

三江平原典型土地利用类型土壤呼吸强度对温度的敏感性

廖艳^{1,2}, 崔军^{1,3}, 杨忠芳¹, 夏学齐¹, 赵秀芳⁴

LIAO Yan^{1,2}, CUI Jun^{1,3}, YANG Zhong-fang¹, XIA Xue-qi¹, ZHAO Xiu-fang⁴

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;

3. 新疆地勘局第六地质大队地质调查所, 新疆 哈密 839000;

4. 山东省第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276006

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. College of Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. The Geological Survey of the Sixth Geological Team, Bureau of Geological Exploration and Development of Xinjiang, Hami 839000, Xinjiang, China;

4. Seventh Institute of Geology and Mineral Exploration, Linyi 276006, Shandong, China

摘要:采用实验室恒温培养方法对三江平原3种不同土地利用类型开发后的沼泽土和草甸土进行了温度敏感性研究。研究结果表明,在5℃、15℃、25℃和35℃4种不同温度条件下,各土壤类型的土壤呼吸速率均随温度的升高而增大。在同一温度条件下,3种土壤呼吸强度由弱到强依次是:草甸土-旱地<草甸土-水田<沼泽土-人工林。指数模型和乘幂模型均可以较好地描述沼泽土和草甸土土壤呼吸与温度之间的关系,土壤呼吸强度随温度的升高呈指数或乘幂上升。3种土壤的 Q_{10} 值呈现出随温度升高而降低的趋势,表明土壤呼吸在较低温度下的温度敏感性更高。对未添加植物残体的纯土壤组和添加了植物残体的对照组进行对比研究,发现添加植物残体后土壤呼吸强度大大增强,因此野外实际的土壤呼吸强度要比通常室内实验中去除植物残体后所测定的土壤呼吸强度更高。

关键词:三江平原;土壤呼吸;温度敏感性系数

中图分类号:S153.62, X14

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2012)01-0164-08

Liao Y, Cui J, Yang Z F, Xia X Q, Zhao X F. Temperature sensitivity of soil respiration from the typical land-use types in the Sanjiang Plain, northeastern Heilongjiang Province. *Geological Bulletin of China*, 2012,31(1):164-171

Abstract: Temperature sensitivity of soil respiration of the samples from different land-use types in the Sanjiang Plain was studied using the laboratory incubation method. The results show that, at four different temperature conditions of 5 °C, 15 °C, 25 °C and 35 °C, soil respiration rates of all the soil types increase with the increasing temperature. Under the same temperature condition, the three types of soils are in order of increasing respiration intensities of meadow soil-dry land < meadow soil-paddy field < bog soil-plantation. Both of the exponential model and the power model can be used to describe the relationship between soil respiration and temperature of the soils, which means that soil respiration intensity increases exponentially or as power function with the increasing temperature. The Q_{10} values of the three kinds of soils show a trend of decreasing with increasing temperature, which suggests that the temperature sensitivity of soil respiration is higher at the lower temperature. By the comparative incubation experiments on the pure soil without plant residues and the control group with plant residues, the authors found that soil respiration is greatly enhanced with additional plant residues, so the actual soil respiration in the field is higher than that measured in the laboratory in which plant residues are usually removed.

Key words: Sanjiang Plain; soil respiration; temperature sensitivity coefficient

收稿日期:2011-02-09;修订日期:2011-11-21

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项《中国主要农耕地土壤碳库与固碳潜力研究》(编号:200911020)和中国地质调查局项目《中国典型地区土壤碳汇源转化机理研究》(编号:水[2010]03-07-07)

作者简介:廖艳(1978-),女,博士,地球化学专业。E-mail: ly_liaoyan@163.com

土壤中储存了 1550Pg 的有机碳,约是大气碳库 760Pg 的 2.04 倍、陆地植被碳库 620Pg 的 2.50 倍^[1-3]。由于储量巨大,土壤碳储量的微量变化也将对大气碳库产生较大的影响^[4-5]。土壤呼吸(soil respiration)是土壤在新陈代谢过程中产生并释放 CO₂ 的过程,这一过程使进入到土壤中的有机质被分解并以 CO₂ 的形式返回到大气中。Kirschbaum^[6]、周运超等^[7]搜集不同文献中土壤培养的资料和数据,建立了不同地带土壤有机碳分解对温度变暖的响应关系。此后,野外实地测试、土体加热或实验室培养等方法被用于研究不同地区土壤呼吸对气候变暖的反馈作用,其中实验室培养方法由于能够比较容易地控制温度同时排除湿度等其它因素的影响,成为目前测量土壤呼吸温度敏感性的最可靠方法^[8]。许多研究结果表明,土壤呼吸随温度升高而增强,而且低温下土壤呼吸对温度变暖的响应更为显著^[8-9]。

三江平原地处气候寒冷的中高纬度地带,包括在北半球中高纬度地带陆地生态系统这一个巨大的碳汇区内^[10]。作为将土壤碳素返回到大气中主要途径的土壤呼吸,如何影响土壤碳库储存从而响应气候日益增暖的趋势,是一个值得探索的问题。因此,许多学者对该区土壤碳库及其变化作了大量的研究。张文菊等^[11]研究了三江平原泥炭沼泽、腐殖质沼泽、沼泽化草甸有机碳组分与分布的特征,计算了这 3 种主要土壤类型的有机碳密度。刘子刚等^[12]讨论了三江平原由于人工开发造成的土壤碳储量变化。杨钙仁等^[13]利用实验室培养方法研究了温度和冻融效应对三江平原典型湿地土壤矿化速率的影响。然而,新中国成立以来,三江平原经过大面积的开发成为旱地、水田或人工林地^[12],这种开发后的土壤的温度敏感性如何,还没有研究报道。本文选择经过人工开发利用后的沼泽土(bog soil)和草甸土(meadow soil)这 2 种三江平原分布最为广泛的土壤类型,采用实验室恒温培养的方法,消除水分、野外凋落物输入、局地环境差异等因素的影响,对不同温度梯度下有机碳分解的温度敏感性进行探索,以认识其在气候变暖趋势中可能发挥的作用。

1 实验材料与方法

1.1 研究区概况

三江平原位于黑龙江省东部,是东北平原的一部分,为黑龙江、乌苏里江和松花江 3 条大江汇流冲

积形成的,在地质构造上是新华夏构造体系第二隆起带北端的一个拗陷带,地理范围为 130°13'~135°05'E、45°01'~48°27'N。三江平原属温带湿润、半湿润大陆性季风气候,1 月均温为 -21~-18℃,7 月均温为 21~22℃,全年无霜期 120~140 天;年均降水量为 500~650mm,其中 75%以上的降水集中在 6~10 月份,雨热同季适于农业耕作,主要农作物有小麦、大豆、水稻、玉米等。三江平原地势广阔低平,平均海拔仅 50~60m,地表分布有大面积的沼泽水体和沼泽化土壤、植被,是中国最大的沼泽分布区。土壤类型主要为沼泽土、草甸土、暗棕壤、黑土、白浆土等,土质肥沃,但需要进行排水和改良的工作;苔草、芦苇、小叶章、沼柳等是主要的植被类型。此外,三江平原还有丰富的鸟禽资源和泥炭资源。土壤采样地佳木斯位于三江平原腹地,是国家重要的商品粮基地。新中国成立以来,三江平原耕地面积在不断增加,从 1949 年的 $78.8 \times 10^4 \text{hm}^2$ 增加到 1994 年的 $457.2 \times 10^4 \text{hm}^2$,与此同时沼泽湿地大幅度地减少,从 $534 \times 10^4 \text{hm}^2$ 减至 $148.2 \times 10^4 \text{hm}^2$ 。人为地开垦开发使三江平原的土地利用、土壤、生态环境等各方面都受到较大的影响^[12]。

1.2 实验设计与数据分析

草甸土和沼泽土是三江平原分布最为广泛的土壤类型。选择采自佳木斯的沼泽土和草甸土样品,土地利用方式为水田、旱地和人工林地。这些土壤经过了 20 年以上的人工利用,可以代表经过人工开发后的沼泽土或草甸土。采样信息见表 1。

采用碱液吸收法进行土壤呼吸测试^[14]。先将土壤风干,拣出植物残体后过 20 目筛,称取 50g 置于呼吸瓶内;加水调节至土壤田间持水量的 70%,在其后的培养过程中定期补充水分,以保持含水量恒定不变;密封后放入 5℃、15℃、25℃和 35℃温度条件的培养箱内进行恒温培养。每一温度条件每种土壤样品均设置 3 个重复样,此外每一温度条件下还设有 3 个空白样。采用 0.8mol/L 的 NaOH 液进行 CO₂ 吸收。经过一定时长的培养(最初为 2 天,16 天以后改为 3 天,28 天以后改为 7 天),将 NaOH 吸收液转出,换上新的吸收液;转出的 NaOH 液加入过量 5mol/L 的 CaCl₂ 溶液,然后以酚酞为指示剂,用 0.6mol/L 的草酸溶液进行滴定;通过滴定所消耗的草酸量计算出吸收的 CO₂ 量,从而求出土壤呼吸强度。共培养 92 天。

表 1 采样信息和土样基本理化性状

Table 1 Sampling information and basic physical and chemical properties of soil samples

点位编号	土壤类型	土地利用类型	有机碳含量/%	含水量/%	植物残体含量/g·kg ⁻¹	经纬度	采样时间	采样地点
JDHT01-2	沼泽土	人工林地	8.57	20.05	63.3	131°35' 39.0 " 47°08' 02.6 "	2010-01-05	佳木斯富锦市
JDHT02-1	草甸土	旱地	2.44	8.77	39.1	131°20' 56.9 " 47°07' 23.2 "	2010-01-05	佳木斯桦川县
JDHT02-2	草甸土	水田	1.99	9.32	11.7	131°19' 09.1 " 47°07' 01.1 "	2010-01-05	佳木斯桦川县

采用添加了植物残体与未添加植物残体的土壤样品进行土壤呼吸速率对比研究。未添加植物残体的纯土壤样品组为 5g, 对照组在 5g 纯土壤中另外添加 0.15g 的植物凋落物并混合均匀, 即对照组样品中含有约 3%的植物残体。进行对比研究的 2 组置于 25℃恒温箱中培养, 碱液吸收的方法同前面 3 组样品的实验, 共培养了 49 天。

土壤呼吸速率与温度之间的关系已有很多模型对其进行过研究。本文采用了 2 种模型, 一种是指数 (exponential) 模型^[9,15], 一种是乘幂 (power) 模型^[16]。公式如下:

$$R_s = \alpha e^{\beta T} \tag{1}$$

$$R_s = \alpha (T+10)^\beta \tag{2}$$

式中: R_s 表示土壤呼吸速率 (mg/kg·d), 即 CO_2 释放强度; T 为培养温度 (°C); α 和 β 是方程参数。

温度敏感性系数 Q_{10} 是温度每升高 10℃时土壤呼吸增大的倍数。 Q_{10} 值有不同的计算方法, 本文采用以下的公式进行计算:

$$Q_{10}^{\frac{T_2-T_1}{10}} = \frac{R_2}{R_1} \tag{3}$$

式中: R_2 和 R_1 分别为温度 T_2 和 T_1 时的土壤呼吸速率 (mg/kg·d)。

2 实验结果

2.1 不同温度条件下土壤有机碳的分解特征

从图 1 和表 2 可以看出, 在 92 天的培养期间, CO_2 释放强度在培养之初达最大, 之后不断下降, 经 1 个月左右的时间大致达到稳定。在 5℃、15℃、25℃和 35℃ 4 种不同温度条件下, 各土壤类型的土壤呼吸速率均随温度的升高而增大。在同一温度条件下, 3 种土壤呼吸强度由弱到强依次是: 草甸土—

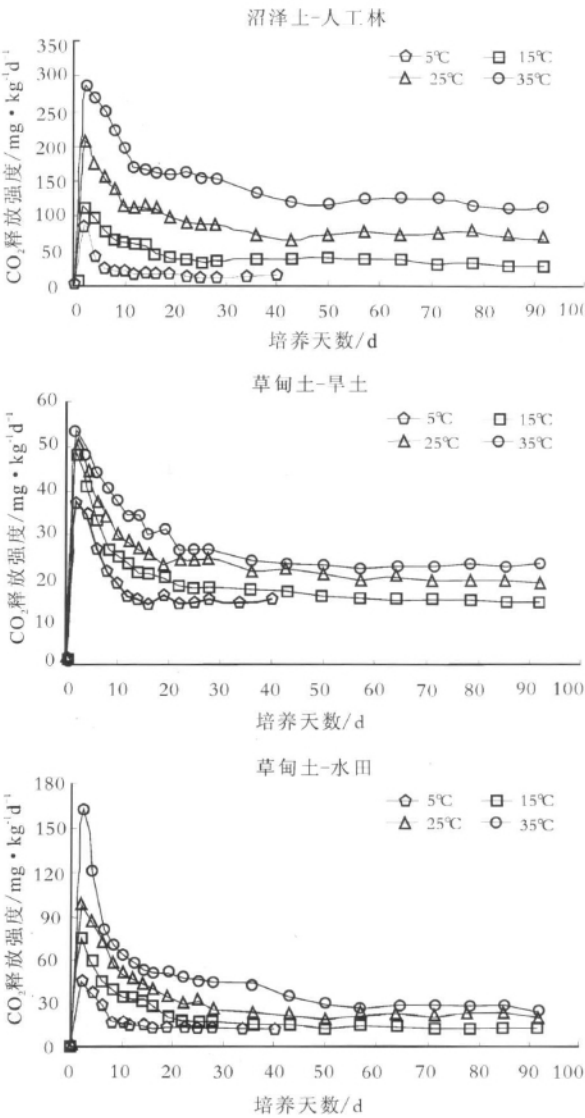


图 1 不同温度条件下土壤呼吸强度比较 (5℃土壤培养时间为 40 天)

Fig. 1 Comparison of soil respiration intensities under different temperature conditions

表 2 不同时段内土壤呼吸强度、有机碳累积分解量及其占总分解量的比例
Table 2 Soil respiration intensity, accumulated decomposition amount of organic carbon
and its proportion to the total decomposition amount during different periods

所测项目	培养天数	沼 泽 土-人 工 林				草 甸 土-旱 地				草 甸 土-水 田			
		5℃	15℃	25℃	35℃	5℃	15℃	25℃	35℃	5℃	15℃	25℃	35℃
呼吸强度 /mgCO ₂ ·kg ⁻¹ ·d ⁻¹	半个月(14d)	17.60	59.14	112.20	166.32	14.96	21.12	26.40	34.32	14.08	32.74	43.12	52.80
	1 个月(28d)	13.20	36.08	88.00	153.12	14.96	17.60	24.56	26.40	13.20	17.60	26.60	44.00
	2 个月(57d)		38.77	79.20	124.84		15.51	19.61	22.06		14.77	22.63	26.28
	3 个月(92d)		29.42	69.39	114.15		14.33	18.86	23.38		12.07	20.74	24.89
有机碳累积 分解量/mgC·kg ⁻¹	半个月(14d)	128.64	295.25	555.76	853.30	91.68	118.51	136.84	159.31	95.52	174.82	247.55	330.91
	1 个月(28d)	186.12	443.97	915.54	1461.53	147.96	189.84	229.21	265.77	145.80	250.47	370.26	514.51
	2 个月(57d)		758.96	1503.81	2443.87		319.49	395.42	447.29		365.22	542.19	782.30
	3 个月(92d)		1074.32	2212.90	3580.52		460.76	581.69	666.17		486.50	756.18	1051.33
占总分解 量的比例/%	半个月(14d)	54.39	27.48	25.11	23.83	46.90	25.72	23.52	23.91	50.93	35.93	32.74	31.48
	1 个月(28d)	78.69	41.33	41.37	40.82	75.69	41.20	39.40	39.89	77.74	51.48	48.96	48.94
	2 个月(57d)		70.65	67.96	68.25		69.34	67.98	67.14		75.07	71.70	74.41
	3 个月(92d)		100.00	100.00	100.00		100.00	100.00	100.00		100.00	100.00	100.00

注:5℃土壤培养时间为 40 天,故累积分解量占总分解量的比例为占 40 天培养期间分解总量的比例

旱地<草甸土-水田<沼泽土-人工林。

沼泽土-人工林土壤是 3 种样品中土壤呼吸强度最大的土壤类型,培养 1 个月后,5℃时呼吸强度为 13.2mg/kg·d,15℃时约为 36.08mg/kg·d,25℃和 35℃时分别为 88.00mg/kg·d 和 153.12mg/kg·d (表 2),呼吸强度不断增大。沼泽土(bog soil)发育环境大都为长期积水的低洼地,季节性或常年的土壤渍水使土壤常处于嫌气状态,湿生植物死亡后留在土壤中的有机残体因而分解程度不高;此外,沼泽土土地利用类型为人工林地,林地可为土壤提供凋落物^[17],从而使土壤中易积累丰富的有机质,在 3 种培养土样中,沼泽土的有机碳含量分别是旱地和水田利用类型草甸土的 3.5 和 4.3 倍。土壤中易积累有机质,甚至形成泥炭(peat)。草甸土(meadow soil)虽属半水成土,也受到地下水或潜水的浸润,但相对沼泽土已经较少处于嫌气状态。沼泽土呼吸强度要高于其它 2 种草甸土,与沼泽土在实验室培养中脱离渍水条件,因而土体中所储存丰富的有机碳分解大大加速有关。

图 2 显示了不同温度条件下 3 种土壤的有机碳累积分解量曲线。在同一温度条件下,分解总量最高的是沼泽土-人工林,其次是草甸土-水田土壤,草甸土-旱地类型最低。在培养 3 个月以后,在不同温度即 15℃、25℃和 35℃条件下,沼泽土-人工林土壤

有机碳累积分解量分别为 3939mg/kg、8114mg/kg 和 13129mg/kg,草甸土-水田土壤有机碳累积分解总量分别达到约 1784mg/kg、2773mg/kg 和 3855mg/kg,而草甸土-旱地土壤则分别为 1689mg/kg、2133mg/kg 和 2443mg/kg。

表 2 还给出了培养过程中分别在第 14 天、28 天、57 天,即在培养了大致半个月、1 个月、2 个月时分解量占 92 天(3 个月)培养期间 CO₂ 总释放量的百分比。前 1 个月的时间里,沼泽土-人工林土壤有机碳分解量占到总分解量的 40.82%~41.37%,草甸土-旱地和草甸土-水田土壤的有机碳分解量分别占其总分解量的 39.40%~41.20%和 48.94%~51.48%,是较快速分解的时期,其后分解速率减缓,土壤呼吸趋于平稳。

2.2 土壤呼吸对温度的敏感性

采用指数模型 $R_s = \alpha e^{T/\beta}$ (公式(1))和乘幂模型 $R_s = \alpha(T+10)^\beta$ (公式(2))分别模拟了沼泽土和草甸土土壤呼吸速率与温度的关系,结果见表 3。这 2 种模型模拟的结果较为接近,其中指数模型 R^2 介于 0.2588~0.7856 之间,乘幂模型 R^2 介于 0.2453~0.7929 之间,且土壤呼吸与温度变化之间的相关关系均为极显著相关水平,可知土壤呼吸与温度之间的关系用这 2 种模型均可以进行较好的描述,即土壤呼吸强度随温度的升高呈指数或乘幂上升。

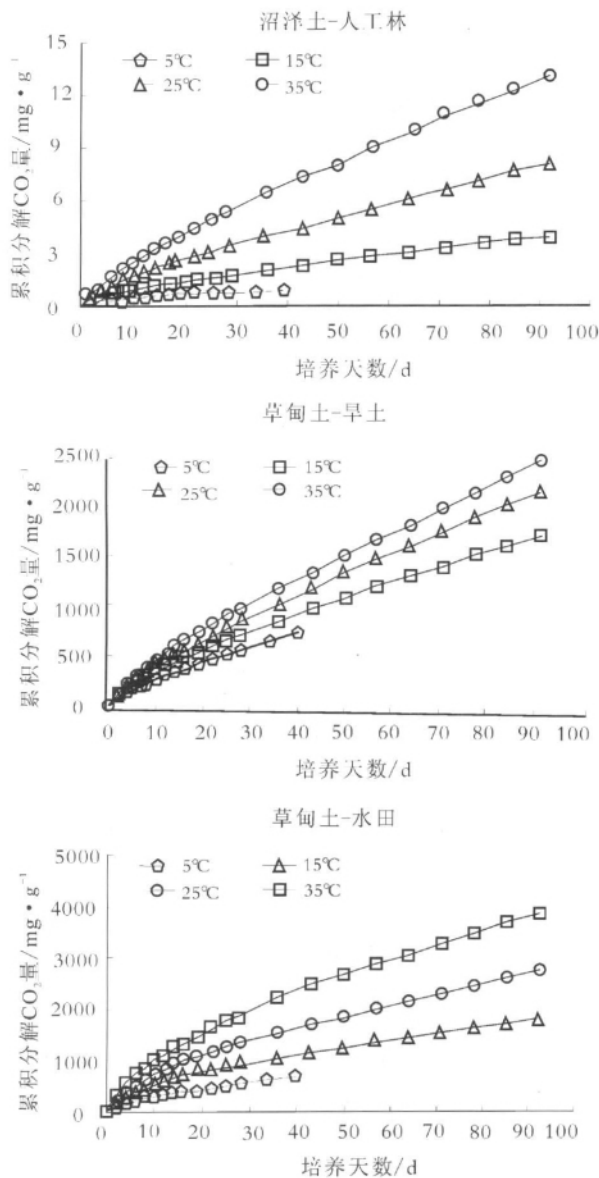


图2 不同温度条件下土壤有机碳累积分解量的特征
Fig. 2 Characteristics of accumulated decomposition amount of soil organic carbon under different temperature conditions

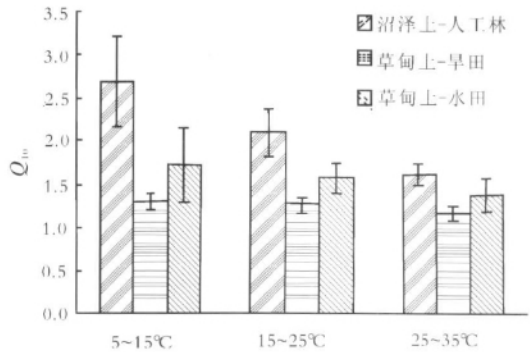


图3 温度敏感性系数 Q_{10} 柱状图
Fig. 3 Histogram of temperature sensitivity coefficient Q_{10}

采用公式(3)分别计算了 5~15℃、15~25℃和 25~35℃下温度敏感性系数 Q_{10} 的值,同时计算出了其标准偏差,结果见图 4 和图 2。沼泽土在 3 种土壤中温度敏感性系数最高。随着温度从 5℃、15℃、25℃分别升高 10℃, 沼泽土—人工林 Q_{10} 的值由 2.69 ± 0.53 分别降至 2.10 ± 0.27 和 1.62 ± 0.12 。其它 2 种草甸土 Q_{10} 值也呈现相同的随温度升高而降低的趋势,并且草甸土的水田利用类型的温度敏感性高于旱地利用类型。土壤呼吸对温度的敏感性在较低温度下更高,这与很多研究结果相一致^[13,18]。当然也有研究发现, Q_{10} 的值并不随温度的变化而改变,这样气候变暖能持续地增加土壤的呼吸速率^[19]。图 4 为 Q_{10} 值在 92 天的培养过程中随时间的分布,可以看出 Q_{10} 值随时间呈现出一定的波动,在培养前期即前 20 天内波动明显,这种波动性在其它研究中也出现^[13],与培养前期土壤中活性有机碳含量较多因而微生物获得较多养分变得较为活跃有关。

2.3 植物残体影响下的土壤呼吸

用未添加植物残体的纯土壤组和添加了植物残体的对照组在 25℃恒温条件下培养,进行土壤呼吸速率对比研究。其中,纯土壤样品组为 5g,对照组

表 3 土壤呼吸速率与温度之间的指数、乘幂拟合

Table 3 Exponential and power fitting between soil respiration rate and temperature

土壤类型	指数 (exponential) 模型				乘幂 (power) 模型			
	α	β	R^2	p	α	β	R^2	p
沼泽土-人工林	16.335	0.0672	0.7856	<0.01	0.1199	1.8799	0.7929	<0.01
草甸土-旱田	16.296	0.0167	0.2588	<0.01	5.0417	0.453	0.2453	<0.01
草甸土-水田	13.806	0.0349	0.3611	<0.01	1.1845	0.9475	0.3441	<0.01

注: α 、 β 、 R^2 、 p 均为模拟方程的参数

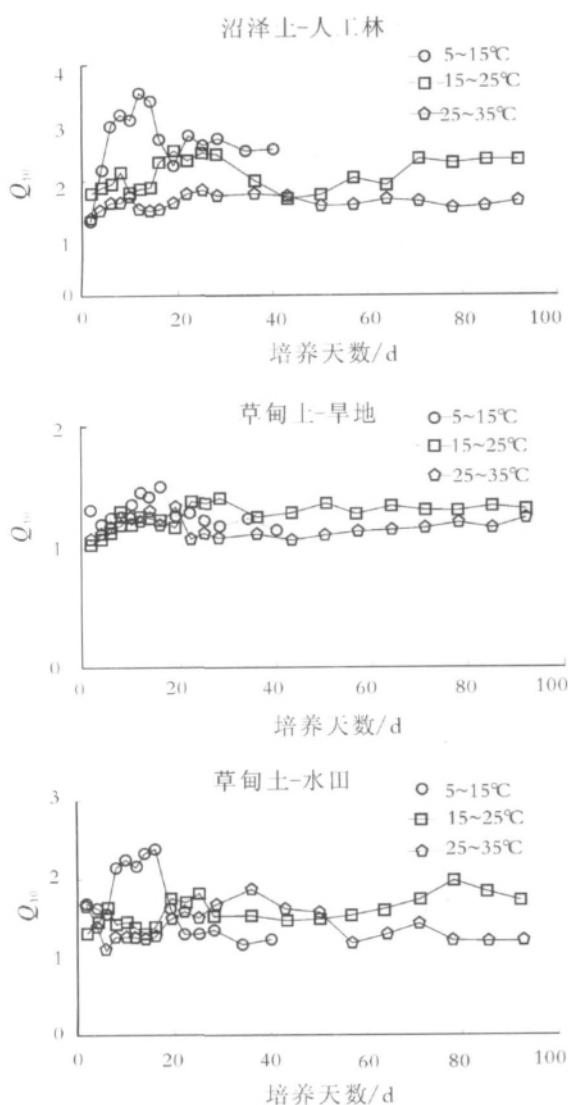


图 4 培养期间温度敏感性系数 Q_{10} 的分布特征
(5°C 培养时间为 40 天)

Fig. 4 Distribution characteristics of temperature sensitivity coefficient Q_{10} during the incubation

为含有 3% 植物残体的 5.15g 土壤, 3 种土壤植物残体在原土样中的含量, 沼泽土-人工林为 6.33%, 旱地和水田利用类型的 2 种草甸土分别为 3.91% 和 1.17%。

图 5 显示, 3 种土壤的呼吸速率(CO_2 的释放强度)依次为 $74.8 \sim 145.2 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$ 、 $15.2 \sim 43.1 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$ 和 $11.3 \sim 56.3 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$, 沼泽土-人工林土壤呼吸速率最高, 各类土壤呼吸速率随时间变化具有逐渐降低的趋势。从图 5 中可以看到, 添加植物残体后的对照组土壤呼吸强度大大增强, 对照组的 3 种土壤呼

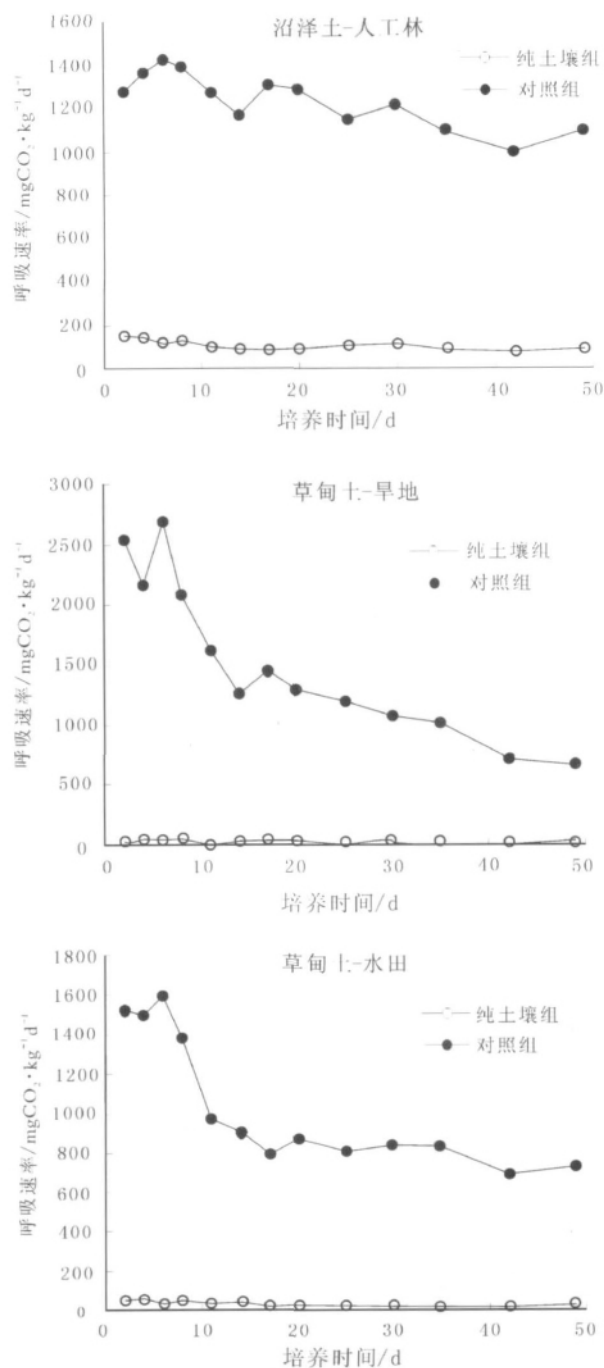


图 5 纯土壤组和对照组土壤呼吸速率比较

Fig. 5 Comparison of soil respiration rates between pure soil group and control group

吸速率分别达到 $995.75 \sim 1423.49 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$ 、 $674.12 \sim 2678.26 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$ 和 $688.81 \sim 1599.27 \text{ mg/kg} \cdot \text{d}$, 远远超过未添加植物残体的土壤呼吸强度。其中草甸土-旱地土壤的纯植物残体增加幅度尤为显著, 这可能与旱地上草甸土的植物本身品种富含有机质或者有

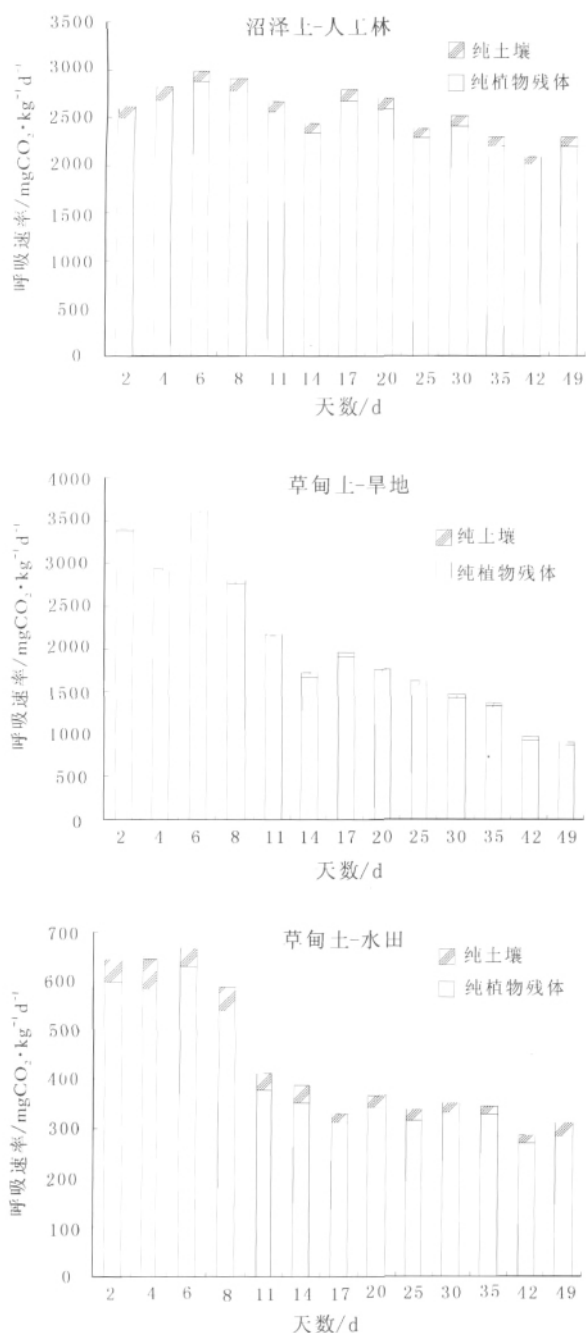


图6 纯土壤和纯植物残体对土壤呼吸强度的贡献比例构成

Fig. 6 Component ratios of contribution to soil respiration intensity by pure soil and pure plant residue

机质易于分解有关。植物残体可为微生物活动提供丰富的有机质基质,这也说明野外实际的土壤呼吸强度,要比通常的室内实验中采用去除植物残体后土壤样品所测定的土壤呼吸强度更高。

图6显示了3种土壤类型分别由纯土壤和纯植物残体向大气释放 CO_2 量的构成差异。不同种类植物残体的分解速率快慢不一^[20],野外土壤中植物残体含量水平也有所不同,这是引起碳释放构成上明显差异的原因所在。3种土壤植物残体在原土样中含量都较高,且植物残体呼吸速率也较高,故3种土壤向大气的碳释放主要为植物残体的贡献,其中旱地草甸土植物残体贡献达到98%以上,沼泽土为95%以上,水田草甸土植物残体贡献为91%~97%。

3 结论

(1)在92天的培养期间, CO_2 释放强度在培养之初达最大,之后不断下降,经1个月左右的时间大致达到稳定。在 5°C 、 15°C 、 25°C 和 35°C 这4种不同温度条件下,各土壤类型的土壤呼吸速率均随温度的升高而增大。在同一温度条件下,3种土壤呼吸强度由弱到强依次是:草甸土-旱地<草甸土-水田<沼泽土-人工林。

(2)采用指数模型和乘幂模型均可以较好地描述沼泽土、草甸土土壤呼吸与温度之间的关系,土壤呼吸强度随温度的升高呈指数或乘幂上升。随着温度升高,3种土壤的 Q_{10} 值呈现出随温度升高而降低的趋势,可知土壤呼吸在较低温度下的温度敏感性更高。

(3)用未添加植物残体的纯土壤组和添加了植物残体的对照组对比研究的结果是,添加植物残体后的土壤呼吸强度大大增强,3种土壤中草甸土-旱地的纯植物残体增加幅度尤为显著。原土样向大气的碳释放主要为植物残体的贡献,其中旱地草甸土植物残体贡献达到98%以上,沼泽土为95%以上,水田草甸土植物残体贡献为91%~97%。故此野外实际的土壤呼吸强度,要比通常室内实验中采用去除植物残体后土壤样品所测定的土壤呼吸强度更高。

致谢:感谢中国地质大学(北京)地质微生物实验室、地球化学实验室提供良好的实验条件和蒋宏忱、冯海艳等老师的指导、帮助。

参考文献

- [1]朱连奇,朱小立,李秀霞.土壤有机碳研究进展[J].河南大学学报(自然科学版),2006,36(3):72-75.
- [2]Eswaran H E, Van Den Berg E V, Reich P. Organic carbon in soils of the world[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57:

- 192-194.
- [3]史学军, 陈锦盈, 潘剑君, 等. 几种不同类型土壤有机碳库容大小及周转研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6):123-127.
- [4]Cao M, Woodward F. Dynamic responses of terrestrial carbon cycling to global climate change[J]. Nature, 1998, 393:249-252.
- [5]Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44B:81-99.
- [6]Kirschbaum M F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, 27:753-760.
- [7]周运超, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区 3 种水稻土不同温度培养中有机碳库变化及其对升温的响应[J]. 环境科学, 2003, 24(1):46-51.
- [8]Kirschbaum U F M. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming[J]. Biogeochemistry, 2000, 48:21-51.
- [9]Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413:622-625.
- [10]Tans P, Fung I P, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget[J]. Science, 1990, 247(4949): 1431-1438.
- [11]张文菊, 吴金水, 肖和艾, 等. 三江平原典型湿地剖面有机碳分布特征与积累现状[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 558-563.
- [12]刘子刚, 张坤民. 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 788-791.
- [13]杨钙仁, 张文菊, 董成立, 等. 温度对湿地沉积物有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 243-248.
- [14]Yang L X, Pan G X, Yuan S F. Predicting dynamics of soil organic carbon mineralization with a double exponential model in different forest belts of China[J]. Journal of Forestry Research, 2006, 17(1): 39-43.
- [15]高人, 唐英平, 杨玉盛, 等. 杉木人工林和水稻田土壤呼吸 Q_{10} 值的影响因素初探[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(4): 9-14.
- [16]Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tall-grass prairie in Missouri[J]. Ecology, 1971, 52: 912-915.
- [17]刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 469-476.
- [18]罗光强, 耿元波. 温度和水分对羊草草原土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1938-1943.
- [19]Kang S, Doh S, Lee D, et al. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea[J]. Global Change Biology, 2003, 9:1427-1437.
- [20]吴庆标, 王效科, 欧阳志云. 活性有机碳含量在凋落物分解过程中的作用[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1295-1299.

更正

(1)本刊 2011 年第 12 期刊登的庞守吉等《祁连山冻土区天然气水合物科学钻探试验井中侏罗统的沉积学特征》一文,作者因前期分析和认识不足,原文中图 2~图 4 和有关的文字叙述存在错误。现在本文的电子版已得到改正,请读者参阅。作者向读者致歉。

(2)本刊 2011 年第 12 期刊登的郭星旺等《祁连山冻土区 DK1 钻孔天然气水合物测井响应特征和评价》一文,第 1 作者的单位是中铝能源有限公司,第 2 作者的单位是中国地质科学院矿产资源研究所,现在本文的电子版已得到改正。编辑部向作者和读者致歉。

本刊编辑部