

# 高寒草甸区不同生境土壤呼吸变化规律 及其与水热因子的关系

田林卫<sup>1,2</sup>, 周华坤<sup>2</sup>, 刘泽华<sup>1</sup>, 魏 晴<sup>1</sup>,  
姚步青<sup>2</sup>, 王文颖<sup>1</sup>, 赵新全<sup>2</sup>

(1. 青海师范大学生命与地理科学学院, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

**摘要:**采用野外定位观测的方法,于2012年6—9月在青海省海北地区分析了围栏封育地(对照)、放牧地、鼠丘和蚁塔地4种不同生境下土壤呼吸的变化规律及其与水热因子的关系。结果表明,1)各处理的土壤呼吸均表现出明显的季节动态,其变化程度大小依次表现为对照<鼠丘<放牧地<蚁塔。2)不同时期各处理下土壤呼吸表现为:除6月初、7月底外,鼠丘处理与封育和放牧处理差异不显著( $P>0.05$ );蚁塔地与其他3个处理间差异均显著( $P<0.05$ );除7月底外,放牧处理与对照间差异均不显著。3)土壤呼吸与土壤温度均呈正相关,且均存在较好的指数关系,其中对照处理的相关性最好,相关系数为0.851;封育地、放牧地、鼠丘、蚁塔的土壤呼吸 $Q_{10}$ 值依次为2.39、4.66、2.03、2.29。4)4处理的土壤含水量与土壤呼吸速率回归关系均不明显。

**关键词:**高寒草甸;不同生境;土壤呼吸速率;季节动态;温湿度

中图分类号:S812.2;Q945.19 文献标识码:A 文章编号:1001-0629(2014)07-1233-08\*

## Soil respiration variation and its relationship with hydrothermic factor under different biotopes of alpine meadow distributed area

TIAN Lin-wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Hua-kun<sup>2</sup>, LIU Ze-hua<sup>1</sup>, WEI Qing<sup>1</sup>,  
YAO Bu-qing<sup>2</sup>, WANG Wen-ying<sup>1</sup>, ZHAO Xin-quan<sup>2</sup>

(1. College of Life and Geographical, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810001, China)

**Abstract:** Based on field-orientation observation, soil respiration variations and its relationship of enclosure which is the control plot, and grazing land, mole-hills and ant-hills in different biotopes through the method of comparative analysis were analyzed in the Haibei region of Qinghai Province from June to September in 2012. The main results were as followed: 1) Seasonal dynamics of each treatment were apparent, which was enclosure treatment<mole hill treatment<grazing treatment<ant tower treatment. 2) Soil respiration in different months showed: differences of mole hill treatment and enclosure and grazing treatments were not significant in June and July; differences of ant tower and other treatments were significant ( $P<0.05$ ) in other months; difference of grazing treatment was not significant compared with enclosure treatment except the soil respiration in July. 3) Soil respiration rate was positively correlated with soil temperature, and the most significant one was control treatment, the correlation coefficient of 0.851. The  $Q_{10}$  were followed

\* 收稿日期:2013-09-25 接受日期:2013-12-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31172247,31201836);青海省自然科学基金项目(2013-Z-916);中科院战略性先导科技专项子课题(XDA05070202);国家科技支撑课题专题(2011BAC09B06-02,2014BAC05B03);青海省重点实验室发展专项资金计划(2013-Z-Y07,2014-Z-Y01)

第一作者:田林卫(1987-),女,河南周口人,在读硕士生,主要从事草地生态学研究。E-mail:xizhangs@163.com

通信作者:周华坤(1974-),男,青海乐都人,研究员,博士,主要从事高寒草地恢复生态学研究。E-mail:729492987@qq.com

by 2.39, 4.66, 2.03 and 2.29, respectively. 4) There was no significant correlation between SRR and soil water content.

**Key words:** alpine meadow; different biotopes; soil respiration rate; seasonal dynamics; soil temperature and humidity

**Corresponding author:** ZHOU Hua-kun E-mail: 729492987@qq.com

中国草地面积约为  $3.31 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 草地生态系统是陆地生态系统中最重要、分布最广的生态系统类型之一, 在全球碳循环和气候调节中具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。土壤呼吸是草地生态系统碳循环一个极其重要的环节。了解土壤呼吸与影响因子之间的关系, 对于估计和预测陆地生态系统土壤呼吸变化有着非同寻常的意义。

目前, 针对青藏高原东部边缘地区土壤呼吸的研究还相当薄弱, 且多集中于草地植物自身特征及人为干扰对土壤呼吸的影响等方面, 而对不同自然生境引起的变化研究相对较少。该地区主要的自然干扰表现在广泛分布的鼠丘和蚁塔等土壤动物生境对土壤呼吸的影响上。土壤动物是草地生态系统的重要组分, 由于其对植被和土壤干扰的特殊性而倍受生态学界的关注, 业已成为草地生态学研究的重点领域之一<sup>[3-6]</sup>。蚂蚁及鼠类是陆地生态系统中分布最为广泛的生物之一<sup>[7-8]</sup>, 两者的筑丘及取食活动是草地生态系统中不可忽视的干扰因子, 常能引起微环境的异质性<sup>[9-11]</sup>。因此, 干扰引起的土壤呼吸变化的研究具有重要意义。本研究以青海省海北地区围栏封育地为对照, 对比分析放牧地、鼠丘、蚁塔不同生境下土壤呼吸的变化规律及其与水热因子的

关系, 旨在为准确评估该区土壤呼吸总量提供科学依据和参数, 为进一步开展不同生境下碳收支强度对气候变化影响的比较研究提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站)进行。海北站地处青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷, 地理位置为  $37^{\circ}29' - 37^{\circ}45' \text{ N}$ ,  $101^{\circ}12' - 101^{\circ}23' \text{ E}$ 。该区地处大陆腹地, 属典型的高原大陆性气候, 年内无明显四季之分, 仅有冷暖两季之别。暖季湿润、短暂而凉爽, 冷季干燥、寒冷而漫长。年平均气温  $-1.7^{\circ} \text{ C}$ , 年极端最高气温  $27.6^{\circ} \text{ C}$ , 极端最低气温  $-37.1^{\circ} \text{ C}$ , 年降水量 560 mm, 其中 80% 分布于植物生长季的 5—9 月。年平均日照时数 2 462.7 h。植被建群种为矮嵩草 (*Kobresia humilis*), 主要优势种为垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、异针茅 (*Stipa aliena*)、早熟禾 (*Poa annua*) 等。土壤类型为草毡寒冻雏形土, 土壤发育年轻, 有机质含量丰富。

表 1 取样地点的主要特征

Table 1 Main features of sampling sites

类型 Type	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/m	土壤类型 Soil type
矮嵩草草甸样地 <i>Kobresia humilis</i> meadow	$37^{\circ}36'39.6'' \text{ N}$	$101^{\circ}16'42.3'' \text{ E}$	3 242	高山草甸土 Alpine meadow soil
围封样地 Exclosure plot	$37^{\circ}36'39.3'' \text{ N}$	$101^{\circ}16'1.6'' \text{ E}$	3 240	高山草甸土 Alpine meadow soil
蚁丘次生演替群落 Ant hill secondary succession community	$37^{\circ}36'34.7'' \text{ N}$	$101^{\circ}18'18.2'' \text{ E}$	3 193	高山草甸土 Alpine meadow soil
鼠丘次生演替群落 Mole hill secondary succession community	$37^{\circ}36'34.6'' \text{ N}$	$101^{\circ}18'22.2'' \text{ E}$	3 192	高山草甸土 Alpine meadow soil

土壤植被状况分别为: 矮嵩草草甸样地主要分

布在平缓的滩地, 土壤较疏松, 草皮层发育较弱, 全

年平均土壤湿度在 30%~55%, 土壤表层有机质含量丰富; 以矮嵩草为建群种, 主要优势种为异针茅 (*Stipa aliena*) 等<sup>[12]</sup>。群落总盖度在 100% 左右; 围封样地选用矮嵩草草甸为典型的区域典型生态系统类型围栏封育 4 年的样地, 在封育的地段, 由于放牧压力减少, 禾本科植物羊茅 (*Festuca ovina*)、异针茅等大量繁衍, 而且生长发育良好, 可成为群落的建群种, 株高一般在 15 cm 以上; 蚁丘次生演替群落以早熟禾、垂穗披碱草及矮嵩草为主要优势种, 无杂草类。蚁丘上植物无法生长, 蚁丘外围的植被稀疏, 种类较少。豆科、杂类草和有毒植物所占比例较小, 主要为禾本科和莎草科牧草; 鼠丘次生演替群落是由于鼠类的摄食、挖掘土体等一系列活动使得该地形成含有许多鼠洞的土丘这一特殊群落, 植被盖度 20%~40%, 花苜蓿 (*Medicago ruthenica*)、兰石草 (*Lancea tibetica*)、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserina*)、老鹳草 (*Geranium sibiricum*)、异叶米口袋 (*Gueldenstaedtis diversifolia*) 为主要优势种。

## 1.2 试验设计

本研究选择围栏封育地为对照处理, 与放牧地、鼠丘、蚁塔形成 4 个处理。每个处理分别设置 5 个重复, 2012 年 6 月初在每个样方内放置一个 PVC 土壤呼吸环, 各土壤环永久插入土壤表面 4~5 cm 深处, 露出地面部分高度为 2~3 cm, 保持各样地 PVC 套环地上部分环内高度一致。放置过程中尽量减少放置土壤环对土壤的镇压作用。整个生长季从返青期开始, 分别在 6 月初、6 月底、7 月中旬、8 月初、8 月底和 9 月底用 LI-COR 公司生产的 Li-8100A 土壤呼吸测量仪测定各处理的土壤呼吸速率, 每次测量的前一天剪去各土壤环内绿色植物地上部分, 以消除测定土壤呼吸时植物的自养呼吸, 并尽量避免破坏土壤表层结构。土壤呼吸测量的同时用 Li-8100A 的附加温度和湿度传感器分别测定土壤 0~5 cm 处温度和湿度。

## 1.3 数据处理

本研究用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 进行数据整理、统计分析和图形处理。利用 Two-way ANOVA, One-way ANOVA 和 LSD 方法检验不同处理的显著性差异, 所有统计的显著性水平均为 0.05。温湿度对土壤呼吸的影响, 采用回归分析。

采用指数模型<sup>[13]</sup>分析土壤呼吸速率与温度之间的关系:

$$R_s = a \times e^{bT} \quad (1)$$

式中,  $R_s$  为土壤呼吸速率, 单位为  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $T$  为 0~5 cm 地温。有研究表明<sup>[14]</sup>, 青藏高原主要生态系统的土壤呼吸动态与表层地温, 尤其是 5 cm 地温表现出较好的相关性<sup>[15-17]</sup>, 故本研究选用土壤 0~5 cm 处温度来分析土壤温度对呼吸的影响;  $a$  为 0 °C 时的土壤呼吸 (也有些研究者称为基础呼吸);  $b$  为温度反应系数, 它反映土壤呼吸对温度的敏感响应程度, 但人们习惯用一次指数模型  $Q_{10}$  值代替。 $Q_{10}$  值通过式 (2) 确定<sup>[18]</sup>:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中,  $b$  为土壤呼吸速率与土壤温度之间的指数回归系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸速率的变化规律

对不同处理土壤呼吸进行双因素方差分析 (表 2), 结果显示, 处理和月份以及两者之间的交互作用对土壤呼吸速率均存在显著效应 ( $P < 0.05$ )。就季节变化而言, 4 种处理的土壤呼吸季节变化趋势基本相同, 生境的变化没有改变高寒草甸土壤呼吸的季节变化特征; 与对照围栏封育地相比, 鼠丘及放牧处理季节变化稍大, 蚁塔处理季节变动最为明显 (图 1)。生长季从返青期开始, 到 7 月中旬土壤呼吸速率达到峰值后开始持续下降, 最低值的出现不尽相同。4 种处理生长季初期随着温度的升高, 降水量增加, 土壤动物和微生物活动会加剧, 进而促进土壤呼吸, 各处理在 7 月中下旬均达到最大值。2012 年海北站月均温中最高气温、降水量 (94.7 mm) 均出现在 7 月份, 可能与此有关。不同月份的季节变化 (图 1A), 鼠丘处理除 8、9 月份不显著 ( $P > 0.05$ ) 外, 其他月份相互之间差异均显著 ( $P < 0.05$ ); 封育处理 6、9 月份差异不显著, 7、8 月份差异显著; 放牧处理除 9 月份外, 6、7、8 月份相互之间差异均显著; 蚁塔处理 6、9 月份之间, 7、8 月份之间差异不显著, 6、9 月显著低于 7、8 月份。总之, 植物生长季中各处理的季节变化基本相同, 生长盛期土壤呼吸速率均高于其他生长期。

表2 月份和处理交互作用对土壤呼吸速率影响的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA on each index of soil respiration rate under different months and treatments

变异来源 Variation source	df	F	P
月份 Month	2	44.048	0.00
处理 Treatment	2	77.762	0.00
月份×处理 Month×Treatment	4	7.580	0.00

不同时期蚁塔处理土壤呼吸与其他3个处理的差异均显著 ( $P < 0.05$ , 图1B)。生长初期, 封育与放牧处理土壤呼吸差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但二者均显著高于鼠丘处理; 7月底, 鼠丘及放牧处理土壤呼吸显著低于对照处理; 6月底、8月底和9月底, 鼠丘、封育和放牧处理间差异均不显著。

2.2 土壤呼吸与土壤温湿度的关系

土壤呼吸的影响因素很多, 包括温度、水分、大气降水、光合作用、土壤微生物生物量、土壤的理化特征、土壤类型和植被类型、叶面积指数、人为因素等。在诸多影响因素中, 尤与土壤温度、土壤水分以及土壤有机碳含量的关系最为密切。

2.2.1 土壤呼吸与土壤温度的关系 土壤呼吸与温度的关系较为简单。采用指数关系式对土壤呼

吸速率与地温进行拟合。鼠丘及蚁塔处理的土壤呼吸与温度相关性较差, 其他处理相关性较好 ( $R^2 > 0.7000, P < 0.05$ , 图2), 其中, 封育和放牧处理下土壤呼吸与土壤温度的相关性最好, 其他处理相关性较差。土壤温度和土壤呼吸均呈正相关, 说明生长季土壤温度的升高对土壤呼吸的促进作用。放牧和对照处理的土壤呼吸值的动态变化与温度变化趋势一致, 这与其他学者在不同地区对天然草地和栽培草地管理土壤呼吸的研究结果一致<sup>[19-22]</sup>, 而鼠丘和蚁塔处理各月间差异均不显著, 这可能是由于土壤呼吸主要受鼠丘与蚁塔土壤动物和微生物的活动影响, 而温度对土壤呼吸速率的影响较小。

以土壤呼吸速率与温度之间的关系等式为基础计算得出封育、放牧、鼠丘、蚁塔处理的  $Q_{10}$  值依次为 2.39、4.66、2.03、2.29。放牧处理的  $Q_{10}$  值显著高于其他处理, 原因可能是放牧草地由于动物活动等干扰使得群落的盖度逐渐降低, 群落的组成和优势种发生了很大的变化, 植物群落及其土壤环境改变会导致土壤  $CO_2$  通量发生变化, 这与其他学者研究结果类似<sup>[23-26]</sup>。

为进一步探讨土壤温度对土壤呼吸温度敏感性大小 ( $Q_{10}$ ) 的影响, 拟合土壤呼吸速率与土壤平均温度关系, 并计算  $Q_{10}$  值(表3)。

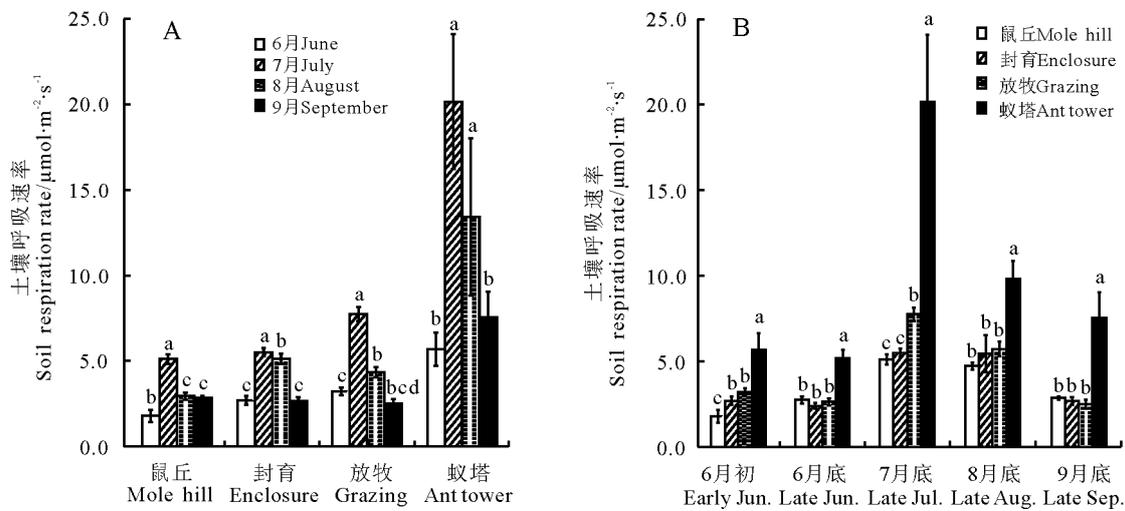


图1 不同处理土壤呼吸动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil respiration in different treatments

注: A 图中不同字母表同一块地不同月份间差异显著 ( $P < 0.05$ ), B 图中不同字母表示同一月份不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: A, Different letters for the same sample plot mean significant difference among different months at 0.05 level; B, Different letters for the same time mean significant differences among different treatments at 0.05 level.

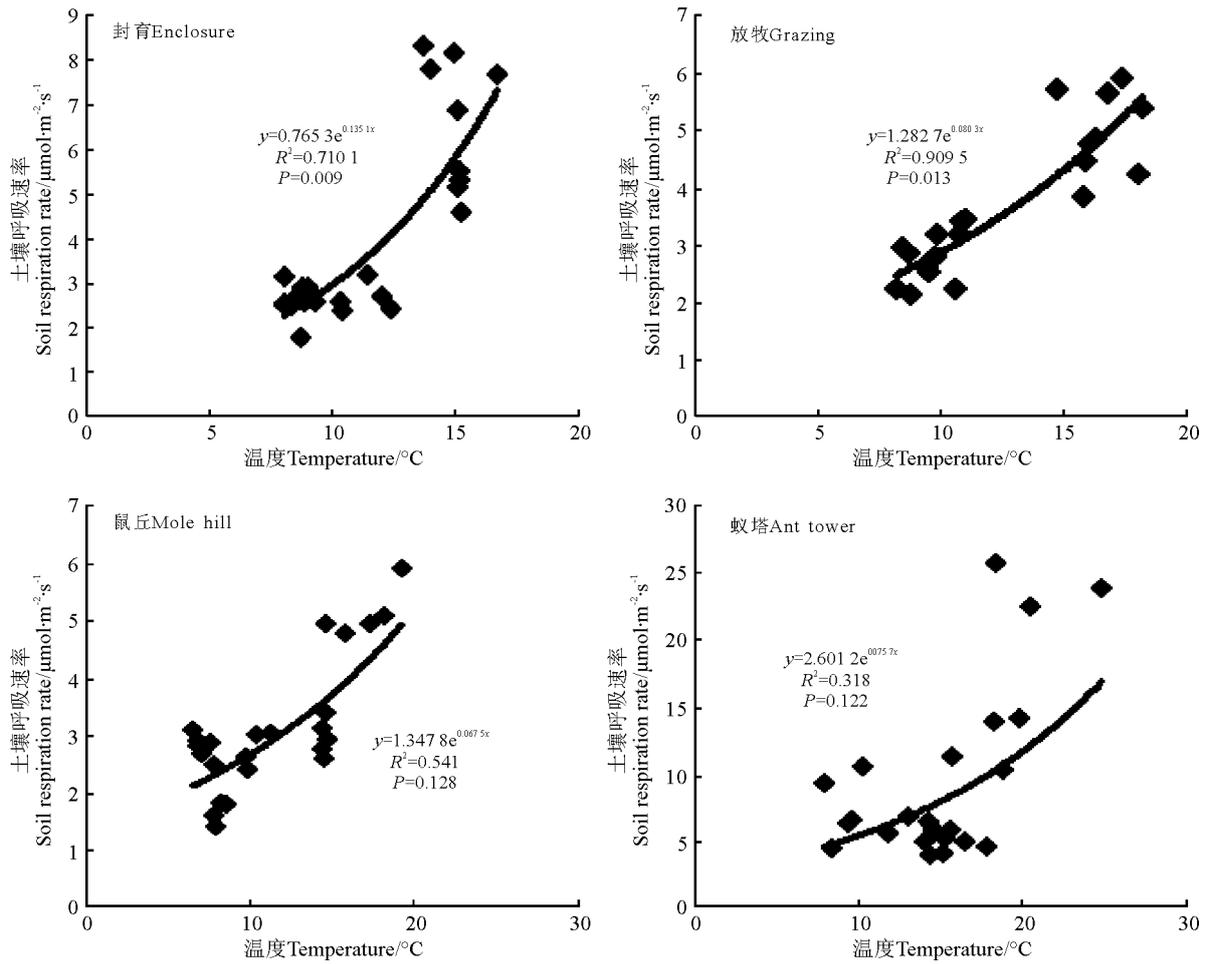


图2 4种不同处理下的土壤呼吸与土壤温度拟合

Fig. 2 Fitting of soil respiration and soil temperature in four kinds of different treatment

表3 2012年6-9月土壤呼吸 Q<sub>10</sub>值和0-5 cm 土层平均温度

Table 3 Q<sub>10</sub> value, soil temperature at 0-5 cm depth under different treatments from September to June, 2012

月份 Month	Q <sub>10</sub>				0-5 cm 土层平均温度 Soil temperature at 0-5 cm depth/°C			
	封育 Enclosure	蚁塔 Ant tower	鼠丘 Mole hill	放牧 Grazing	封育 Enclosure	蚁塔 Ant tower	鼠丘 Mole hill	放牧 Grazing
6月初 Early June	2.29	0.46	0.86	2.05	8.22	13.61	8.04	10.28
6月底 Late June	1.49	0.89	3.94	1.21	11.30	15.49	10.23	9.39
7月 July	0.99	0.50	1.40	0.79	14.88	21.14	16.92	16.80
8月 August	1.00	4.66	10.91	0.17	15.17	17.79	14.43	16.53
9月 September	1.27	2.75	0.99	11.25	8.88	9.07	6.92	8.68

在没有考虑土壤湿度的情况下,4处理土壤呼吸与地温在低温时拟合效果要高于温度较高的月份。6月初和8月份,放牧与封育处理土壤呼吸与土壤温度的相关性的决定系数(R<sup>2</sup>)高于6月底和7月份。在土壤平均温度高于15℃时,4个处理的土

壤呼吸 Q<sub>10</sub> 值在 0.15~1.50 之间变化,温度低于 15℃时,Q<sub>10</sub> 值在 2.0 以上。Q<sub>10</sub> 值存在高温时较低而低温时较高的现象,表明在低温时土壤呼吸对温度的变化更敏感。

蚁塔和鼠丘处理在温度较低的6月初和9月底

$Q_{10}$  值较低, 温度与  $Q_{10}$  值同步变化。当温度大于  $10^{\circ}\text{C}$  时, 两处理的  $Q_{10}$  值变化与对照处理变化相同, 当温度小于  $10^{\circ}\text{C}$  时, 这种变化呈相反的状态。冬季低温状态下的变化有待进一步论证。

**2.2.2 土壤呼吸与土壤湿度的关系** 与土壤温度和土壤呼吸之间相对一致的关系模式不同, 研究中土壤湿度与土壤呼吸之间没有较一致的关系。土壤湿度与土壤呼吸之间包括线性、对数、二次式和抛物线等多种函数关系<sup>[27]</sup>。土壤呼吸对湿度的响应不

一致, 其中一部分原因是湿度对  $\text{CO}_2$  产生和传输过程的复杂调节机制, 另一部分原因是野外湿度状况的波动。本研究以土壤呼吸为因变量、土壤湿度为自变量进行二项拟合分析, 结果表明, 土壤呼吸和土壤水分均呈负相关, 相关性较差, 除鼠丘及放牧处理的  $R^2$  值在  $0.10\sim 0.12$  之间外, 土壤呼吸与土壤水分的关系在各处理之间差异均不显著 ( $P>0.05$ , 表 4)。同时, 用其他模型对两者进行分析, 得出差异均未达到显著水平。

表 4 土壤呼吸与土壤湿度的拟合关系

Table 4 The relationship between soil respiration and soil moisture

处理 Treatment	拟合方程 Model	$R^2$	$P$
鼠丘 Mole hill	$R_S = -151.178M^2 + 61.212M - 1.153$	0.670	0.330
放牧地 Grazing	$R_S = -214.613M^2 + 112.843M - 8.165$	0.419	0.581
封育地 Enclosure	$R_S = -90.055M^2 + 55.049M - 4.311$	0.065	0.935
蚁塔 Ant tower	$R_S = -197.806M^2 + 70.140M + 7.319$	0.112	0.888

注: 表示  $R_S$  表示土壤呼吸速率,  $M$  表示土壤湿度。

Note:  $R_S$ , Soil respiration rate;  $M$ , Soil humidity.

土壤呼吸与温度之间存在显著的指数关系, 为了消除温度的这种混淆效果, 有必要将土壤呼吸标准统一, 然后再进行水分对土壤呼吸的影响分析。因此按照下式将土壤呼吸标准化<sup>[28]</sup>:

$$Y_{10} = Y_T \times e^{0.0489(10-T)} \quad (3)$$

式中,  $Y_{10}$  是标准化到  $10^{\circ}\text{C}$  时的土壤呼吸速率,  $Y_T$  是温度为  $T$  时的实际土壤呼吸速率,  $T$  为实测土壤温度。得出, 鼠丘、放牧、对照和蚁塔处理拟合模型的相关系数分别为  $0.763$ 、 $0.197$ 、 $0.617$ 、 $0.025$ ,  $P>0.05$ 。结果表明, 消除温度的混淆影响效果后, 除对照和鼠丘处理的土壤湿度与土壤呼吸速率相关性较好外, 其他处理的土壤湿度与土壤呼吸速率相关性均不明显; 且不同处理间的差异均不显著。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 土壤呼吸速率季节动态

土壤呼吸表现为单峰变化趋势, 与土壤温度变化趋于一致。鼠丘、放牧样地、对照和蚁塔处理的土壤呼吸速率最大值分别为  $5.110$ 、 $7.756$ 、 $5.508$  和  $20.155 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 均在 7 月份植物生长盛期时出现; 最小值分别为  $1.79$ 、 $2.42$ 、 $2.39$  及  $5.19 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 6 月份植物生长初期和 9 月份植物生长末期。其中放牧处理的土壤呼吸值均

大于对照处理, 这与部分学者提出的放牧优化假设一致, 即适当的放牧强度对土壤呼吸有一定的促进作用。本研究选取的鼠丘地上植物少且多为细叶亚菊 (*Ajania tenuifolia*) 等杂类草, 鼠丘处于演替初期<sup>[29]</sup>, 形成时间短, 土壤质地疏松, 通透性良好, 植物种丰富度极低, 因此鼠丘的土壤呼吸值最低。

#### 3.2 土壤呼吸速率与温湿度的关系

一般认为, 土壤温度与土壤呼吸关系密切<sup>[30-32]</sup>。观测期间的土壤温度处于  $6\sim 24^{\circ}\text{C}$ , 低值出现在生长季初期和生长季末期, 分别为  $7.78$  和  $6.42^{\circ}\text{C}$ , 最高值出现在生长盛期, 与土壤呼吸同步。因此得出, 当土壤温度大于  $0^{\circ}\text{C}$  时, 各处理下土壤温度与土壤呼吸均存在正相关性, 这与谭炯锐等<sup>[33]</sup>对人工林的研究结果一致。且各处理相关系数  $R^2>0.45$ , 相关性均较好, 同样表明了土壤温度与土壤呼吸有较高的相关性。

当土壤表面的温度在  $6\sim 24^{\circ}\text{C}$  时,  $Q_{10}>2$ , 即在此范围内土壤呼吸增加  $10^{\circ}\text{C}$  土壤呼吸增大两倍多, 放牧处理的土壤呼吸甚至增大 4 倍多。由此可见, 海北地区温度增加对土壤呼吸影响较大, 全球气候变化与全球碳循环的关系十分密切。

本研究中, 土壤水分对土壤呼吸的影响均不显著, 且土壤温度保持相对恒定时, 水分对土壤呼吸的

影响也不显著。但并不排除土壤湿度对土壤呼吸速率的作用,土壤湿度对土壤呼吸速率的影响可能在大时间尺度内有明显效应,在特定范围或在较小范围内的变化对土壤呼吸的影响不显著,这与陈全胜的研究结果一致<sup>[34]</sup>。同时也不排除是由土壤 CO<sub>2</sub> 的排出、生物的干扰以及根际的其他复杂过程等造成的。例如,如果根的生长超过地上部分的生长,可能会导致根际呼吸释放的 CO<sub>2</sub> 超过地上部分光合作用吸收的 CO<sub>2</sub>,改变土壤水分对土壤呼吸速率的影响。

蚁塔处理的土壤呼吸速率与温度(尤其是与土壤湿度)的相关性较差,但是在季节动态中蚁塔的土壤呼吸季节动态变动在各处理中最大,可见土壤温湿度等环境因子并不是决定该处理土壤呼吸速率的最主要因素,可能与生物因子有关。很多研究<sup>[35-36]</sup>都已表明,与其他土壤相比,蚁丘土壤的有机质、P、

N 和 K 的含量相对较高,蚂蚁及老鼠等动物的呼吸、筑丘及取食等活动常能引起微环境的异质性,从而强烈的影响土壤呼吸速率,这有待控制试验的进一步研究。

值得注意的是,本研究只探讨了水热条件对土壤呼吸的影响,影响土壤呼吸速率的因素还包括植被和土壤微生物的生物多样性,以及底物供应、土壤养分、土壤质地、生物干扰等因素,底物供应对土壤呼吸的控制主要表现在冠层光合作用及凋落物为微生物呼吸提供大量的碳底物两方面;作为土壤养分的氮素影响凋落物分解因而影响微生物呼吸;土壤质地通过土壤孔隙度、湿度和肥力而影响土壤呼吸<sup>[18]</sup>。目前,关于该地区生物干扰变化规律、作用及其所引起的一系列生理生态过程的变化还不十分清楚,有待进一步研究。同时,非生长季的土壤呼吸特征以及影响因素同样具有重要研究价值。

## 参考文献

- [1] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: A grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 229-233.
- [2] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 736-753.
- [3] Forbis T A, Larmore J, Addis E. Temporal patterns in seeding establishment on pocket gopher disturbances[J]. *Oecologia*, 2004, 38: 112-121.
- [4] Redgers W E, Hartnett D C, Elder B. Effects of plants pocket gopher (*Geomys bursarins*) disturbances on tallgrass prairie plant community structure[J]. *The American Midland Naturalist*, 2001, 145: 344-357.
- [5] Reztutek M, Cameron G N. Vegetative edge effects and pocket gopher tunnels[J]. *Journal of Mammalogy*, 2000, 81(4): 1062-1068.
- [6] Questad E J, Foster B L. Vole disturbances and plant diversity in a grassland metacommunity[J]. *Oecologia*, 2007, 153: 341-351.
- [7] Helldobler B, Wilson E O. *The Ants*[M]. USA: Belknap Press of Harvard University Press, 1990: 1-732.
- [8] Patricia J F. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: A review[J]. *Biodiversity and Conservation*, 1998, 7: 1221-1244.
- [9] King T J. The plant ecology of ant-hills in calcareous grasslands: I. Patterns of species in relation to ant-hills in Southern England[J]. *Journal of Ecology*, 1977, 65: 245-256.
- [10] 赵有益, 龙瑞军, 林慧龙, 任继周. 草地生态系统安全及其评价研究[J]. *草业学报*, 2008, 17(2): 143-150.
- [11] 孙飞达, 龙瑞军, 郭正刚, 刘伟, 干友民, 陈文. 鼠类活动对高寒草甸植物群落及土壤环境的影响[J]. *草业科学*, 2011, 28(1): 146-151.
- [12] 杨时海, 李英年, 蒲继延, 马玉寿, 赵亮, 周华坤, 王长庭. 三种高寒草甸植被类型植物群落结构及其土壤环境因子研究[J]. *草地学报*, 2006, 14(1): 77-83.
- [13] Knapp A K, Conard S L, Blair J M. Determinants of soil CO<sub>2</sub> flux from a sub-humid grassland: effect of fire and fire history[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 760-770.
- [14] Kuzyakov Y. Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 425-448.

- [15] 贾丙瑞,周广胜,王凤玉,王玉辉. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较[J]. 应用生态学报,2004,15(9): 1611-1615.
- [16] Redmann R. Soil respiration in a mixed grassland ecosystem[J]. Canadian Journal of Soil Science,1978,58(2):119-124.
- [17] Gordon A M, Schlentner R E, Cleve K V. Seasonal patterns of soil respiration and CO<sub>2</sub> evolution following harvesting in the white spruce forests of interior Alaska[J]. Canadian Journal of Forest Research,1987,17(4):304-310.
- [18] 骆亦其,周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬,译. 北京:高等教育出版社,2007:72-88.
- [19] Buyanovsky G A, Kucera C L, Wagner G H. Comparative analyses of carbon dynamics in native and cultivated ecosystems[J]. Ecology,1987,68(6):2023-2031.
- [20] Bridge N, Mott J, Hartigan R. The formation of degraded areas in the dry savanna woodlands of northern Australia[J]. Soil Research,1983,21(1):91-104.
- [21] 李凌浩,王其兵,白永飞. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. 植物生态学报,2000,24(6): 680-686.
- [22] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology and Biochemistry,1995,27(6):753-760.
- [23] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,闫志丹,王艳芬,张焱,袁志友,唐芳. 温带草原 11 个植物群落夏秋土壤呼吸对气温变化的响应[J]. 植物生态学报,2003,27(4):441-447.
- [24] 谢静霞,翟翠霞,李彦. 盐生荒漠与绿洲农田土壤 CO<sub>2</sub> 通量的对比研究[J]. 自然科学进展,2008,3(18):262-268.
- [25] 曹广民,李英年,张金霞,赵新全. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO<sub>2</sub> 的释放量[J]. 环境科学,2001,22(6):14-19.
- [26] Langley J A, Magonigal J P. Ecosystem response to elevated CO<sub>2</sub> levels limited by nitrogen-induced plant species shift[J]. Nature,2010,466(7302):96-99.
- [27] Davidson E A, Verchot L V, Henrique J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. Biogeochemistry,2000,48:53-69.
- [28] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,闫志丹,王艳芬,袁志友. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报,2003,27(2):202-209.
- [29] 江小雷,张卫国,杨振宇,杜国祯. 不同演替阶段鼯鼠土丘群落植物多样性变化研究[J]. 应用生态学报,2004,15(5): 814-818.
- [30] 王森,韩士杰,王跃思. 影响阔叶林红松林土壤 CO<sub>2</sub> 排放的主要因素[J]. 生态学杂志,2004(5):24-29.
- [31] 刘颖,韩士杰,胡艳玲,戴冠华. 土壤呼吸和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1581-1585.
- [32] 孙轶,魏晶,吴钢,赵景柱. 长白山高山冻原土壤呼吸及其影响因子分析[J]. 生态学杂志,2005,24(6):603-606.
- [33] 谭炯锐,查同刚,张志强,孙阁,戴伟,方显瑞,徐帆. 土壤温湿度对北京大兴杨树人工林土壤呼吸的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(5):2308-2315.
- [34] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,闫志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报,2003,23(5):972-978.
- [35] 陈应武,李新荣,苏延桂,冀彩虹,贾晓红,张志山. 腾格里沙漠人工植被区掘穴蚁(*Formica cunicularia*)的生态功能[J]. 生态学报,2007,27(4):1508-1514.
- [36] Mandel R D, Sorenson C J. The role of harvester ant(*Pogonomyrmex occidentalis*) in soil formation[J]. Soil Science Society of America Journal,1982,46:785-788.

(责任编辑 王芳)