

DOI: 10.5846/stxb201301170115

李娇,尹春英,周晓波,魏宇航,高巧,刘庆.施氮对青藏高原东缘窄叶鲜卑花灌丛土壤呼吸的影响.生态学报,2014,34(19):5558-5569.

Li J, Yin C Y, Zhou X B, Wei Y H, Gao Q, Liu Q. Effects of nitrogen addition on soil respiration of *Sibiraea angustata* shrub in the eastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5558-5569.

施氮对青藏高原东缘窄叶鲜卑花灌丛土壤呼吸的影响

李 娇^{1,2}, 尹春英^{1,*}, 周晓波³, 魏宇航¹, 高 巧¹, 刘 庆¹

(1. 中国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室,
生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 四川省理县林业局, 理县 623100)

摘要:开展土壤呼吸对大气氮沉降增加的响应研究对预测陆地生态系统碳循环具有重要意义。采用外施氮肥模拟氮沉降,结合壕沟法分离土壤呼吸组分,研究青藏高原东缘主要的灌丛类型——窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)灌丛土壤呼吸对不同施氮水平(N_0 (对照)、 N_2 、 N_5 和 N_{10} 分别相当于0、2、5和10 g N m⁻² a⁻¹浓度的氮沉降)的短期响应。结果表明:试验期间(2012年5—10月份), (1)土壤呼吸呈现明显的季节变化,施氮对生长季土壤总呼吸、异养呼吸无显著影响,而对自养呼吸有显著的抑制作用($P<0.05$)。 (2)土壤呼吸也存在显著的日变化,施氮对一天中土壤总呼吸及其组分均有显著影响($P<0.001$)。总体上,施氮促进了土壤总呼吸、异养呼吸,而抑制了自养呼吸。 (3)施氮对土壤总呼吸、异养呼吸平均每月排放CO₂通量无显著影响,而对自养呼吸平均每月排放CO₂通量有显著的抑制作用($P<0.05$),并在不同月份对土壤呼吸及其组分的影响不同。 (4)土壤总呼吸、异养呼吸与地下5 cm土壤温度之间具有较好的指数关系($P<0.001$),而与土壤含水量相关性较弱。关于土壤呼吸各组分对大气氮沉降响应差异的机理有待进一步研究。

关键词:窄叶鲜卑花灌丛;施氮;土壤总呼吸;异养呼吸;自养呼吸; Q_{10}

Effects of nitrogen addition on soil respiration of *Sibiraea angustata* shrub in the eastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau

LI Jiao^{1,2}, YIN Chunying^{1,*}, ZHOU Xiaobo³, WEI Yuhang¹, GAO Qiao¹, LIU Qing¹

1 Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Lixian Forestry Bureau, Sichuan, Lixian 623100, China

Abstract: The response of soil respiration to the increasing nitrogen deposition plays an important role in predicting carbon cycle of terrestrial ecosystems. To date, however, few studies have been addressed to soil respiration changes in shrub ecosystem compared with forest and grassland ecological system. In this study, we subjected *Sibiraea angustata* shrub ecosystem, the main type in the eastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau, to four nitrogen addition levels practiced within 5 m×5 m plot: N_2 (2 g N m⁻² a⁻¹), N_5 (5 g N m⁻² a⁻¹), N_{10} (10 g N m⁻² a⁻¹) and N_0 (control, add the same volume of water without nitrogen in other treatments), respectively. Ditching method was used to separate the different components of soil respiration. Plant root respiration was defined as autotrophic respiration, while soil microbial and animal respirations were defined as heterotrophic respiration. Changes of soil respiration to the short-time N addition were measured during the growing season, with the soil moisture at 5 cm and 10 cm depth measured at the same time. The results showed: (1) Soil

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050303);国家自然科学基金项目(31070533);中国科学院方向项目(KSCX2-EWJ-22);国家科技支撑计划专题(2011BAC09B04-01)

收稿日期:2013-01-17; 网络出版日期:2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yincy@cib.ac.cn

respiration (total, heterotrophic and autotrophic respiration) showed apparent seasonal variation during the experimental period (2012.5—2012.10). During the growth season, nitrogen addition had no significant effects on total and heterotrophic respiration ($P>0.05$), while it remarkably inhibited the autotrophic respiration ($P<0.05$). It turned out that the soil respiration rates under N_2 and N_{10} treatment was lower than N_0 treatment by 0.31 and 0.23 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. Meanwhile, the soil respiration rates under N_5 and N_0 treatment exhibited no obvious difference. (2) Soil respiration (the total, heterotrophic and autotrophic respiration) showed apparent diurnal variation. Nitrogen addition had significant effects on the total, heterotrophic and autotrophic respiration ($P<0.001$) in the whole day. Nitrogen addition remarkably promoted the heterotrophic respiration, with soil respiration rates under N_2 , N_5 and N_{10} treatment were higher than N_0 treatment by 0.81, 0.84 and 1.50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, while it remarkably inhibited the autotrophic respiration, indicating that the soil respiration rates under N_2 , N_5 and N_{10} treatment was lower than N_0 by 0.46, 0.99 and 0.48 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectively. (3) On the whole, nitrogen addition significantly inhibited soil carbon dioxide emissions of autotrophic respiration over the experimental period ($P<0.05$), showing that the carbon dioxide emissions under N_2 and N_{10} treatment was lower than N_0 treatment by 11.75, 8.50 $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$. Nitrogen addition had a significant effect on the soil carbon dioxide emissions of autotrophic respiration in May and July, but the influence of different nitrogen concentration was not regular, while it promoted the soil carbon dioxide emissions of heterotrophic respiration only in May. (4) The total and heterotrophic respiration showed significant exponential correlation with the soil temperature at 5 cm depth ($P<0.001$), and the nitrogen addition strongly affected the sensitivity of soil respiration to temperature change. Besides, the soil respiration showed a weaker correlation with the soil moisture compared with temperature, which demonstrated that the soil moisture might not be the limiting factor to the soil respiration in the experimental region. The soil respiration is the main link in carbon cycle of terrestrial ecosystems, and the increasing nitrogen deposition would affect soil respiration deeply through a series of biochemical processes. Therefore, the underlying mechanism of how the components of soil respiration response to N deposition still needs further study.

Key Words: *Sibiraea angustata* shrub; nitrogen addition; total soil respiration; heterotrophic respiration; autotrophic respiration; Q_{10}

土壤呼吸是土壤向大气释放 CO_2 的过程,是陆地生态系统碳循环的主要环节,其每年向大气释放的 CO_2 高达 68—80 Pg,是全球化石燃料燃烧 CO_2 释放量的 10 倍以上^[1]。土壤呼吸的变异性与诸多因子有关,不同群落类型的植物组成、分层结构、环境条件和土壤环境等因子都不完全一样,因而群落的土壤呼吸也必然完全不同^[2]。土壤呼吸包括 3 个生物学过程(根呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸)和一个化学氧化过程,化学氧化过程在土壤呼吸中占的比例很小,一般不考虑。因此,土壤呼吸可分为自养呼吸(植物根系呼吸)和异养呼吸(土壤微生物和动物呼吸)^[3]。各组分占整个土壤呼吸的比例因群落类型和结构特征的差异而不同,一般而言,森林根系呼吸量约占森林呼吸量的 40%,草地及灌木根系呼吸量占 20%—30%,对所有植被而言平均约为 24%^[4]。

青藏高原东缘大气氮沉降十分明显(8.7—13.8 $\text{kg N hm}^{-2} \text{a}^{-1}$),并呈逐年增加的趋势^[5]。大气氮沉

降会通过一系列生化过程影响 CO_2 的释放,首先,大气氮沉降会改变土壤 C/N 比,影响微生物活性、数量和结构特征,从而影响土壤呼吸速率。其次,大气氮沉降影响植物营养器官的 C/N 比,对凋落物分解过程和强度造成影响^[6]。关于模拟氮沉降对土壤呼吸的影响研究很多,大量数据表明土壤呼吸速率在模拟施氮的条件下会有所提高^[7-8],也有研究发现,施氮对土壤呼吸速率的影响会随着施氮时间的推移表现出抑制作用^[9],其中,区分土壤呼吸各组分对施氮的响应研究较少^[10-11],是今后研究的重点。

陆地生态系统作为人类居住和活动的主要场所,其碳贮存量约为大气碳库的 2 倍^[4],灌丛生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,在陆地生态系统碳循环研究中扮演了重要角色,而关于灌丛生态系统土壤呼吸的研究远远少于森林和草原。对于川西高山和亚高山地区来说,灌丛群落是该地水土保持的重要植被,研究灌丛群落土壤呼吸对大气氮沉降的响应机理意义重大,同时为指导川西高山和

亚高山地区的植被人工诱导恢复提供理论支持。窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)是青藏高原的特有种,我国青海南部、甘肃东南部、西藏东南部和四川西部均有分布,是青藏高原东缘高山灌丛中独特的、具有代表性的优势植物^[12]。基于此,本试验采用人工施氮的方法,结合壕沟法分离土壤呼吸组分,研究不同施氮处理对窄叶鲜卑花灌丛生态系统土壤呼吸各组分的影响,并分析土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量的相关关系,以期研究高寒灌丛生态系统土壤碳动态提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省松潘县川主寺镇卡卡沟(北纬 32°48', 东经 103°31', 海拔 3300 m),地势低平,坡度约 20°。气候类型为高原山地气候,冬长无夏,昼夜温差大,垂直差异明显,年平均气温为 4.8℃,年平均降雨量为 693.2 mm,降水量年较差大。植被覆盖率高,主要是温带、寒温带植物。本区域灌丛主要类型包括窄叶鲜卑花、山生柳(*Salix oritrepha* C. K. Schneider)、高山绣线菊(*Spiraea alpina* Pallas)、金露梅(*Potentilla fruticosa* Linnaeus)等,试验选择以窄叶鲜卑花为优势种的灌丛群落类型,其灌木层包括窄叶鲜卑花、红花岩生忍冬(*Lonicera rupicola* var. *syringantha* (Maximowicz) Zabel)、高山绣线菊和金露梅,草本层包括羊茅(*Festuca ovina* Linnaeus)、条纹龙胆(*Gentiana striata* Maximowicz)、黄花野青茅

(*Deyeuxia flavens* Keng)、钟花报春(*Primula sikkimensis* J. D. Hooker)等。

1.2 试验设计

本试验于 2012 年 5—10 月份进行。试验采用随机区组设计,选取 4 个 5 m×5 m 的小区组成一个区组,整个试验样地由 5 个区组组成,小区之间和区组之间的距离分别在 5 m 和 10 m 左右,并且保证整个样地四周有 10 m 以上的缓冲区,最终形成一个长约 60 m,并沿坡度方向延长约 40 m 的监测样地。在每个小区中挖掘 1 m×1 m 的断根小区,壕沟深度大约 1 m(植物根系分布层以下),用厚的塑料布贴在壕沟周围后将土回填,目的是隔离周围根系,剪除壕沟内地表活体植物,放置土壤呼吸测量基座(土壤异养呼吸),入土 3 cm 左右,在长期监测过程中保证壕沟内无活体植物,以免对监测数据产生影响。同时,在壕沟外设置 1 m×1 m 根系保留小区,并放置土壤呼吸测量基座(土壤总呼吸)^[13]。参照本区域实际氮沉降量(8.7—13.8 kg N hm⁻² a⁻¹)^[5],每个区组的 4 个小区分别设置 N₀(施等量的水,作为对照)、N₂(2 g N m⁻² a⁻¹)、N₅(5 g N m⁻² a⁻¹)、N₁₀(10 g N m⁻² a⁻¹) 4 种水平的施氮控制实验。从 2012 年 3 月份开始,每月施肥 1 次,根据不同养分梯度,将硝酸铵(分析纯, NH₄NO₃ ≥ 99.0%)溶于 20 L 水混合均匀,于晴天傍晚用背式喷雾器均匀地喷洒在对应小区灌丛下,对照区喷洒相同量的水。试验样地设计如图 1 所示。

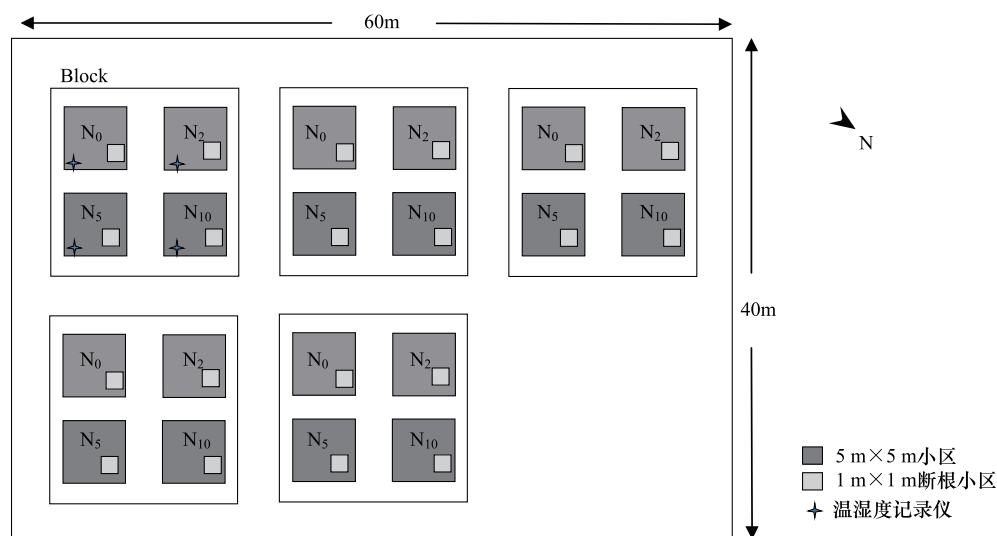


图 1 试验样地设计

Fig.1 Schematic representation of the experimental design

1.3 小气候数据监测

在一个区组中的 4 个小区里,依次在地下 5 cm、10 cm 及 30 cm 处放置纽扣式温度记录仪 1 个,记录仪感应器朝下,并在地上 10 cm 处放置纽扣式温湿度记录仪。记录仪测定频率为每 30 min 测定 1 次,并自动输出数据存储于记录仪中,每月拷贝 1 次数据。试验选取 2012 年 3—10 月份监测到的空气温湿度和土壤温度数据进行分析。

1.4 土壤呼吸测定

土壤呼吸速率的测定采用动态密闭气室红外 CO_2 分析法 (IRGA),测定仪器为美国 LI-COR 公司的 LI-6400 便携式 CO_2 分析仪。在样地布置 6 个月后开始测量,测定前 1d,清除壕沟内残存的地表活体植物并齐地剪除壕沟外土壤呼吸基座里的绿色植物,整个试验期间,土壤呼吸基座保持不变。于 2012 年 5—10 月份进行测定,每月中旬在合适的天气条件下,于 9:00—18:00 依次测定 5 个区组的土壤呼吸速率,每个区组按 N_0 、 N_2 、 N_5 、 N_{10} 四种施氮水平的顺序依次进行测定,连续测 3d。同时在试验期间测定 1 次土壤呼吸日进程(每隔 2h 测定 1 次),在样地的 3 个区组中进行测定。每次测定时,用 TRIME-HD 手持式读表测定土壤呼吸基座内地下 5、10 cm 土壤体积含水量。

1.5 数据处理与统计分析

自养呼吸速率通过土壤总呼吸速率与异养呼吸速率的差值获得。利用 SPSS16.0 软件进行统计分析,首先对数据进行异质性检验,符合正态分布后进行双因素方差分析 (Two-way ANOVA),分析施氮和时间对土壤呼吸各组分的影响,利用 LSD 方法进行多重比较,利用相关分析研究土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系。其中异养呼吸日动态变化经过平方根转换后符合正态分布。土壤呼吸与土壤温度之间的关系采用指数模型: $y = ae^{bx}$,式中 y 是土壤呼吸速率, a 是土壤温度为 0 °C 时的土壤呼吸速率, b 为温度反应系数, x 为温度。 Q_{10} 值通过下式确定: $Q_{10} = e^{10b}$, b 为温度反应系数。

2 结果与分析

2.1 空气、土壤温度和含水量的季节变化

观测结果表明,地上 10 cm 空气温度和地下 5、10、30 cm 土壤温度均具有明显的季节变化,从 4 月

下旬开始上升,于 8 月中旬达到最大,分别为 14.27、14.66、13.92 °C 和 13.05 °C,之后开始下降。其中,空气温度变化幅度最大,地下 30 cm 土壤温度变化幅度最小,两者之差的最大值出现在 4 月下旬,为 4.37 °C,最小值出现在 6 月中旬,为 0.17 °C。5 月下旬—8 月下旬,地下 5 cm 土壤温度高于地上 10 cm 空气温度。3 月下旬之前和 8 月下旬以后,地上 10 cm 空气温度低于地下 5、10、30 cm 土壤温度(图 2)。

地上 10 cm 空气湿度和地下 5、10 cm 土壤含水量也有明显的季节变化,但变化幅度均较小(图 2B)。空气湿度最低值出现在 4 月中旬,为 73.19%,此后,随着降水量的增多,空气湿度开始波动上升。5 月中旬,土壤开始解冻,积雪融化,地下 5、10 cm 土壤含水量达到最大,分别为 25.22%、38.59%,于 7、8 月份土壤含水量最低,可能与植物净光合能力加强消耗土壤水分增多有关。

2.2 施氮对土壤呼吸季节变化的影响

在 2012 年 5—10 月份试验期间,土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸月平均速率均呈明显的季节动态(表 1, F_M , $P < 0.01$)。总体上,夏季 7、8 月份土壤呼吸速率较高,春季 5、6 月份或秋季 9、10 月份较低。在整个生长季中,施氮对土壤总呼吸、异养呼吸无显著影响 ($P > 0.05$),而对自养呼吸有显著的抑制作用 (F_N , $P < 0.05$),具体表现为: N_2 、 N_{10} 处理的土壤呼吸速率分别较对照低 0.31、0.23 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,而 N_5 与对照差异不明显。此外,施氮对土壤呼吸及其组分的影响不随季节变化而不同 ($F_{N \times M}$, $P > 0.05$)。

整个试验期间,土壤呼吸各组分在整个碳释放过程中所占的比例是不一样的。异养呼吸占土壤总呼吸的比例较大,约为 60%—88%;自养呼吸较少,约为 12%—40%。说明异养呼吸是土壤总呼吸的重要组成部分,其微小变化可能影响土壤呼吸在整个陆地生态系统碳循环中的作用。

2.3 施氮对土壤呼吸日变化的影响

土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率也呈现出明显的日动态(表 2, F_T , $P < 0.001$)。总体上,土壤总呼吸最高值出现在 14:00—18:00,异养呼吸最高值出现在 12:00—20:00,而自养呼吸日动态变化波动较大。一天中,施氮对土壤总呼吸有显著影响 (F_N , $P < 0.001$),总体而言,施氮促进了土壤总呼吸,但不同浓度的氮添加对其影响也不同,表现为: N_2 、

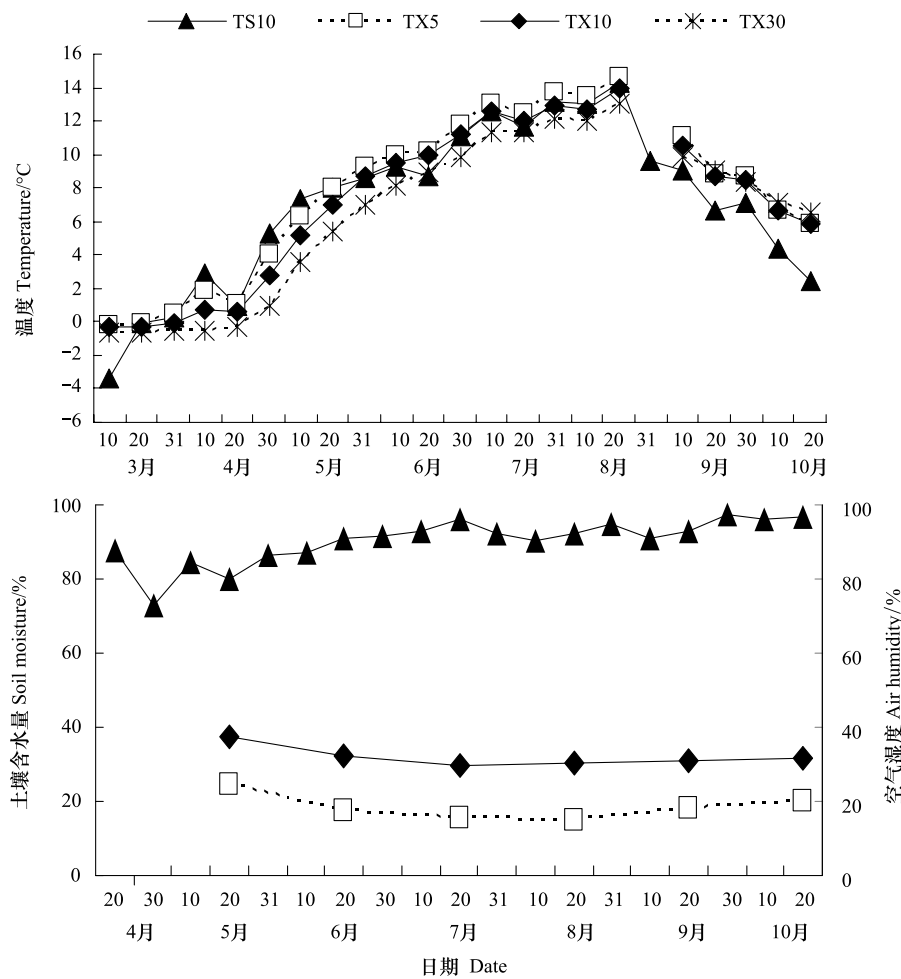


图2 试验期间空气、土壤温度和空气湿度、土壤含水量的变化

Fig.2 Changes in soil and air temperature and changes in soil moisture and air humidity

TS₁₀:地上 10cm;TX₅、TX₁₀、TX₃₀:地下 5cm、10cm、30cm; 期间记录仪损坏,土壤温度缺失 08-20—08-31 的数据

表 1 施氮和季节变化对土壤呼吸的影响(平均值±标准误)

Table 1 The effects of nitrogen addition and month on soil respiration rate (mean±SE, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

土壤呼吸组分 Components of soil respiration	处理 Treatments	月份 Month						平均 Mean	$P>F_N$	$P>F_M$	$P>F_{N\times M}$
		5	6	7	8	9	10				
土壤总呼吸 Total soil respiration	N ₀	2.57±0.11	3.11±0.16	3.78±0.19	3.50±0.23	2.43±0.15	1.94±0.20	2.89±0.29a	0.665	0.000	0.900
	N ₂	2.83±0.24	3.04±0.16	3.53±0.14	3.33±0.27	2.26±0.27	2.08±0.20	2.84±0.24a			
	N ₅	2.84±0.18	3.31±0.07	3.67±0.09	3.41±0.08	2.54±0.09	2.03±0.16	2.97±0.25a			
	N ₁₀	2.81±0.10	2.91±0.17	3.38±0.18	3.45±0.21	2.42±0.17	2.18±0.26	2.86±0.21a			
异养呼吸 Heterotrophic respiration	N ₀	1.78±0.10	2.08±0.15	2.54±0.14	2.47±0.24	1.45±0.17	1.51±0.19	1.97±0.19a	0.090	0.000	0.191
	N ₂	2.07±0.13	2.21±0.16	3.11±0.17	2.74±0.21	1.58±0.13	1.71±0.16	2.24±0.24a			
	N ₅	2.39±0.21	2.49±0.17	2.37±0.34	2.41±0.26	1.61±0.18	1.63±0.23	2.15±0.17a			
	N ₁₀	1.82±0.07	2.10±0.16	2.78±0.18	2.67±0.17	1.89±0.09	1.76±0.26	2.17±0.18a			
自养呼吸 Autotrophic respiration	N ₀	0.79±0.08	1.03±0.12	1.24±0.14	1.03±0.17	0.98±0.10	0.43±0.10	0.92±0.11a	0.015	0.006	0.057
	N ₂	0.76±0.17	0.83±0.14	0.42±0.15	0.60±0.12	0.68±0.22	0.37±0.11	0.61±0.08b			
	N ₅	0.45±0.09	0.82±0.19	1.31±0.38	1.00±0.25	0.94±0.23	0.40±0.11	0.82±0.14ab			
	N ₁₀	1.03±0.10	0.81±0.17	0.59±0.17	0.78±0.25	0.53±0.14	0.42±0.14	0.69±0.09b			

N₀、N₂、N₅和 N₁₀为 4 种施氮水平, $P>F_N$:施肥效应; $P>F_M$:季节效应; $P>F_{N\times M}$:施肥和季节交互效应;不同字母表示同一呼吸组分在不同施氮水平之间差异显著($P<0.05$)

表 2 施氮和时间对土壤呼吸的影响(平均值±标准误差)

土壤呼吸类型 Components of soil respiration		Table 2 The effects of nitrogen addition and time on soil respiration rate (mean±SE, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)															平均值 Mean	$P>F_N$	$P>F_T$	$P>F_{N \times T}$
		时间 Time																		
		1:00	3:00	5:00	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00							
土壤总呼吸		N ₀	2.64±0.11	2.45±0.11	2.33±0.14	2.37±0.12	2.57±0.20	2.38±0.08	3.33±0.14	3.07±0.14	3.70±0.17	3.26±0.08	3.29±0.07	2.57±0.09	2.83±0.07c	0.000	0.000	0.029		
Total soil respiration		N ₂	3.18±0.11	3.02±0.13	2.99±0.11	2.72±0.13	2.83±0.11	2.77±0.13	3.84±0.06	3.49±0.19	3.78±0.19	3.12±0.19	3.21±0.12	3.20±0.10	3.18±0.08b					
		N ₅	2.35±0.12	2.40±0.12	2.37±0.11	2.40±0.12	2.37±0.11	2.62±0.12	3.15±0.12	3.05±0.13	3.19±0.11	2.97±0.14	2.67±0.15	2.59±0.17	2.68±0.07d					
		N ₁₀	3.70±0.19	3.59±0.13	3.36±0.22	3.65±0.12	3.62±0.11	3.81±0.18	4.00±0.09	4.51±0.19	4.26±0.20	4.11±0.19	3.71±0.12	3.86±0.12	3.85±0.09a					
异养呼吸		N ₀	0.94±0.04	0.86±0.02	0.85±0.04	0.73±0.03	0.85±0.02	1.09±0.01	1.49±0.04	1.43±0.04	1.68±0.02	1.43±0.04	1.40±0.03	1.02±0.04	1.15±0.02c	0.000	0.000	0.000		
Heterotrophic respiration		N ₂	1.78±0.08	1.74±0.09	1.82±0.12	1.82±0.14	1.85±0.08	2.47±0.18	2.00±0.06	2.01±0.09	2.02±0.06	2.24±0.12	2.07±0.05	1.71±0.07	1.96±0.05b					
		N ₅	1.86±0.10	1.69±0.09	1.63±0.09	1.56±0.08	1.72±0.09	2.01±0.06	2.19±0.08	2.27±0.07	2.30±0.12	2.64±0.12	2.11±0.10	1.94±0.11	1.99±0.05b					
		N ₁₀	2.33±0.26	2.28±0.26	2.39±0.31	2.17±0.24	2.45±0.27	2.85±0.16	3.19±0.20	3.13±0.18	3.11±0.23	3.14±0.29	2.43±0.21	2.34±0.23	2.65±0.14a					
自养呼吸		N ₀	1.70±0.04	1.59±0.05	1.48±0.06	1.64±0.05	1.72±0.11	1.28±0.04	1.84±0.06	1.64±0.06	2.02±0.09	1.84±0.02	1.89±0.03	1.54±0.03	1.68±0.03a	0.000	0.000	0.000		
Autotrophic respiration		N ₂	1.41±0.02	1.29±0.03	1.17±0.01	0.90±0.00	0.98±0.02	0.30±0.03	1.85±0.00	1.48±0.06	1.76±0.07	0.88±0.04	1.14±0.04	1.49±0.02	1.22±0.02b					
		N ₅	0.49±0.01	0.71±0.02	0.74±0.01	0.84±0.03	0.66±0.01	0.61±0.03	0.96±0.02	0.78±0.04	0.90±0.01	0.32±0.01	0.56±0.03	0.65±0.04	0.69±0.01c					
		N ₁₀	1.37±0.04	1.31±0.08	0.97±0.05	1.47±0.07	1.17±0.09	0.96±0.01	0.81±0.06	1.38±0.01	1.16±0.02	0.97±0.06	1.28±0.05	1.52±0.06	1.20±0.03b					

N₀、N₂、N₅和 N₁₀为 4 种施氮水平, $P>F_N$: 施肥效应; $P>F_T$: 时间效应; $P>F_{N \times T}$: 施肥和时间交互效应; 不同字母表示同一呼吸组分在不同施氮水平之间差异显著 ($P<0.05$)

N_{10} 处理的土壤总呼吸速率分别比对照高 0.35、1.02 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, N_5 处理的土壤总呼吸速率比对照低 0.15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。施氮对异养呼吸有显著的促进作用 ($F_N, P < 0.001$), 而且随施氮浓度的增加促进作用越大, 表现为: N_2 、 N_5 、 N_{10} 处理的土壤呼吸速率分别比对照高 0.81、0.84、1.50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。此外, 施氮对自养呼吸有明显的抑制作用 ($F_N, P < 0.001$), 具体表现为: N_2 、 N_5 、 N_{10} 处理的土壤呼吸速率分别比对照低 0.46、0.99、0.48 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。总体上, 施氮对土壤呼吸及其组分的影响随时间变化而不同 ($F_{N \times T}, P < 0.05$)。

2.4 土壤排放 CO_2 通量

根据松潘气象站资料和样地全年调查资料, 推测 11 月份—次年 4 月份的土壤呼吸速率一般不会超过 10 月份土壤呼吸速率, 此处将 10 月份的呼吸速率作为 11 月份—次年 4 月份呼吸速率的平均值, 将实测的 2012 年 5—10 月份土壤呼吸月平均值进行计算, 分析不同施氮处理下土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸排放 CO_2 通量的差异^[14]。由于试验样地

所在地冬季寒冷且漫长, 季节性冻土和积雪覆盖时间较长, 因此, 利用 10 月份土壤呼吸速率作为 11 月份—次年 4 月份呼吸速率的平均值可能偏高。

从表 3 可以看出, 在不同季节, 施氮对土壤总呼吸、异养呼吸以及自养呼吸排放 CO_2 通量的影响是不同的。总体上, 施氮对土壤总呼吸、异养呼吸平均每月排放 CO_2 通量无显著影响 ($P > 0.05$), 而对自养呼吸平均每月排放 CO_2 通量有显著的抑制作用 ($P < 0.05$), 具体表现为: N_2 、 N_{10} 处理的 CO_2 排放通量分别比对照低 11.75、8.50 $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。就不同月份而言, 仅 5 月份施氮对异养呼吸排放 CO_2 通量有显著的促进作用 ($P < 0.05$), 表现为 N_5 处理较对照高 23.05 $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$; 施氮在 5 月和 7 月份对自养呼吸排放 CO_2 通量产生显著影响, 但不同施氮浓度对其影响的规律不明显。其中, 5 月份, N_5 处理的 CO_2 排放通量较对照低 12.94 $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ($P < 0.01$), 而 N_2 、 N_{10} 处理与对照无显著差异; 7 月份, N_2 处理的 CO_2 排放通量较对照低 31.06 $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ($P < 0.05$), 而另外两个处理与对照差异不明显。

表 3 土壤排放 CO_2 的通量 (平均值 $\pm$ 标准误)

Table 3 Soil carbon dioxide emission (mean $\pm$ SE, $\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$)

土壤呼吸类型 Components of soil respiration	处理 Treatments	月份 Month						平均 Mean
		5	6	7	8	9	10	
土壤总呼吸 Total soil respiration	N_0	97.87 $\pm$ 4.18a	118.19 $\pm$ 5.97a	143.68 $\pm$ 7.04a	133.09 $\pm$ 8.71a	92.33 $\pm$ 5.74a	73.68 $\pm$ 7.50a	109.80 $\pm$ 10.82a
	N_2	107.55 $\pm$ 8.95a	115.60 $\pm$ 6.20a	134.02 $\pm$ 5.22a	126.65 $\pm$ 10.07a	85.86 $\pm$ 10.14a	78.93 $\pm$ 7.74a	108.10 $\pm$ 8.98a
	N_5	107.97 $\pm$ 6.81a	125.64 $\pm$ 2.70a	139.66 $\pm$ 3.23a	129.80 $\pm$ 3.02a	96.58 $\pm$ 3.29a	77.08 $\pm$ 6.24a	112.78 $\pm$ 9.55a
	N_{10}	108.37 $\pm$ 3.74a	110.56 $\pm$ 6.42a	128.41 $\pm$ 6.67a	131.02 $\pm$ 7.87a	92.05 $\pm$ 6.30a	82.69 $\pm$ 9.96a	108.85 $\pm$ 7.84a
异养呼吸 Heterotrophic respiration	N_0	67.71 $\pm$ 3.95b	78.89 $\pm$ 5.57a	96.69 $\pm$ 5.37a	93.79 $\pm$ 9.20a	55.17 $\pm$ 6.39a	57.35 $\pm$ 7.35a	74.93 $\pm$ 7.30a
	N_2	78.65 $\pm$ 4.85ab	84.05 $\pm$ 6.02a	118.08 $\pm$ 6.50a	104.00 $\pm$ 7.81a	60.18 $\pm$ 4.92a	64.93 $\pm$ 5.88a	84.98 $\pm$ 9.16a
	N_5	90.76 $\pm$ 8.01a	94.67 $\pm$ 6.39a	89.96 $\pm$ 12.84a	91.67 $\pm$ 9.79a	61.04 $\pm$ 6.69a	62.05 $\pm$ 8.58a	81.69 $\pm$ 6.41a
	N_{10}	69.28 $\pm$ 2.48b	79.73 $\pm$ 6.03a	105.81 $\pm$ 6.65a	101.36 $\pm$ 6.49a	71.83 $\pm$ 3.28a	66.91 $\pm$ 9.80a	82.49 $\pm$ 6.93a
自养呼吸 Autotrophic respiration	N_0	30.16 $\pm$ 2.87a	39.30 $\pm$ 4.42a	47.00 $\pm$ 5.45ab	39.30 $\pm$ 6.49a	37.16 $\pm$ 3.67a	16.33 $\pm$ 3.90a	34.87 $\pm$ 4.31a
	N_2	28.90 $\pm$ 6.46ab	31.55 $\pm$ 5.27a	15.94 $\pm$ 5.53c	22.65 $\pm$ 4.39a	25.68 $\pm$ 8.30a	13.99 $\pm$ 3.98a	23.12 $\pm$ 2.87c
	N_5	17.22 $\pm$ 3.40b	30.97 $\pm$ 7.33a	49.70 $\pm$ 14.38a	38.14 $\pm$ 9.47a	35.54 $\pm$ 8.89a	15.03 $\pm$ 4.24a	31.10 $\pm$ 5.37ab
	N_{10}	39.09 $\pm$ 3.65a	30.83 $\pm$ 6.58a	22.60 $\pm$ 6.54bc	29.66 $\pm$ 9.33a	20.23 $\pm$ 5.38a	15.78 $\pm$ 5.15a	26.37 $\pm$ 3.45bc

N_0 、 N_2 、 N_5 和 N_{10} 为 4 种施氮水平, 不同字母表示同一呼吸组分在不同施氮水平之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.5 土壤呼吸与土壤温度、含水量的相关性

Q_{10} 一般用来表示土壤呼吸对温度变化反应的敏感程度, 指在 5—20 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 温度每增加 10 $^{\circ}\text{C}$ 呼吸增加的倍数。从表 4 可以看出, 试验期间土壤总呼吸、异养呼吸与土壤温度之间有较好的指数关系 ($P < 0.001$)。施氮显著影响了土壤总呼吸的温度敏

感性 ($P < 0.05$), 尽管 3 种施氮处理与对照之间无显著差异, 但就不同施氮处理而言, N_2 处理的 Q_{10} 值最大 (2.293), 显著高于 N_{10} 处理的 Q_{10} 值。类似地, 施氮显著影响了异养呼吸的温度敏感性 ($P < 0.05$), 3 种施氮处理与对照之间无显著差异, 但不同施氮处理比较, N_2 处理的 Q_{10} 值最大 (1.916), 显著高于 N_{10}

处理的 Q_{10} 值。总体上,各施氮处理下土壤总呼吸的 Q_{10} 值均大于异养呼吸,说明土壤总呼吸对温度变化的敏感度高于异养呼吸。

表 4 土壤呼吸速率与土壤 5cm 温度相关关系

Table 4 The exponential relationship between soil respiration rate and soil temperature at 5cm depth					
土壤呼吸类型 Components of soil respiration	处理 Treatments	指数关系 Exponential relationship	R^2	P	Q_{10}
土壤总呼吸 Total soil respiration	N_0	$y = 1.363e^{0.076x}$	0.490	0.000	2.138ab
	N_2	$y = 1.182e^{0.083x}$	0.585	0.000	2.293a
	N_5	$y = 1.569e^{0.066x}$	0.570	0.000	1.935ab
	N_{10}	$y = 1.613e^{0.059x}$	0.349	0.000	1.804b
异养呼吸 Heterotrophic respiration	N_0	$y = 1.004e^{0.060x}$	0.412	0.000	1.822ab
	N_2	$y = 1.063e^{0.065x}$	0.517	0.000	1.916a
	N_5	$y = 1.083e^{0.059x}$	0.353	0.000	1.804ab
	N_{10}	$y = 1.312e^{0.041x}$	0.262	0.000	1.507b

N_0 、 N_2 、 N_5 和 N_{10} 为四种施氮梯度,不同字母表示同一呼吸组分在不同施氮水平之间差异显著 ($P<0.05$)

从表 5 可以看出, N_0 、 N_5 、 N_{10} 处理的土壤总呼吸与 5 cm 土壤含水量之间呈显著的负相关 ($P<0.05$),并且 N_5 、 N_{10} 处理的土壤总呼吸与 10 cm 土壤含水量之间也呈显著的负相关 ($P<0.05$)。此外, N_0 、 N_2 、 N_{10} 处理的异养呼吸与 5 cm 土壤含水量之间呈显著的负相关 ($P<0.05$),并且 N_0 、 N_5 、 N_{10} 处理的异养呼吸与 10 cm 土壤含水量之间也呈显著的负相关 ($P<$

0.05)。总体上,土壤总呼吸、异养呼吸随地下 5、10 cm 土壤含水量的变化在不同施氮梯度下差异不显著 ($P>0.05$)。与土壤呼吸与温度的关系相比,土壤呼吸与土壤含水量的相关性较弱,其关系方程的 R^2 值范围为 0.001—0.276,说明本区域土壤含水量对土壤呼吸的作用小于土壤温度的作用。

表 5 土壤呼吸速率与土壤含水量的相关关系(线性关系: $y = \alpha x + \beta$)

Table 5 The relationship between soil respiration rate and soil moisture (Linear relationship: $y = \alpha x + \beta$)								
土壤呼吸类型 The type of soil respiration	处理 Treatments	5cm 土壤含水量 Soil moisture				10cm 土壤含水量 soil moisture		
		线性关系 Linear relationship		R^2	P	线性关系 Linear relationship		P
		α	β			α	β	
土壤总呼吸 Total soil respiration	N_0	-0.047a	3.829	0.114	$P<0.05$	-0.045	4.410	$P>0.05$
	N_2	-0.040	3.691	0.065	$P>0.05$	-0.001	2.919	$P>0.05$
	N_5	-0.064a	4.226	0.276	$P<0.05$	-0.050a	4.692	$P<0.05$
	N_{10}	-0.056a	4.035	0.163	$P<0.05$	-0.036a	4.138	$P<0.05$
异养呼吸 Heterotrophic respiration	N_0	-0.039a	2.668	0.115	$P<0.05$	-0.060a	3.875	$P<0.05$
	N_2	-0.043a	2.976	0.100	$P<0.05$	-0.019	2.813	$P>0.05$
	N_5	-0.029	2.727	0.046	$P>0.05$	-0.080a	4.684	$P<0.05$
	N_{10}	-0.054a	3.171	0.173	$P<0.05$	-0.085a	4.822	$P<0.05$

N_0 、 N_2 、 N_5 和 N_{10} 为 4 种施氮梯度;其中,对土壤呼吸速率与土壤含水量之间呈显著相关的线性回归系数(α)进行单因素方差分析(One-way ANOVA),不同字母表示同一呼吸组分在不同施氮水平之间差异显著 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 施氮对土壤呼吸及其组分动态变化的影响

氮输入是影响陆地生态系统土壤呼吸的重要因素,主要表现为氮沉降和人为施氮两种方式^[15-17]。

本研究表明,试验期间,土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸月平均速率均呈明显的季节动态。总体上,夏季 7、8 月份土壤呼吸速率较高,春季 5、6 月份或秋季 9、10 月份较低,与金钊等^[18]对油蒿灌丛群落土壤呼吸的研究结果一致,主要是因为该时段水热因

子条件最佳且配置较好;在整个生长季中,施氮对土壤总呼吸无显著影响,这与 Allison^[19]、Jacinthe^[20] 等研究结果一致,推测的原因可能是水分等其它因子限制了氮素作用的发挥;施氮对异养呼吸无显著影响,而对自养呼吸有显著的抑制作用,与 Bowden 等^[9] 研究结论一致,可能是施氮降低了根生物量的结果,或者是施氮显著增加了有效氮和微生物生物量氮,降低了土壤 pH 值,使土壤表现出明显的酸化现象^[21],从而抑制了根系呼吸。

类似地,土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率也呈现出明显的日动态。总体上,土壤总呼吸最高值出现在 14:00—18:00,异养呼吸最高值出现在 12:00—20:00,而自养呼吸日动态变化波动较大,这与 Xu 等^[22] 研究结果是相似的,可能是土壤呼吸作用的变化比温度变化滞后;一天中,施氮对土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸均有显著影响。总体而言,施氮促进了土壤总呼吸,但不同浓度的氮添加对其影响不同,这与涂利华等^[23] 对华西苦竹林土壤呼吸的研究结论一致,可能是施氮能提高植物生产力,促进植物地下部根系生长及其分泌物的输入,进而促进土壤有机碳积累的结果;施氮对异养呼吸的影响表现为促进作用,并且随施氮浓度的增加促进作用越大,与珊丹^[24] 等对草原土壤呼吸的研究结果不一致,推测的原因可能是施氮量高,降低了 C/N 比值,促进了有机质分解,从而使微生物活性加强^[25];此外,施氮抑制了自养呼吸,可能与当时温度较低,使施氮对细根生物量增加的影响不显著所致^[26]。

3.2 施氮对土壤呼吸及其组分排放 CO₂ 通量的影响

本研究表明,总体上,施氮对土壤总呼吸、异养呼吸平均每月排放 CO₂ 通量无显著影响,这与张庆忠等^[27] 在农田土壤呼吸中的研究结果不一致,而与亚热带森林生态系统土壤呼吸响应氮沉降的结果是相似的^[28],推测的原因可能是施氮量相差不多造成的;施氮对自养呼吸平均每月排放 CO₂ 通量有显著的抑制作用,与李仁洪等^[29] 在华西慈竹林土壤呼吸中的研究结论类似,可能与地上部生物量积累有关^[30]。就不同月份而言,仅 5 月份施氮对异养呼吸排放 CO₂ 通量有显著的促进作用,可能与此时气温回升,有效光辐射增加,施氮对土壤微生物活性影响更显著,从而使有机质分解加快有关。Zak 等^[31] 研究也表明,微生物生长速率随温度升高而加快;施

氮在 5 月和 7 月份对自养呼吸排放 CO₂ 通量产生显著影响,但不同施氮浓度对其影响的规律不明显,可能与自养呼吸受树木季节性地下碳分配过程的强烈影响有关^[32]。

3.3 土壤温度、含水量对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,受多种因素制约,如植被类型、枯枝落叶层覆盖、土壤微生物活性、土壤温度、湿度、土壤理化特性等^[4],其中,土壤温度、湿度对土壤呼吸的影响最深刻。土壤温度不仅影响植物生长,还对土壤微生物活性、数量和根系呼吸产生显著影响^[33]。本研究表明,土壤总呼吸、异养呼吸与土壤温度之间均有极显著的指数关系,与许多学者的研究结果一致^[34-35],在青藏高原,土壤微生物活动是在长期适应高寒环境下进行的,一旦温度稍微升高,微生物代谢活动便会急剧加强^[36];施氮显著影响了土壤总呼吸、异养呼吸的温度敏感性,并且 3 种施氮处理与对照之间无显著差异,这与涂利华等^[37] 对撑绿杂交竹林的研究结果不一致,可能与模拟氮沉降持续时间有关;此外,土壤总呼吸对温度变化的敏感度高于异养呼吸,与 Boone^[38] 早期野外试验结论一致。

土壤含水量也是影响土壤呼吸的重要因素之一。本研究表明,土壤总呼吸、异养呼吸随地下 5、10 cm 土壤含水量的变化在不同施氮梯度下差异不显著,说明土壤含水量对土壤呼吸的影响不随施氮浓度的不同而变化;与土壤呼吸与温度的关系相比,土壤呼吸与土壤含水量的相关性较弱,说明本区域土壤含水量对土壤呼吸的作用小于土壤温度的作用,这与靳虎甲等^[39] 对白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸研究结果一致,推测的原因可能是土壤含水量过高,水分取代了土壤中 CO₂ 占据的位置,使土壤通透性变差,CO₂ 在土壤中的扩散受到阻碍^[40]。此外, O₂ 是植物根系和土壤微生物进行有氧呼吸的必要条件,过高的土壤含水量会限制土壤中 O₂ 的扩散^[41],从而抑制土壤微生物和植物根系呼吸。

综上所述,施氮对土壤呼吸作用的影响十分复杂,土壤呼吸各组分对施氮的响应也是不一致的,影响土壤呼吸的因素除了外施氮肥以外,还与土壤有机质、氮含量、植被类型、根系生物量等有关^[42-43],其内在机理有待进一步研究。此外,本试验采用壕沟法区分土壤呼吸组分,是一种间接测定根系呼吸的

方法,其结果是利用有根土壤呼吸和无根土壤呼吸的差值计算得到的^[13],能较准确地区分土壤异养呼吸和自养呼吸。但是,壕沟法测定得到的根系呼吸速率可能偏高,因为凋落物分解能提供土壤微生物生存所必需的 C 源,使得根际微生物数量和活性明显高于非根际土壤,所以采用壕沟法可能会低估异养呼吸的作用,相应地增加根系呼吸的作用,需在今后的研究中加以改善。

4 结论

(1)在 2012 年 5—10 月份试验期间,土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸月平均速率均呈明显的季节动态。在整个生长季中,施氮对土壤总呼吸、异养呼吸无显著影响,而对自养呼吸有显著的抑制作用,施氮对土壤呼吸及其组分的影响不随季节变化而不同。

(2)类似地,土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率也呈现出明显的日动态。一天中,施氮对土壤总呼吸及其组分均产生显著影响。总体上,施氮促进了土壤总呼吸、异养呼吸,而抑制了自养呼吸,并且施氮对土壤呼吸及其组分的影响随时间变化而不同。

(3)总体上,施氮对土壤总呼吸、异养呼吸平均每月排放 CO₂ 通量无显著影响,而对自养呼吸平均每月排放 CO₂ 通量有显著的抑制作用。就不同月份而言,仅 5 月份施氮对异养呼吸排放 CO₂ 通量有显著的促进作用,并在 5 月和 7 月份对自养呼吸排放 CO₂ 通量产生显著影响,但不同施氮浓度对其影响的规律不明显。

(4)土壤总呼吸、异养呼吸与土壤温度有较好的指数关系,并且土壤总呼吸对温度的敏感度高于异养呼吸;土壤总呼吸、异养呼吸随地下 5、10 cm 土壤含水量的变化在不同施氮梯度下差异不显著,并且土壤呼吸与土壤含水量的相关性较弱。

致谢:感谢中国科学院成都生物研究所尹华军对论文写作的帮助,以及黄吉贵、黄利全等在野外监测工作中给予的帮助,特此致谢!

References:

[1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9

(1): 23-26.

- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [3] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, 1977, 43(4): 449-528.
- [4] Peterjohn W T, Melillo J M, Bowles F P, Steudler P A. Soil warming and trace gas fluxes: experimental design and preliminary flux results. *Oecologia*, 1993, 93(1): 18-24.
- [5] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in china: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(D22): 1-10.
- [6] Peng S L, Li Y L, Ren H, Zhao P. Progress in research on soil respiration under the global change. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5): 705-712.
- [7] Gallardo A, Schlesinger W H. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm-temperate forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(10): 1409-1415.
- [8] Craine J M, Wedin D A, Reich P B. Grassland species effects on soil CO₂ flux track the effects of elevated CO₂ and nitrogen. *New Phytologist*, 2001, 150(2): 425-434.
- [9] Bowden D R, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [10] Mastro R E, Chhonkar P K, Singh D, Patra A K. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical inceptisol. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 38(7): 1577-1582.
- [11] Desrochers A, Ländhauser S M, Lieffers V J. Coarse and fine root respiration in aspen(*Populus tremuloides*). *Tree Physiology*, 2002, 22(10): 725-732.
- [12] Wu N. The community types and biomass of *sibiraea angustata* scrub and their relationship with environmental factors in northwestern Sichuan. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(9): 860-870.
- [13] Jin Z, Dong Y S, Qi Y C. Review on the approaches of separating autotrophic and heterotrophic components of soil respiration. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 22-32.
- [14] Luo J, Yang Z, Yang Q W. CO₂ emissions from soils in *Abies Fabri* forest region on the east slope of Gongga mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 402-409.
- [15] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1111-1120.
- [16] Janssens I A, Dieleman W, Luysaert S, Subke J A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G,

- Papale D, Piao S L, Schulze E D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [17] Madritch M D, Hunter M D. Intraspecific litter diversity and nitrogen deposition affect nutrient dynamics and soil respiration. *Oecologia*, 2003, 136(1): 124-128.
- [18] Jin Z, Qi Y C, Dong Y S. Diurnal and seasonal dynamics of soil respiration in desert shrubland of *Artemisia Ordosica* on Ordos Plateau of Inner Mongolia, China. *Journal of Forestry Research*, 2007, 18(3): 231-235.
- [19] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 2008, 14(5): 1156-1168.
- [20] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment. *Soil & Tillage Research*, 2002, 67(2): 147-157.
- [21] Chen Z, Yin H J, Wei Y Y, Liu Q. Short-term effects of night warming and nitrogen addition on soil available nitrogen and microbial properties in subalpine coniferous forest, Western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(11): 1254-1264.
- [22] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [23] Tu L H, Hu T X, Zhang J, He Y Y, Tian X Y, Xiao Y L. Effects of simulated nitrogen deposition on the fine root characteristics and soil respiration in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2472-2478.
- [24] Shan D, Han G D, Zhao M L, Wang Z, Han X. The effects of experimental warming and nitrogen addition on soil respiration in desert steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(9): 106-112.
- [25] Song C C, Liu D Y, Yang J S, Song Y Y, Mao R. Effect of nitrogen addition on decomposition of *Calamagrostis angustifolia* litters from freshwater marshes of Northeast China. *Ecological Engineering*, 2001, 37(10): 1578-1582.
- [26] Graefe S, Hertel D, Leuschner C. N, P and K limitation of fine root growth along an elevation transect in tropical mountain forests. *Acta Oecologica*, 2010, 36(6): 537-542.
- [27] Zhang Q Z, Wu W L, Wang M X, Zhou Z R, Chen S F. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [28] Deng Q, Zhou G Y, Liu J X, Liu S Z, Duan H L, Chen X M, Zhang D Q. Effects of CO₂ enrichment, high nitrogen deposition and high precipitation on a model forest ecosystem in southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1023-1033.
- [29] Li R H, Tu L H, Hu T X, Zhang J, Lu Y, Liu W T, Luo S H, Xiang Y B. Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in a *Neosinocalamus affinis* plantation in Rainy Area of West China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1649-1655.
- [30] Gao H Y, Guo S L, Liu W Z, Chen S G. Effects of nitrogen rates on soil respiration in winter wheat cropping system in semi-arid regions on loess plateau. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 390-396.
- [31] Zak D R, Pregitzer K S, Curtis P S, Teeri J A, Fogel R, Randlett D L. Elevated atmospheric CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles. *Plant and Soil*, 1993, 151(1): 105-117.
- [32] Höglberg P. Is tree root respiration more sensitive than heterotrophic respiration to changes in soil temperature? *New Phytologist*, 2010, 188(1): 9-10.
- [33] Hu Y L, Wang S L, Yan S K. Research advances on the factors influencing the activity and community structure of soil microorganism. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 170-176.
- [34] Curiel Y J, Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology*, 2003, 23(18): 1263-1270.
- [35] Janssens I, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911-918.
- [36] Zheng D, Yao T D. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 451-458.
- [37] Tu L H, Dai H Z, Hu T X, Zhang J, Luo S H. Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in a *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalia mopsi* plantation in Rainy Area of West China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 829-836.
- [38] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, Kaye J P. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 1998, 396(6711): 570-572.
- [39] Jin H J, Ma Q L, Zhang Y J, Zeng X D. Soil respiration of *Nitraria tangutorum* nebkhas at different evolution stages in lower reaches of Shiyang river and its influencing factors. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(1): 140-147.
- [40] Kursar T A. Evaluation of soil respiration and soil CO₂ concentration in a lowland moist forest in Panama. *Plant and Soil*, 1989, 113(1): 21-29.
- [41] Linn D W and Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1267-1272.

- [42] Sikora L J, Mccoy J L. Attempts to determine available carbon in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9(1): 19-24.
- [43] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.

参考文献:

- [6] 彭少麟, 李跃林, 任海, 赵平. 全球变化条件下的土壤呼吸效应. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 705-712.
- [12] 吴宁. 川西北窄叶鲜卑花灌丛的类型和生物量及其与环境因子的关系. *植物学报*, 1998, 40(9): 860-870.
- [13] 金钊, 董云社, 齐玉春. 综论土壤呼吸各组分区分方法. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 22-32.
- [14] 罗辑, 杨忠, 杨清伟. 贡嘎山东坡峨眉冷杉林区土壤 CO₂ 排放. *土壤学报*, 2000, 37(3): 402-409.
- [21] 陈智, 尹华军, 卫云燕, 刘庆. 夜间增温和施氮对川西亚高山针叶林土壤有效氮和微生物特性的短期影响. *植物生态学报*, 2010, 34(11): 1254-1264.
- [23] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 何远洋, 田祥宇, 肖银龙. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2472-2478.
- [24] 珊丹, 韩国栋, 赵萌莉, 王珍, 韩雄, 高福光. 控制性增温和施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(9): 106-112.
- [27] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 周中仁, 陈淑峰. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [28] 邓琦, 周国逸, 刘菊秀, 刘世忠, 段洪浪, 陈小梅, 张德强. CO₂ 浓度倍增、高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1023-1033.
- [29] 李仁洪, 涂利华, 胡庭兴, 张健, 鲁洋, 刘文婷, 雒守华, 向元彬. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1649-1655.
- [30] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国. 施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响. *环境科学*, 2010, 31(2): 390-396.
- [33] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍馥. 影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展. *土壤通报*, 2006, 37(1): 170-176.
- [36] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升及其环境效应. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 451-458.
- [37] 涂利华, 戴洪忠, 胡庭兴, 张健, 雒守华. 模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹林土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 829-836.
- [39] 靳虎甲, 马全林, 张有佳, 曾新德. 石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析. *中国沙漠*, 2012, 32(1): 140-147.