

模拟增温及施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响^{*}

王珍, 赵萌莉, 韩国栋, 高福光, 韩雄

(内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019)

提 要: 以内蒙古高原四子王旗短花针茅建群的荒漠草原为研究对象, 通过野外自然条件下进行的模拟增温和增施氮肥实验, 研究了增温、施氮及增温+施氮情况下土壤呼吸强度的变化。三年的研究结果表明: 1) 增温对各年内土壤呼吸没有产生显著影响, 但土壤呼吸有明显的季节变化, 而且与增温显著相关 ($P < 0.05$)。2) 施氮对荒漠草地的影响程度与自然条件有密切关系, 其中降雨量多少是施氮对荒漠草地土壤呼吸影响程度的重要制约因素, 降雨量越高氮素对土壤呼吸作用愈加明显。3) 施氮显著增加了植物群落的地下生物量 ($P < 0.05$), 土壤呼吸与地下生物量呈显著的正相关 ($P < 0.001$)。

关键词: 荒漠草原; 增温; 施氮; 土壤呼吸; 地下生物量

中图分类号: S152

文献标识码: A

IPCC(International Governmental Panel on Climate Change 政府间气候变化专门委员会)的第四次报告得出这样一个结论, 气候变暖的客观事实不容置疑^[1], 从1850年到今, 全球地表的平均温度增加了0.76℃, 而预计到本世纪末全球温度将增加1.8℃(IPCC 2007)。因此, 温室效应和全球变化对生态系统的影响成为众多科学工作者、各国政府及普通民众共同关注的焦点问题。

土壤呼吸既是土壤中异养微生物和植物根系进行生命活动的标志^[2], 也是碳循环的重要组成部分^[3]。土壤呼吸作为陆/气间碳通量的重要组成部分, 其微小的变化将对陆地碳收支格局产生很大的影响。土壤呼吸是土壤向大气释放CO₂的过程, 主要由土壤微生物(异养呼吸)和根系(自养呼吸)产生, 另有极少部分来自土壤动物呼吸和含碳矿物质的化学氧化作用^[4]。大量的研究表明, 在全球变暖的情况下除了一些沙漠地区, 土壤呼吸均随温度的升高而增加^[5-6]。氮素的添加对土壤呼吸不能产生直接的影响, 但土壤中氮的变化可能影响微生物的活性, 微生物活性的变化将会影响其呼吸, 最终影响土壤CO₂的排放^[7]。

荒漠草原生态系统是内蒙古草原的重要组成部分, 也是草原区向荒漠区过渡的旱生性最强的草原生态系统。它是一个生态环境脆弱带, 它对我国整个北方草地的保护和退化治理都有非常重要的现实意义。文中通过野外自然条件下对荒漠生态系统进行增温与施氮处理, 研究全球变暖对荒漠草地土壤呼吸的影响, 为荒漠草地的利用及其生态系统持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗王府一队, 地理位置为: 东经111°53′41.7″, 北纬41°46′43.6″, 海拔1456m。试验区深居欧亚大陆腹地, 属于典型的中温带大陆性气候, 由于阴山山脉阻隔, 湿润的海洋气流难以深入, 降水量较少, 春季干旱多风, 夏季炎热。多年平均降水量为248mm, 年均蒸发量2947mm, 湿度为0.15~0.30, 降水量主要集中在6~9月, 占全年降水总量的70%以上; 多年平均气温3.4℃, 0cm地温为8.5℃, 月平均温度最高为6、7、8三个月, 年均气温分别为21.5、24.0、23.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$

^{*} 收稿日期: 2012-2-8。

基金项目: 国家自然科学基金(30860060); 国家科技部科学技术项目(2008BAD95B03)资助。

作者简介: 王珍(1981-), 男, 汉族, 内蒙古乌兰察布市人, 博士研究生, 研究方向为草地生态学。E-mail: wangzhen0318@126.com

通讯作者: 韩国栋 E-mail: grasslandkeylab@gmail.com

的年积温为 2200 ~ 2500℃, 无霜期 175 天。

试验区属于以短花针茅为建群种的荒漠草原, 草地植物群落类型为短花针茅 + 冷蒿 + 无芒隐子草, 植被草层低矮, 平均高度为 8cm, 且植被较稀疏, 盖度为 12 ~ 18%, 种类组成较贫乏, 植物群落主要由 20 多种植物组成。

2006 和 2007 年属于干旱年份, 试验样地年降雨量分别为 159.6mm 和 160.4mm, 属于极度干旱年份, 是近 40 年降雨量最低的两年, 而 2008 年属于降雨充足年, 年降雨量为 230.8mm。

1.2 试验设计与处理方法

1.2.1 试验设计

整个试验开始于 2006 年 5 月初, 试验区采用裂区设计。试验处理共设增温和施氮两个处理过程, 其中增温是主要的处理因素, 施氮是副处理因素。整个试验样地设 4 个处理水平, 即对照 (CK)、增温 (W)、施氮 (N) 和增温施氮 (WN), 每种处理 6 个重复。各试验小区面积均为 12m² (3m × 4m), 其中一半 (3m × 2m) 为施氮处理, 一半不施氮, 整个试验样地总面积为 144m²。每年 7 月上旬雨季进行施肥处理, 肥料为硝酸铵 (NH₄NO₃, 含氮 33% ~ 35%), 施肥量为 10g/m²。增温区内各安装一个红外线辐射器 (Infrared Radiator) 进行增温处理, 该装置是通过悬挂在样地中央上方、可以散发红外线辐射的灯管来实现模拟气候变暖^[10], 是目前国际上公认的增温措施。红外线辐射器由美国伯利恒 Kalglo 电子公司生产 (Kalglo Electronics, Bethlehem, PA, USA), 型号: MSR-2420, 规格: 165 × 15cm, 辐射器距地面垂直距离 2.25m, 安放于试验小区的中间部位, 灯的最大功率是 2000W, 使用时调至 8 档, 全年不间断加热。每个对照区的中间部位, 距地面垂直距离 2.25m 也安装了与红外线辐射器大小、形状相同的“假灯”, 以降低或消除辐射器遮荫或其它因素造成的实验误差。

1.2.2 土壤温度的测定

从 2006 年 6 月 24 日至 2008 年 10 月 11 日实验期间, 平均每周测定一次 10cm 土壤温度和土壤含水量。07、08 年温度采集均从 4 月上旬开始采集, 到 11 月份结束, 平均每周测定 1 次。每个处理小区内 (共 24 小区) 随机安装一组测定土壤温度的探头, 并采用 Omega 公司生产的手持温度计 (hand held thermometer, 型号: HH-25TC (Laval, QC)) 土壤温度进行测定。测定土壤湿度的探头由 ONSET 电脑公司生产, 型号: S-SMA-M003, 采用 HOBO 软件记录数据。土壤温度和土壤湿度测定仪器尽量放置在样地周边, 以免人为踩踏影响植物的正常生长, 由于实验仪器限制, 土壤湿度测定没有考虑施肥影响。

1.2.3 地下生物量的测定方法

地下生物量的测定用根系生长芯法进行, 每个处理样地选取一个点, 用土钻将土取出, 去除根系后将净土装入网袋, 在植物生长初期把网袋置入样地内的土钻空洞中 (深度为 30cm), 到生长季末期将网袋取出, 分 3 层 (0-10cm、10-20cm、20-30cm) 取出其中根系, 带回室内过筛清洗。用镊子将根系从筛子中挑出, 不区分死根和活根, 分层装入纸袋, 80℃ 恒温下经 24h 烘至恒重, 称其干重。根据网袋规格 (直径 10cm, 长 40cm) 计算出的地下生物量的单位为 g/785.4cm³。

1.2.4 土壤呼吸

LI-6400 便携式光合作用测量系统 (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) 和 LI-6400-09 土壤呼吸叶室联合使用进行土壤呼吸速率的测定。实验进行前, 在每个实验小区 (共 24 个) 内安置一个 PVC 管基座 (圆形聚丙烯材料), 高 8cm, 直径 10.5cm, 6cm 插入土中, 地上留 2cm, 同时将 PVC 管基座内的植被齐地刈割, 测定时将土壤呼吸室 (内径为 10.3cm) 放置在 PVC 管基座上, 达到密闭状态, 以减少土壤表层对土壤呼吸测定的干扰。每年 6 ~ 10 月 (每月 2 次) 选择晴朗天气, 进行土壤呼吸速率的季节变化测定, 每次测定在 8:00 ~ 12:00 完成。同时, 植物生长盛期 (8 月上旬) 进行土壤呼吸速率的日动态测定, 昼夜连续测定 (24h), 每 3h 进行 1 次。土壤 10cm 处的温度用 LI-6400 光合作用分析系统配带的土壤温度探针测定。

运用 sigmaplot 10.0 进行作图, 采用 SAS9.1 (SAS Institute, Cary, NC, 9.1, USA) 软件包对相关数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤温度与土壤含水量

野外自然条件下进行生态系统控制性增温和施肥处理, 最明显的特征就是土壤温度的改变。由图 1a

可知:红外辐射器对土壤温度产生了影响,在地下 10cm 土层,增温施氮、增温处理土壤温度显著的高于对照 ($P < 0.01$),而增温施氮与增温处理二者之间没有差异 ($P > 0.05$)。施氮与对照样地的土壤温度没有差异。从图 2b 可以看出:增温与对照处理地下 10cm 的土壤含水量没有形成显著差异。

2.2 地下生物量

图 2 可知:06 年对照样地的地下生物量最高,增温样地的地下生物量最低,说明增温对植物根系的生长产生抑制作用;而 06 年增温施氮、施氮处理的地下生物量与对照处理生物量相差不大,说明施氮的作用没有体现。07 年施氮的地下生物量最高,增温样地的地下生物量最低,施氮处理与增温处理差异显著 ($P < 0.01$);08 年地下生物量表现为施氮 > 增温施氮 > 对照 > 增温,说明氮素刺激荒漠草地地下生物量积累,而增温使荒漠草地地下生物量减少。

2.3 不同处理下土壤呼吸速率的季节变化

从图 3 可以看出:2006 年对照样地年平均土壤呼吸速率值最高 ($1.189 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),而增温样地年平均土壤呼吸值最低 ($1.029 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),但各处理间没有显著差异;2007 年增温施氮区年平均土壤呼吸值最高 ($1.161 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),而增温区的土壤呼吸值最低 ($1.039 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);2008 年各处理土壤呼吸最高值也出现在 8 月份,相对于其它样地,增温样地年平均土壤呼吸值最高 ($2.206 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),对照样地的土壤呼吸值最低 ($1.920 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。从三年总体上看:土壤呼吸速率的最大值均出现在温度较高的 8 月份,在植物生长季末,随着温度的下降,土壤呼吸速率降低,植物生长旺盛期的土壤呼吸作用明显大于生长后期,但方差分析三年各处理之间均无显著差异 ($P > 0.05$, 表 1)。

表 1 2006、2007 和 2008 年不同处理土壤

呼吸 ANOVA 方差分析 F (F values) 结果表

Tab. 1 ANOVA test (F-values) to soil respiration under different treatments in 2006, 2007 and 2008

	2006	2007	2008
W	0.089	0.203	0.032
N	0.094	0.028	0.032
WN	0.025	0.005	0.295

2.4 不同处理下土壤呼吸速率的日变化

在植物生长的旺盛期(8月)选择晴朗的天气,对土壤呼吸日动态(24h)进行监测的结果发现(图4):三年不同处理土壤呼吸速率日变化表现出单峰曲线形式,大致在上午 8:00 左右开始迅速上升,而到了下午 18:00 左右又开始迅速下降。土壤表层温度也有相类似的单峰曲线变化趋势,土壤温度的峰值出现在 12:00 ~ 15:00,与温度变化相比,土壤呼吸峰值出现的时间较滞后,夜间的土壤呼吸较低,夜间 0:00 ~ 3:00 土壤呼吸和土壤温度都处于全天的最低点。由于白、昼期间气候条件的变化(主要是温度变化),白天的土壤呼吸作用明显大于夜晚。比较增温与对照样地发现,土壤呼吸日动态在 06、07 年增温作用下的土壤呼吸速率在测定各个时间段几乎都低于对照样地,这可能与土壤根系分布、微生物群落组成与活动有关。因为在水分受限的荒漠草原,连续两连的干旱(06、07 年),加之两年的增温,导致了地上与地下生物量的严重下降(图2),从而制约了微生物的活动,造成增温样地的土壤呼吸值低。也有报道水分条件的限制会降低本应随温度增加的土壤呼吸量^[8],与文中的结论一致。08 年充足的降雨量满足了根系生长

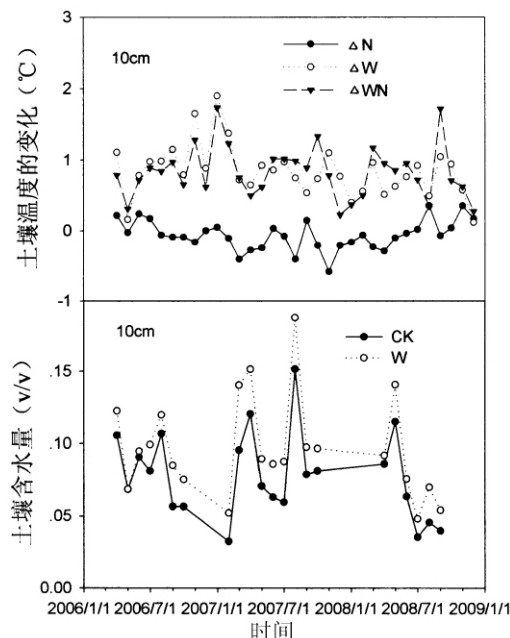


图 1 2006-2008 年 10cm 土壤温度与土壤含水量变化图

Fig. 1 The change of monthly mean soil temperature and soil water content at 10cm depth of soil from 2006 to 2008

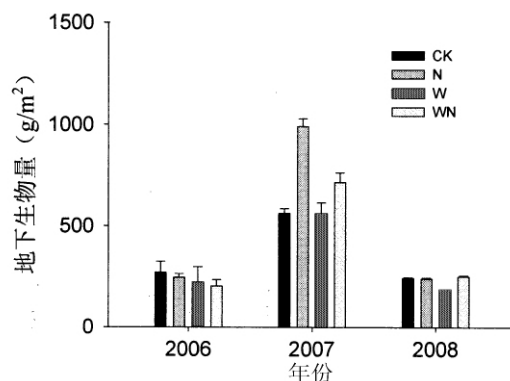


图 2 2006 2007 和 2008 年不同处理地下生物量变化 (unit: g/m²)

Fig. 2 Mean under-ground biomass at different treatment from 2006 to 2008

和微生物活动的需求,因而导致了增温样地的土壤呼吸值高于对照。而增温施氮和施氮处理平均土壤日变化值均低于对照(06-08年),但经方差处理均无显著差异。

从表2可知:07年增温对土壤呼吸值影响显著($P < 0.01$),而其它各处理在三年内均无差异。06、07年日平均土壤呼吸值均为对照样地最高(分别为 $0.52 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.83 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),而08年施氮样地的日平均土壤呼吸值最高($3.187 \text{ molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

表2 2006、2007和2008年不同处理日土壤呼吸 ANOVA 方差分析 F(F values) 结果表

Tab.2 ANOVA test (F-values) daily soil respiration of different treatments in 2006, 2007 and 2008

	2006	2007	2008
W	1.31	11.6**	1.05
N	0.07	0.59	0.39
WN	2.01	2.97	0.7

注: ** $P < 0.01$

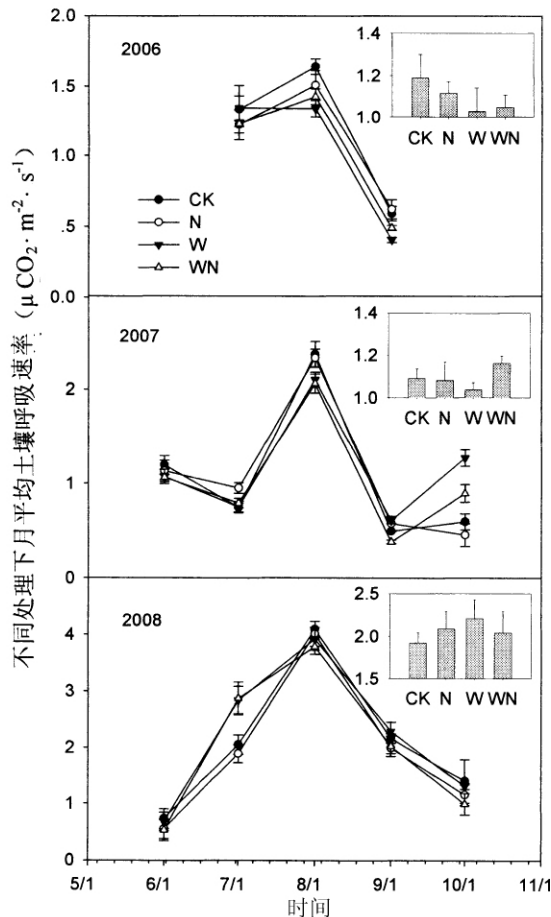


图3 不同处理月土壤呼吸变化速率

Fig.3 Mean soil respiration rate in different treatments

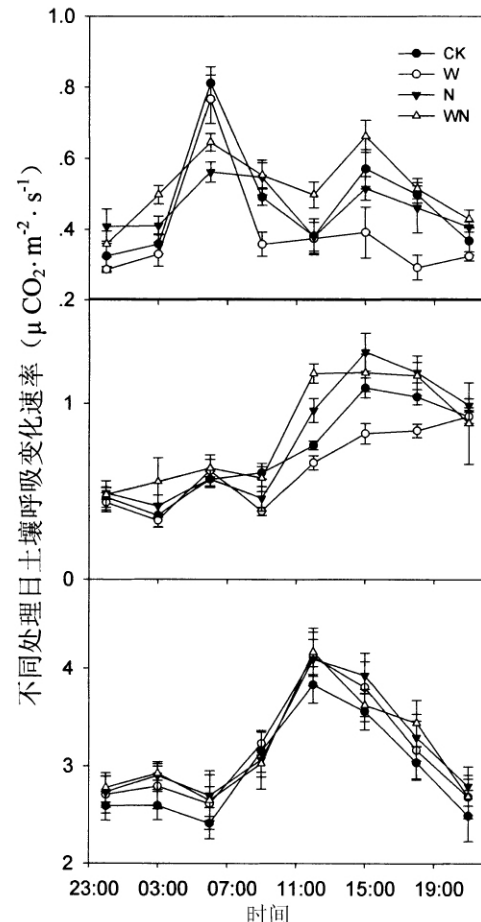


图4 不同处理日土壤变化速率

Fig.4 Daily soil respiration rate change in different treatments

2.5 土壤温度、土壤含水量与年平均土壤呼吸的关系

试验结果表明(图5):土壤呼吸的年均值随着土壤含水量、地下生物量呈线性增加($P < 0.05$),而土壤呼吸的年均值对地下生物量的敏感性高于土壤含水量。土壤呼吸的年均值与土壤温度呈负相关关系($P < 0.05$)。

3 讨论

作为陆地生态系统与大气之间第二大碳通量,土壤呼吸在调控气候与碳循环反馈的关系中扮演着重要的作用。土壤呼吸的变化与温度、水分以及生物量的变化存在着密切的关系^[10]。增温可以通过直接刺激根系和微生物的活性与呼吸来改变土壤呼吸^[11]。Xia等(2009)^[12]对我国典型草原生态系统的研究认为增温没有改变土壤呼吸,其主要原因是:增温通常会促进生态系统土壤呼吸,但增温也致使生态系统水分利用效率下降和加剧了对生态系统碳吸收过程的负作用,因此增温自身的正效应与增温对土壤湿度及生态系统初级生产力带来的负面效应相互抵消导致了上述的结果。这与文中的研究结果一致。在文中的

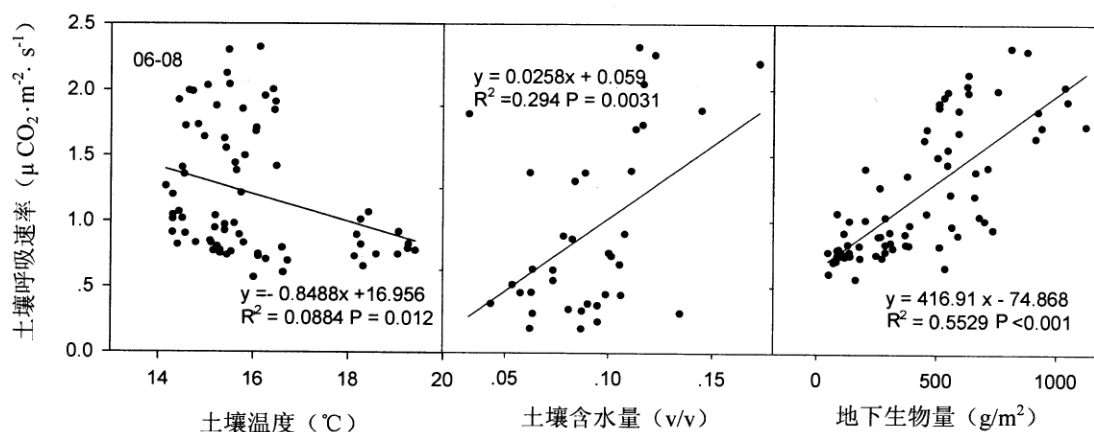


图 5 年平均土壤温度、年平均土壤含水量、植物地下生物量与土壤呼吸的关系

Fig. 5 Relations between soil respiration and soil temperature, soil water content every time and under-ground biomass

研究中,在降雨量不足的 06、07 年,增温样地的土壤呼吸值低于对照;在降雨量充足的 08 年,增温样地的土壤呼吸值高于对照,但增温与对照下的土壤呼吸速率在季节变化与日变化的条件下均没有显著差异,产生这一结果的主要原因是水分限制的半干旱、干旱区草地生态系统,土壤湿度对土壤呼吸的影响更为强烈,表现较为强烈的季节变化,而且也与实验进行的时间短和其他的环境因素(如:生态系统生产力等)有密切的关系。

增温也可以通过间接地影响地上部分生产力和降低土壤水分有效性改变土壤呼吸^[13](Rustad et al., 2001)。植被覆盖度不同会影响土壤的湿度和温度,进而间接影响着土壤呼吸。就植被根系来说,根系的密度、分布深度也会影响根系的呼吸强度。植被类型发生变化,则土壤与大气之间的 CO_2 通量也会发生变化。Wan 等(2007)^[14]的研究认为地下生物量与土壤呼吸显著相关。同样,在文中的研究中,土壤呼吸季节变化与地下生物量显著线性相关(图 5, $P < 0.001$),即土壤呼吸随地下生物量的增加而增高。

氮素是陆地生态系统植物生长需要最多的营养元素之一,氮的输入增加了土壤矿质养分,改善了土壤碳氮比等性状,并能提高微生物活性,增加土壤呼吸的供应,从而促进了土壤的呼吸作用^[5, 7]。文中的研究结果显示:06、07 年施氮样地的土壤呼吸速率与对照样地基本相等,施氮对于土壤呼吸没有影响。这主要是由于在干旱区草地生态系统水分限制了氮素作用的发挥。而在 08 年雨水充足年施氮样地的土壤呼吸值高于对照,尽管方差处理上没有差异,说明施氮提高微生物活性,增加了植物的光合作用,从而促进了土壤呼吸。

4 结论

(1) 增温没有改变生态系统土壤呼吸速率。土壤呼吸的季节变化和日变化呈现出与土壤温度变化一致变化的趋势,而且土壤呼吸速率与土壤温度、土壤含水量显著正相关。

(2) 增施氮肥同样没有增强荒漠草原生态系统的土壤呼吸速率。

(3) 水分对生态系统的土壤呼吸有强的限制作用,即在降雨量相对充足的 2008 年,生态系统的土壤呼吸显著高于降雨量相对较低的 2006 和 2007 年。

参考文献

- [1] IPCC. IPCC WG1 Fourth Assessment Report. Climatic Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change 2007.
- [2] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L & Clark K L. Soil CO_2 efflux and its variation in Florida slash pine plantation[J]. Plant and Soil, 1998, 205: 135 - 146.
- [3] Raich J W & Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44 (B): 81 - 99.
- [4] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest[J]. Global Change Biology, 2003, 9: 911 - 918.
- [5] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, Newkirk K M, Bowles F P, Aber J D. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures[J]. Ecological Applications, 1994, 4: 617 - 625.

- [6] Ineson P, Benham D G, Poskitt J, et al. Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soils. 2. A soil warming study[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(1): 153–161.
- [7] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的进展研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778–785.
- [8] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest[J]. *Plant and Soil*, 1997, 190: 127–141.
- [9] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration interrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1977, 43: 449–528.
- [10] Lundegardh H. Carbon dioxide evolution and crop growth[J]. *Soil Science*, 1927, 23: 417–453.
- [11] Wan S, Luo Y, Wallace L L. Changes in microclimate induced by experimental warming and clipping in tallgrass prairie[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 754–768.
- [12] Xia J, Han Y, Zhang Z, Zhang Z, Wan S. Effects of diurnal warming on soil respiration are not equal to the summed effects of day and night warming in a temperate steppe[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6: 1361–1370.
- [13] Rustad L E. The response of terrestrial ecosystems to global climate change: towards an integrated approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 404: 222–235.
- [14] Wan S Q, Norby R J, Ledford J, Weltzin J F. Response of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2411–2424.

Response of soil respiration to simulated warming and N addition in the desert steppe

WANG Zhen, ZHAO Mengli, HAN Guodong, GAO Fuguang, HAN Xiong

(College of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019, P. R. China)

Abstract: We studied the effect of warming, nitrogen fertilizer and their interaction of the warming and the nitrogen fertilizer on soil respiration of the communities of the *Stipa breviflora* desert steppe in Inner Mongolia. Three years' study showed the evident temperature was linearly and positively correlated with mean soil respiration in three years, however, elevated temperature had not impact on soil respiration. Secondly, there were close relationships between the natural conditions and the effect of the nitrogen fertilizer to the desert grassland, among them the rainfall was the main factor which had a positive effect to the nitrogen fertilizer. In high precipitation season, N addition promoted soil respiration. N addition significant increased under-ground biomass of the plants, and a significantly positive correlation was detected between under-ground biomass and soil respiration ($P < 0.001$).

Key words: desert steppe; warming; N addition; soil respiration; below-ground biomass