年呼吸量分别是180与225 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 王庚辰等[57]利用 7~8 月数据推算中国两类典型草原土壤年呼吸量达 390~866 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$. 从本研究来看, 如果基于生长季数据外推到年, 三类针茅属草原土壤年呼吸平均值分别为 470.83, 394.54 与 228.40 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$, 分别较全年连续观测计算得到的年呼吸总量 254.43, 184.82, 122.85 $gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ 高 85.1%, 113.5%及 85.9%, 由此可以看出, 仅利用生长季数据计算全年土壤呼吸总量将造成很大的误差. 同时, 三类草原土壤呼吸年际变异系数多在 15.0%~22.0%之间, 因此, 在时间尺度上加强长周期、全年(生长季与非生长季)土壤呼吸的野外持续观测, 在空间尺度上加强不同草地类型的对比研究对于准确估算我国草原的区域碳排放量及其对中国陆地生态系统碳循环的定量贡献具有重要意义.

3.2　不同时间尺度下土壤呼吸驱动因子的变化

在生长季内, 三种草地类型土壤呼吸对于水分变化均较对温度变化的响应更加敏感. 这是因为, 生长季内大部分时段温度均处于土壤呼吸的适宜温度范围, 而水分则与之相反. 由于试验区处在温带半干旱气候带, 土壤水分长期处于较低的水平, 其中, 贝加尔针茅草原与大针茅草原 3 年土壤表层含水量多低于 10.0%, 克氏针茅草原多低于 6.0%, 因此, 尽管生长季内土壤温度条件适宜土壤有机质的矿化与根系的呼吸作用, 但由于较低土壤水分的限制, 降低了本应随着温度上升的土壤呼吸量[58], 使得土壤水分的变化较温度条件的变化对土壤呼吸强度的影响更显著, 成为影响土壤呼吸强度变化的主要制约因子. 而从全年的尺度看, 由于研究区位于锡林郭勒高平原, 冬季寒冷漫长, 从 10 月下旬至翌年 4 月初, 日平均气温均低于 0℃(东部锡林河上游地区日平均气温小于 0℃天数约为 160 天, 西部下游区为 150 天左右)[46], 因此, 研究区域内约有半年的时间气温均远远低于土壤微生物活动的最适温度范围(10~30℃), 使得土壤中微生物和植物根系的活动都受到温度条件的强烈制约, 土壤呼吸强度较低, 甚至表现为土壤对 CO_2 气体的吸收. 由于生长季较高的温度对应着较高的土壤呼吸强度, 非生长季较低的温度对应着较低的土壤呼吸强度, 两者表现出较强的协同变化, 因此从全年的尺度来看, 土壤呼吸变化与温度变化表现为显著正相关. 由于土壤呼吸在生长季对温度条件的响应不敏感, 这种响应可能将会缓冲未来气候变暖条件下呼吸旺盛时段 CO_2 排放速率的增加幅度, 从而将在一定程度上降低土壤呼吸对全球变暖的正反馈, 除非生长季土壤水分条件有明显的改善.

3.3　温度敏感性指标的选择

Q_{10} 值是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的重要指标. 但利用不同的温度指标计算得到的 Q_{10} 值通常存在一定差异, 究竟利用何种温度指标计算 Q_{10} 值, 目前仍没有统一的结论. 如: Pavelka 等[59]认为地表温度与土壤呼吸拟合方程的拟合度最好; 而 Rayment 和 Jarvis[60]则认为 5 cm 地温与土壤呼吸的相关性最好; Norman 等[61]通过三个观测点的试验结果表明 10 cm 地温是影响土壤呼吸的最主要因子, 土壤呼吸对其的敏感性最强, 并建立起基于 10 cm 地温, 0~10 cm 土壤含水量以及叶面积指数的土壤呼吸经验预测模

型. 本研究中, 从不同层次地温对应的 Q_{10} 值来看, 各温度指标对应的 Q_{10} 值相差较大, 表现出随深度增加温度敏感性增强的趋势. 由于不同土壤温度指标计算得到的 Q_{10} 值差异较大, 因此, 我们今后在比较不同地区或不同生态系统土壤呼吸温度敏感性的研究结果时, 其采用的温度指标应该给予充分的关注, 同时, 当利用土壤温度预测土壤呼吸变化时, 寻找适宜的土壤温度指标对于有效降低预测误差至关重要.

3.4 土壤呼吸温度敏感性的主要影响因素

本研究中, 三类针茅属草原基于不同气温与地温数据计算得到的 Q_{10} 值在 1.71~3.30 之间变动, 其中, 基于最优拟合指数方程计算得出的 Q_{10} 值分别为 2.16, 2.98 与 2.40, 表现为大针茅草原>克氏针茅草原>贝加尔针茅草原. 从贝加尔针茅草原、大针茅草原到克氏针茅草原, 其年均气温虽然呈现下降的趋势, 但并没有呈现出部分研究得出的温度与 Q_{10} 之间的负相关关系[62~64], 相反年平均气温较低的贝加尔针茅草原 Q_{10} 值反而低于另两类针茅草原. 分析原因, 主要是水分与温度匹配状况对温度敏感系数的影响. 贝加尔针茅草原由于海拔较高且降水条件较好, 夏季降水时常伴有较低的日均气温, 但由于此时温度仍处于土壤呼吸的适宜范围, 因此, 在水分较好的条件下, 其土壤呼吸值仍保持较高的水平, 低温对应的高呼吸值大大降低了土壤呼吸的温度敏感性. 此外, 陈全胜等[25]基于夏秋季(6 月初~10 月中旬)气温计算得到的 4 种未退化草地群落及 7 种退化草地群落的 Q_{10} 值为 1.47~1.84. 李玉强等[65]得到的科尔沁沙地 6 月~9 月不同生境沙地灌丛草地 Q_{10} 值分别为 2.34(固定沙丘)、1.99(半固定沙丘)、1.31(流动沙丘), 远低于本研究的 Q_{10} 值. 产生这种差异首先是因为本研究计算 Q_{10} 值所利用的是全年的观测数据, 温度变化范围较大, 而其他研究多采用的只是生长季特别是 6~10 月份高温时段的数据. 温度较高时, 土壤呼吸受温度的制约减弱, 相应地呼吸强度对温度的敏感性也会大大降低; 另一方面, 退化草地以及沙地草地较低的土壤碳氮含量、沙地草地较低土壤水分也在一定程度上减弱了本应随着温度上升而增加的土壤呼吸幅度, 相应减低了 Q_{10} 值. 由此可以看出, 温度、水分、温度与水分的匹配状况、土壤有机碳含量及其有效性等对于土壤呼吸的敏感性均有显著影响, 因此, 计算得到的 Q_{10} 值不仅描述的只是土壤呼吸对温度变化的敏感程度, 同时也是对水分、土壤呼吸底物等变化敏感性的反映. 由于温度较低比温度较高时具有更高的敏感性, 水分较好的群落 Q_{10} 值高, 水分较差的群落 Q_{10} 值也较低[41], 因此, 在未来全球变化的背景下, 气候变暖对于低温地区与低温季节要比对高温地区及高温时段的影响更显著, 对于水分相对充裕区域土壤 CO_2 的排放的影响可能也会超过干旱区域. 同时, 受有机碳有效性的影响, 土壤呼吸强度也并不会随着温度的升高而无限增加, 当持续升温一定时间后, 土壤呼吸可能会因为土壤活性有机碳的迅速消耗而升高缓慢, 对温度的敏感性降低. 但有人认为这种推断没有考虑到惰性有机碳对温度的响应, 惰性有机碳的温度敏感性要大于活性有机碳[66~68], 但对此不同研究者也存在不同[69~71]甚至相反的意见[72], 因此, 加强有机碳不同组分对温度变化的敏感性研究也是正确预测未来气候变化趋势下土壤呼吸反馈强度的重要基础.

致谢 孟维奇老师在土壤样品分析中付出了辛苦的劳动, 3 名匿名审稿专家对本论文提出了许多建设性的意见与建议, 中国科学院内蒙古草地生态系统定位研究站对本研究的野外工作给予了大力支持与帮助, 在此一并致谢.

参考文献

1 Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, 2000, 48: 7—20
2 Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. Tellus, 1992, 44B: 81—99
3 Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. Biogeochemistry, 2000, 48: 71—90
4 Li L H, Han X G, Wang Q B, et al. Correlations between plant biomass and soil respiration in *Leymus chinensis* community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. Acta Bot Sin, 2002, 44: 593—597

5 Craine J W, Wedin D A, Chapin F S. Predominance of ecophysiological controls on soil CO_2 flux in a Minnesota grassland. Plant Soil, 1999, 207: 77—86
6 李毓堂. 草地资源开发与未来中国可持续发展战略. 中国草地, 2001, 23: 64—66
7 Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO_2 efflux in a Mediterranean semiarid steppe. Appl Soil Ecol, 2003, 23: 199—209
8 Schlesinger W H, Pilmanis A M. Plant-soil interactions in deserts. Biogeochemistry, 1998, 42: 169—187
9 陈世鐄, 李银鹏, 孟君, 等, 内蒙古几种针茅特性和生态地理分布的研究. 内蒙古农牧学院学报, 1997, 18: 40—46
10 韩冰. 克氏针茅种群分化及不同退化系列生态变异的研究. 博士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003. 10
11 Frank A B, Dugas W A. Carbon dioxide fluxes over a northern, semiarid, mixed-grass prairie. Agric For Meteorol, 2001, 108: 317—326
12 Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. Soil Biol Biochem, 2002, 34: 1235—1241
13 Kabwe L K, Hendry M J, Wilson G W, et al. Quantifying CO_2 fluxes from soil surfaces to the atmosphere. J Hydrol, 2002, 260: 1—14
14 Flanagan L B, Johnson B G. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. Agric For Meteorol, 2005, 130: 237—253
15 Norton U, Mosier A R, Morgan J A, et al. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA. Soil Biol Biochem, 2008, 40: 1421—1431
16 Sims P L, Bradford J A. Carbon dioxide fluxes in a southern plains prairie. Agric For Meteorol, 2001, 109: 117—134
17 Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. Nature, 2001, 413: 622—625
18 Jones S K, Rees R M, Skiba U M, et al. Greenhouse gas emissions from a managed grassland. Glob Planet Change, 2005, 47: 201—211
19 Soussana J F, Allard V, Pilegaard K, et al. Full accounting of the greenhouse gas (CO_2, N_2O, CH_4) budget of nine European grassland sites. Agric Ecosyst Environ, 2007, 121: 121—134
20 Allard V, Soussana J F, Falcimagne R, et al. The role of grazing management for the net biome productivity and greenhouse gas budget (CO_2, N_2O and CH_4) of semi-natural grassland. Agric Ecosyst Environ, 2007, 121: 47—58
21 Holt J A. Grazing pressure and soil carbon, microbial biomass and enzyme activities in semi-arid northeastern Australia. Appl Soil Ecol, 1997, 5: 143—149
22 Wang W J, Dalal R C, Moody P W, et al. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. Soil Biol Biochem, 2003, 35: 273—284
23 Brown M, Whitehead D, Hunt J E, et al. Regulation of soil surface respiration a grazed pasture in New Zealand. Agric For Meteorol, 2008, doi: 10.1016/j.agrformet.2008.08.005
24 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. 植物生态学报, 2000, 24: 680—686
25 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应. 植物生态学报, 2003, 27: 441—447
26 杜睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 静态箱法原位观测草原 CO_2 通量的探讨. 生态学报, 2002, 22: 2167—2174
27 Jia B, Zhou G, Wang Y, et al. Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia. J Arid Environ, 2006, 67: 60—76
28 王娓, 郭继勋. 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放 CO_2 贡献量. 生态学报, 2002, 22: 655—660
29 Zhang Y, Li L H, Wang Y F, et al. Comparison of soil respiration in two grass-dominated communities in the Xilin River Basin: Correlations and controls. Acta Bot Sin, 2003, 45: 1024—1029
30 陈四清, 崔骁勇, 周广胜, 等. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO_2 排放速率研究. 植物学报, 1999, 41: 645—650
31 Dong Y S, Qi Y C, Liu J Y, et al. Emission characteristics of carbon dioxide in the semiarid *Stipa grandis* steppe in Inner Mongolia, China. J Environ Sci, 2006, 18: 488—494
32 Qi Y C, Dong Y S, Domroes M, et al. Comparison of CO_2 effluxes and their driving factors between two temperate steppes in Inner Mongolia, China. Adv Atmos Sci, 2006, 23: 726—736
33 崔骁勇, 陈四清, 陈佐忠. 大针茅典型草原土壤 CO_2 排放规律的研究. 应用生态学报, 2000, 11: 390—394
34 师广旭, 耿浩林, 王云龙, 等. 克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原土壤呼吸及其影响因子. 生态学报, 2008, 28: 3408—3416
35 陈海军, 王明玖, 韩国栋, 等. 不同强度放牧对贝加尔针茅草原土壤微生物和土壤呼吸的影响. 干旱区资源与环境, 2008, 22: 165—169
36 陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量与 CO_2 通量. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 553—563
37 张宪洲, 石培礼, 刘允芬, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO_2 排放及其碳平衡. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 II): 193—199
38 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 退化草地暗沃寒冻雏形土 CO_2 释放的日变化和季节动态. 土壤学报, 2001, 38: 32—40
39 曹广民, 李英年, 张金霞, 等. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO_2 的释放量. 环境科学, 2001, 22: 14—19

40 贾丙瑞, 周广胜, 王风玉, 等. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较. 应用生态学报, 2004, 15: 1611—1615
41 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系. 生态学报, 2004, 24: 831—836
42 张新时, 周广胜, 高琼, 等. 全球变化研究中的中国东北森林-草原陆地样带(NECT). 地学前缘, 1997, 4: 145—151
43 田青松. 锡林郭勒典型草原四种禾草的繁殖生态学. 博士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2002. 16—17
44 耿浩林. 克氏针茅群落地上/地下生物量分配及其对水热因子响应研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2006. 16—17
45 王明玖. 内蒙古贝加尔针茅草原群落植物繁殖生态学研究. 博士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2000. 6
46 李博, 雍世鹏, 李忠厚.锡林河流域植被及其利用.见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站, 编. 草地生态系统研究第三集. 北京: 科学出版社, 1988. 84—183
47 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000. 1
48 董云社, 章申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO_2, N_2O, CH_4 通量的同时观测及其日变化. 科学通报, 2000, 45: 318—322
49 邹建文, 黄耀, 郑循华, 等. 基于静态暗箱法的陆地生态系统-大气 CO_2 净交换估算. 科学通报, 2004, 49: 258—264
50 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO_2 浓度增高影响稻田-大气 CO_2 净交换的静态暗箱法观测研究. 应用生态学报, 2002, 13: 1240—1244
51 杜睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 箱法在草地温室气体通量野外实验观测中的应用研究. 大气科学, 2001, 25: 61—70
52 Xu M, Qi Y. Soil-surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young Ponderosa Pine plantatioin in northern California. Glob Change Biol, 2001, 7: 667—677
53 Kessavalou A, Mosier A R, Doran J W, et al. Fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. J Environ Qual, 1998, 27: 1094—1104
54 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983
55 Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. Glob Change Biol, 1998, 4: 217—227
56 Curiel Y J, Janssens I A, Carrara A, et al. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. Glob Change Biol, 2004, 10: 161—169
57 王庚辰, 杜睿, 孔琴心, 等. 中国温带典型草原土壤呼吸特征的实验研究. 科学通报, 2004, 49: 692—696
58 Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. Plant Soil, 1997, 190: 127—141
59 Pavelka M, Acosta M. Marek M V, et al. Dependence of the Q_{10} values on the depth of soil temperature measuring point. Plant Soil, 2007, 292: 171—179
60 Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO_2 efflux in a Canadian boreal forest. Soil Biol Biochem, 2000, 32: 35—45
61 Norman J M, Garcia R, Verma S B. Soil surface CO_2 fluxes and the carbon budget of a grassland. J Geophys Res, 1992, 97: 18845—18853
62 Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. Soil Biol Biochem, 1995, 27: 753—760
63 Qi Y, Xu M, Wu J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: Nonlinearity begets surprises. Ecol Model, 2002, 153: 131—142
64 Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B. Modelling respiration of vegetation: Evidence for a general temperature-dependent Q_{10}. Glob Change Biol, 2001, 7: 223—230
65 李玉强, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地夏秋(6-9 月)季不同类型沙丘土壤呼吸对气温变化的响应. 中国沙漠, 2008, 28: 249—254
66 Knorr W, Prentice I C, House J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. Nature, 2005, 433: 298—301
67 Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 2006, 440: 165—173
68 Hartley L P, Ineson P. Substrate quality and the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. Soil Biol Biochem, 2008, 40: 1567—1574
69 Reichstein M, Kätterer T, Andrén O, et al. Temperature sensitivity of decomposition in relation to soil organic matter pools: Critique and outlook. Biogeosciences, 2005, 2: 317—321
70 Fang C M, Smith P, Moncrieff J B, et al. Similar response of liable and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. Nature, 2005, 433: 57—59
71 Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic matter decomposition-still a topic of debate. Soil Biol Biochem, 2006, 38: 2510—2518
72 Thornley J H M, Cannell M G R. Soil carbon storage response to temperature: A hypothesis. Ann Bot, 2001, 87: 591—598