

六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局

吴建国¹, 张小全², 徐德应² (1. 国家环境保护总局气候变化影响研究中心, 北京 100012; 2. 中国林业科学研究院森林生态与环境研究所, 北京 100091)

摘要:测定分析了六盘山林区典型的天然次生林[灌木林、山杨(*Populus davidiana* Dode)林和辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koiz.)林、农田、草地和人工林[13a、18a和25a华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)]土壤呼吸时间格局。结果显示:随着温度升高,土壤呼吸速率逐渐升高,温度最高值在13:00~15:00点钟,最低值在凌晨4:00~8:00点钟,土壤呼吸速度最高和最低值也在这个时间范围。5~10月,土壤呼吸速率呈现增加而又降低的趋势,在8~9月达最大值,10月下降,这种变化主要与土壤温度变化基本一致。农田和草地土壤呼吸速率的昼夜或月变化幅度比天然次生林和人工林中大,且农田和草地土壤呼吸速率在昼夜或月变化中的最高值比天然次生林和人工林高,最低值比天然次生林和人工林低。天然次生林土壤年呼吸量平均在3.96~4.51 t/(hm²·a),农田在1.91 t/(hm²·a),草地在5.08 t/(hm²·a),人工林在4.11~5.55 t/(hm²·a)。结果说明天然次生林变成农田或草地后,将使土壤呼吸速率的昼夜或月变化幅度增大,而农田或草地上造林后又将使这些变化幅度减小。另外,土地利用变化也将使土壤的年呼吸量改变。

关键词:土地利用变化;土壤呼吸;时间格局

中图分类号:X511, R124 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)06-10-0023

The Temporal Variations of Soil Respiration Under Different Land Use in Liupan Mountain Forest Zone

Wu Jianguo¹, Zhang Xiaoquan², Xu Deying² (1. Research Center of Impact of Climate Change of Chinese State Environmental Protection Administration, Beijing 100012, China; 2. The Institute of Forest Ecology and Protection of Chinese Academy of Forestry Science, Beijing 100091, China)

Abstract: The temporal variations of soil respiration under cropland, rangeland, natural secondary forest (brushwood, natural secondary forest dominated by *Quercus liaotungensis* Koiz. or *Populus davidiana* Dode) and the plantation of larch (13, 18 and 25-year-old *Larix principis-rupprechtii* Mayr) in Liupan Mountain forest zone was studied. It was found that the rate of soil respiration increased with increasing soil temperature during diurnal variation and the highest temperature was from 13:00 o'clock to 15:00 o'clock, the lowest temperature was from 04:00 o'clock and 08:00 o'clock, the variation of soil respiration rate appeared same trend. The daily rate of soil respiration increased from May to October and which was the highest from August to September and declined on October. The diurnal or seasonal variation of soil respiration rate mainly consisted with the diurnal or seasonal variation of soil temperature and its range under cropland or rangeland was greater than which under forestland (natural secondary forest, plantation or brushwood). The highest rate of soil respiration for diurnal or seasonal variation of soil CO₂ efflux under cropland or rangeland was higher than which under the forestland, while the lowest rate of soil respiration under cropland or rangeland was lower than which under forestland. Annual rate of respiration for natural secondary forest, cropland, rangeland and plantation was 3.96~4.51 t/(hm²·a), 1.91 t/(hm²·a), 5.08 t/(hm²·a) and 4.11~5.55 t/(hm²·a) respectively. The results show that the diurnal or seasonal variation range of soil respiration rate would increase with conversion from natural forests to cropland or rangeland, while which would decrease following afforestation under cropland or rangeland. In addition, the annual respiration rate would also change with change in land use.

Keywords: land use change; soil respiration; temporal variations

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40271109/D0124)

作者简介:吴建国(1971~),男,生态学博士,助理研究员,主要研究方向为土地利用变化,气候变化影响和土壤碳、氮循环。

收稿日期:2002-12-10;修订日期:2003-06-05

全球气候变暖及其影响是当前人类所面临的最为严重的环境问题之一.准确确定陆地生态系统碳“汇”的时间变化格局.影响因素和大气 CO_2 浓度变化的原因是一个关键.陆地生态系统碳循环中,土壤呼吸是大气 CO_2 重要排放源,其排放量是陆地生态系统向大气排放碳的最大通量之一^[1].据估计,全球土壤呼吸 CO_2 排放量约在 $68 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[2] ~ $100 \times 10^9 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[3],约为化石燃料碳排放量的 11 倍^[4],大气 CO_2 贮量的 10 %^[5].土壤呼吸是多因素影响的过程,表现有明显的昼夜、月份、年际和世纪变化,这些变化格局强烈影响着陆地生态系统碳“汇”强度和大气 CO_2 浓度的时间变化格局.在不同土地利用方式下,土壤呼吸强度和变化格局的差异较大. Raich 和 Schlesinger^[2]估计,草地土壤呼吸 CO_2 通量约 $0.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,热带森林约 $1.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,沙漠约 $0.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.土地利用方式变化后,这些格局和强度将发生变化,并进一步影响陆地生态系统碳“汇”强度和大气 CO_2 浓度的时间变化格局.由此,确定不同土地利用方式土壤呼吸的强度、影响因素和时间变化格局成为当前气候变化和碳循环研究的热点^[6~7].在过去 10 多年里,国外对不同区域森林、农田、草地和湿地土壤呼吸的强度^[8~10]、时间和空间变化格局^[11~18]、影响因素^[19~20]及模型模拟^[21~22]等都有大量的研究.但目前为止,对土壤呼吸的时间格局^[23]和土地利用变化影响^[24~26]方面还存在较大的不确定性.在我国,对土壤呼吸的研究也引起了重视,并对一些森林、草地和农田土壤呼吸的强度和影响因素进行了一些测定研究^[27~29],但这些研究还仅限于我国东部和青藏高原的个别农田、草地或森林,而对土地利用变化剧烈的黄土高原地区研究还较少,而且这些研究也还只是对单个土地利用方式的测定,对土地利用变化影响方面的研究还较少.另外,对土壤呼吸时间格局的研究也不多.

我国是土地利用变化较大的国家,尤其在陕、甘、宁暖温带林区,过去几千年的人类活动已经使土地利用方式发生了很大变化,近 20 年

又开展了大规模人工造林工程,目前正在实施退耕还林还草和天然林保护.无疑这些活动都将对这个地区的生态系统土壤碳产生极大的影响,但对这些影响还不清楚.本文以这个地区土地利用变化剧烈的宁夏六盘山林区为研究地点,选择典型的灌木林、次生乔灌木林和由这些类型转变的农田、牧草地,及由农田或牧草地转变的人工林为研究对象,通过测定分析这些土地利用方式在晴天条件下土壤呼吸强度及相应的土壤温度和湿度的昼夜与生长季月份变化的差异,初步研究这个地区土地利用变化对土壤呼吸的影响,希望为深入研究土地利用变化对碳循环的影响提供一些科学依据.

1 研究地区概况

研究地点位于宁夏固原县的赵千户林场,地处六盘山森林自然保护区与农牧业活动频繁的交错地带(东经 $106^\circ 09' \sim 106^\circ 30'$ 、北纬 $35^\circ 15' \sim 35^\circ 41'$).气候类型属于暖温带半湿润区向半干旱区的过渡带.地形以石质山地为主,海拔 $1800 \sim 2100 \text{ m}$.土壤以灰褐土为主.地带性植被为草甸草原和落叶阔叶林,植被区系具有明显的过渡特征.年平均气温为 5.8°C 、年降水量为 $400 \sim 676 \text{ mm}$.本区天然植被的破坏始于春秋战国时期,经几千年的人类活动,目前已经形成了落叶阔叶次生林、杂灌木、人工林、农田和牧草地等多种土地利用方式镶嵌的格局^[30],现今又被确定为退耕还林和天然林保护的典型示范区.

2 研究方法

2.1 样地选择

为减少样地间地形及小气候的差异,在平缓的中上坡地段,选择邻近、坡向和土壤类型均相同的 13 a、18 a 和 25 a 华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* mayr) 人工林各 8 块,每块 200 m^2 ;辽东栎 (*Quercus liaotungensis* koiz) 与山杨 (*Populus davidiana* dode) 为主的天然次生林各 2 块,每块 400 m^2 ;虎榛子 (*Ostrya davidiana* decne) 与荀子 (*Cotonedster acutifolius* turcz) 为主的杂灌木 8 块,每块 100 m^2 ;牧草地和农田各 8 块,每块 100 m^2 .这些天然林是原始林

反复破坏经保护后的次生林,而牧草地和农田是天然林破坏形成的,人工林又是在农田或草地中营造形成的。

2.2 土壤呼吸测定

在生长季(5~10月)用碱液吸收法测定土壤呼吸速率,每月测定1~2次,每次测定5h。在2001年5月的晴天,对各个样地进行昼夜观测,每2h观测1次。在选择样地中选定代表性的地点,把体积为30L的密闭箱放置在测点上(放入土层中约5cm),把外圈土用脚踏实;关闭通气管夹子,记录关闭的时刻,经0.5h后,用压力抽气瓶从测定箱中抽4L气体,测定其中的CO₂气体浓度。在等待密闭箱放置的0.5h内,先测定近地面层4L空气中CO₂气体的浓度(空白试验)。测定CO₂浓度时,先在吸收CO₂气体的塑料瓶(100mL)中注入20mL 0.05 mol/L的Ba(OH)₂溶液,然后将它连接到测CO₂的装置上,从密闭箱中抽出的CO₂气体通过小塑料瓶中Ba(OH)₂溶液时被吸收,当压力抽气瓶的体积标线显示为4L时,停止抽气,测定CO₂的量。操作方法参见文献[31]。

2.3 温度和湿度测定

在测定呼吸的过程中,用气温表测定气温,用曲管地温计测不同土层(5、10、15、20cm)的土壤温度,每1h测定一次,观测土壤温度在07:00点和13:00点进行。深层(40cm土层)土壤温度的观测,用直管地温计在上午10:00点观测。用土钻法取不同土层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50和50~60cm)的土样,用烘干法测定土壤湿度。

3 研究结果

3.1 土壤呼吸速率的日变化

陆地生态系统的动态过程主要受太阳辐射影响,与土壤温度和生物活动密切相关的土壤呼吸过程也不例外。太阳辐射的昼夜变化引起气温的昼夜变化,相应引起土壤温度、根系和土壤生物(尤其微生物)活动强度的变化,进而引起土壤呼吸速率的昼夜变化。不同土地利用方

式下,由于植被、经营方式及土壤性质等的差异,温度与土壤呼吸速率的昼夜变化格局不同[图1左(温度)、右(土壤呼吸速率)]。

图1显示,灌木林土壤呼吸速率的昼夜变化趋势与气温及土壤温度的变化趋势基本一致。即随着温度升高,土壤呼吸速率升高,温度最高值在13:00~15:00,最低值在凌晨04:00~08:00之间,土壤呼吸速率的最高和最低值也分别在这个时间范围。当然,气温和不同土层的温度变化幅度不同,其中气温变化幅度最大,土壤温度的变化幅度随土层加深而减弱。其它土地利用方式(包括山杨林、辽东栎林、牧草地、农田、13a、18a和25a落叶松人工林)土壤呼吸速率和温度也表现出同样的变化趋势。

不同土地利用方式下,土壤呼吸速率的最高值、最低值和变化幅度不同(表1)。表1显示,草地土壤呼吸速率的最高值[0.079~0.083 g·(m²·h)⁻¹]比几类天然次生林[灌木林、山杨和辽东栎林分别为0.041~0.045、0.065~0.074和0.069~0.075 g·(m²·h)⁻¹]土壤呼吸速率最高值高,草地土壤呼吸速率最低值[0.010~0.016 g·(m²·h)⁻¹]比几类天然次生林土壤呼吸速率最低值[灌木林、山杨和辽东栎林分别为0.020~0.023、0.033~0.041和0.050~0.055 g·(m²·h)⁻¹]低。农田土壤呼吸速率最高值[0.072~0.081 g·(m²·h)⁻¹]比天然次生林高,最低值[0.021~0.029 g·(m²·h)⁻¹]比天然次生林低,变化幅度比天然次生林高。总体上,天然次生林土壤呼吸速率的昼夜变化幅度较小,而农田和草地中较大(表1)。究其原因,可能因为天然次生林的冠层对土壤温度的影响比草地或农田植物地上部分对土壤温度的影响大。另外,也可能不同土地利用方式土壤有机碳含量和植被根系活动强度不同所致。当然,测定时间也可能造成一定差异。表1也显示,草地和农田土壤呼吸速率最高值比13a落叶松[0.089~0.093 g·(m²·h)⁻¹]和25a落叶松人工林[0.120~0.121 g·(m²·h)⁻¹]低,与18a落叶松人工林

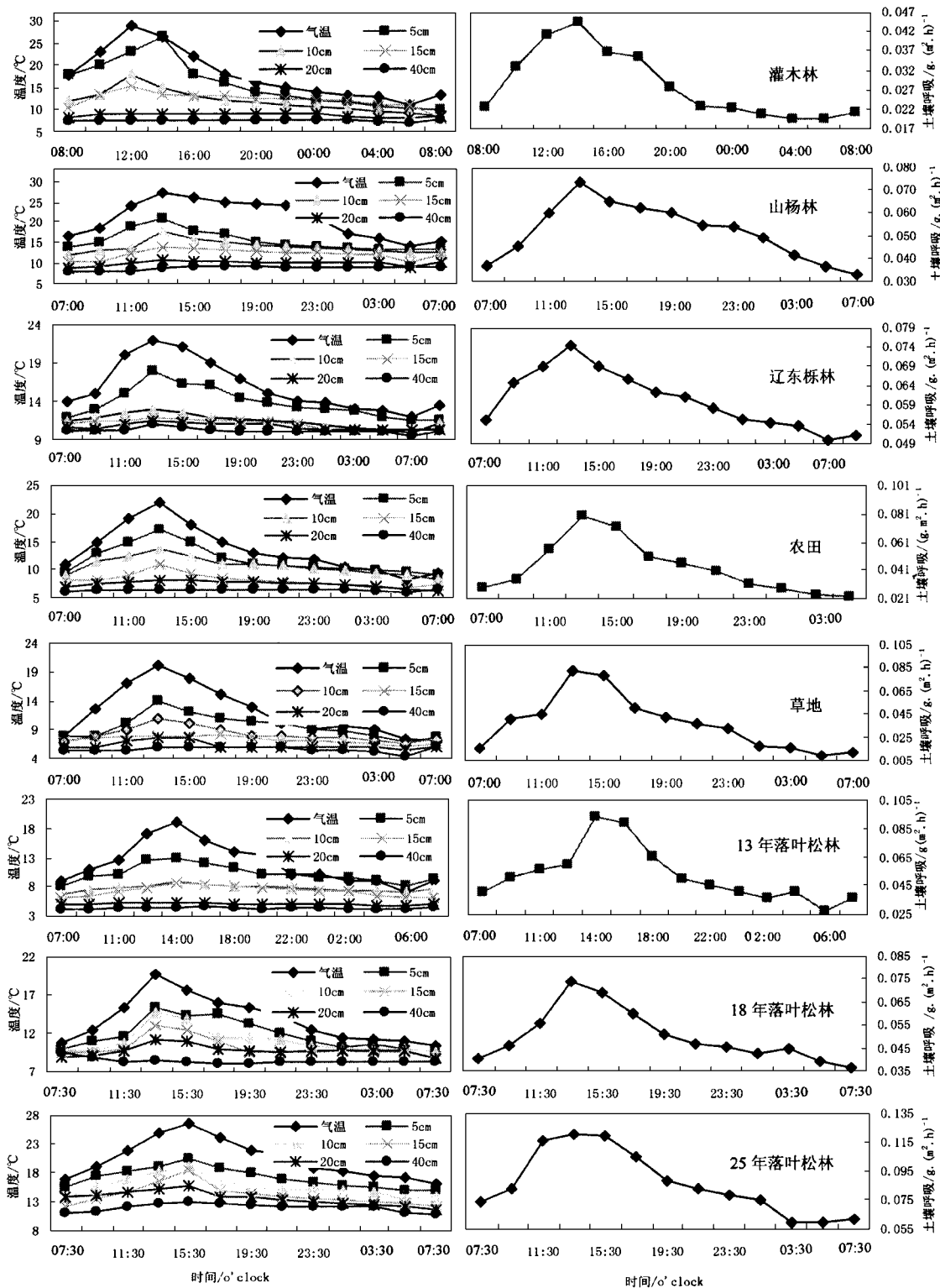


图 1 不同土地利用方式土壤温度(左图)与土壤呼吸(右图)的昼夜变化

Fig.1 The diurnal variation of soil temperature (left) and soil respiration rate(right) under different land uses

(0.069 ~ 0.074) 接近,最低值比人工林[13a、18a 和 25a 落叶松分别为 0.027 ~ 0.041、0.037 ~ 0.043 和 0.059 ~ 0.074g•(m²•h)⁻¹]中低,变化幅度均比人工林中大.总体上,人工林土壤呼吸速率的昼夜变化幅度比草地和农田中小,最低值比农田和草地高,13a 和 25a 落叶松最高值比草地和农田高,18a 落叶松与农田和草地接近.这可能因为农田土壤有机碳含量低,受到的扰动大.

3.2 土壤呼吸速率月变化

表 1 不同土地利用方式下土壤呼吸速率昼夜变化幅度¹⁾/g•(m²•h)⁻¹

土地利用	最高		最低		幅度
	均值	范围	均值	范围	
灌木林 Brushwood	0.043a	0.041 ~ 0.045	0.021a	0.020 ~ 0.023	0.025a
山杨林 Natural secondary forest dominated by <i>populus davidiana</i> <i>dode</i>	0.070b	0.065 ~ 0.074	0.037b	0.033 ~ 0.041	0.041b
辽东栎 Natural secondary forest dominated by <i>quercus liaotungensis</i> <i>koiz</i>	0.072b	0.069 ~ 0.075	0.053c	0.050 ~ 0.055	0.025a
农田 Cropland	0.077b	0.072 ~ 0.081	0.025a	0.021 ~ 0.029	0.060c
草地 Rangeland	0.081b	0.079 ~ 0.083	0.013d	0.010 ~ 0.016	0.073d
13a 落叶松 13-yr-old plantation of <i>larix principis-rupprechtii</i> <i>mayr</i>	0.091c	0.089 ~ 0.093	0.036b	0.037 ~ 0.041	0.056d
18a 落叶松 18-yr-old plantation of <i>larix principis-rupprechtii</i> <i>mayr</i>	0.071b	0.069 ~ 0.074	0.040b	0.037 ~ 0.043	0.037b
25a 落叶松 25-yr-old plantation of <i>larix principis-rupprechtii</i> <i>mayr</i>	0.120d	0.120 ~ 0.121	0.070e	0.065 ~ 0.074	0.056d

1) 表中列出相同小写字母表示不同土地利用方式下土壤呼吸速率差异不显著(*p* = 0.05). 样本数为样地数.

从 5 月到 10 月,随着太阳辐射强度的变化,气温呈现升高又降低的变化趋势.与此相关,土壤温度也呈现类似的变化.图 2 显示,从 5 月到 10 月,灌木林土壤温度逐渐升高,到 9 月达最大值,而 10 月又下降.这些变化趋势与气温的变化趋势相一致,但气温的变化幅度较大,土壤温度的变化幅度随土层加深而减弱.土壤湿度主要受降水量、植物对水分的吸收和蒸腾作用强度及土壤蒸发量的影响.在不同月份,由于降水量、植物对水分的吸收量、植物蒸腾作用强度和土壤蒸发量的差异,使不同土层土壤湿度也表现出明显的变化趋势.图 2 显示,在 5 ~ 6 月,土壤湿度较高;在 6 ~ 8 月,土壤湿度较低;在 9 ~ 10 月,土壤湿度又升高.不同土层,土壤湿度的变化趋势基本一致,但表层(0 ~ 30cm)变化总体上稍大.这主要与降水量、植物的水分代谢活动和蒸发量有关,植物水分代谢活动和蒸发量又与温度有关.在 5 ~ 6 月份,降水相对丰富,土壤蒸发量和植物蒸腾作用强度较小(土壤温度相对较高);7 ~ 8 月,降水量低而植物蒸腾

作用强度和土壤蒸发量较高(土壤温度较高),土壤湿度极低;9 ~ 10 月,降水量增加,土壤温度降低,土壤湿度增加.

土壤呼吸过程与土壤温度和土壤湿度的变化相关性明显.图 2 显示,从 5 月到 8 月,土壤呼吸速率逐渐升高,在 9 ~ 10 月下降,总体上与土壤温度的变化趋势基本一致.图 2 也显示,在 5 ~ 6 月土壤温度与 9 ~ 10 月的土壤温度接近,但 9 ~ 10 月土壤呼吸速率却比 5 ~ 6 月明显高,同样 9 ~ 10 月的土壤湿度也比 5 ~ 6 月明显高.显然,这种变化趋势与土壤湿度的变化趋势一致,表明土壤呼吸速率的月变化格局由土壤温度和土壤湿度的变化共同决定.其它土地利用方式(山杨林、辽东栎林、牧草地、农田和人工林)土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸速率总体上也呈现类似的变化趋势.当然,由于植被和土壤性质等的差异及测定日期对土壤呼吸速率变化幅度的影响,不同土地利用方式土壤呼吸速率、土壤温度和土壤湿度变化趋势也存在一定的差异.

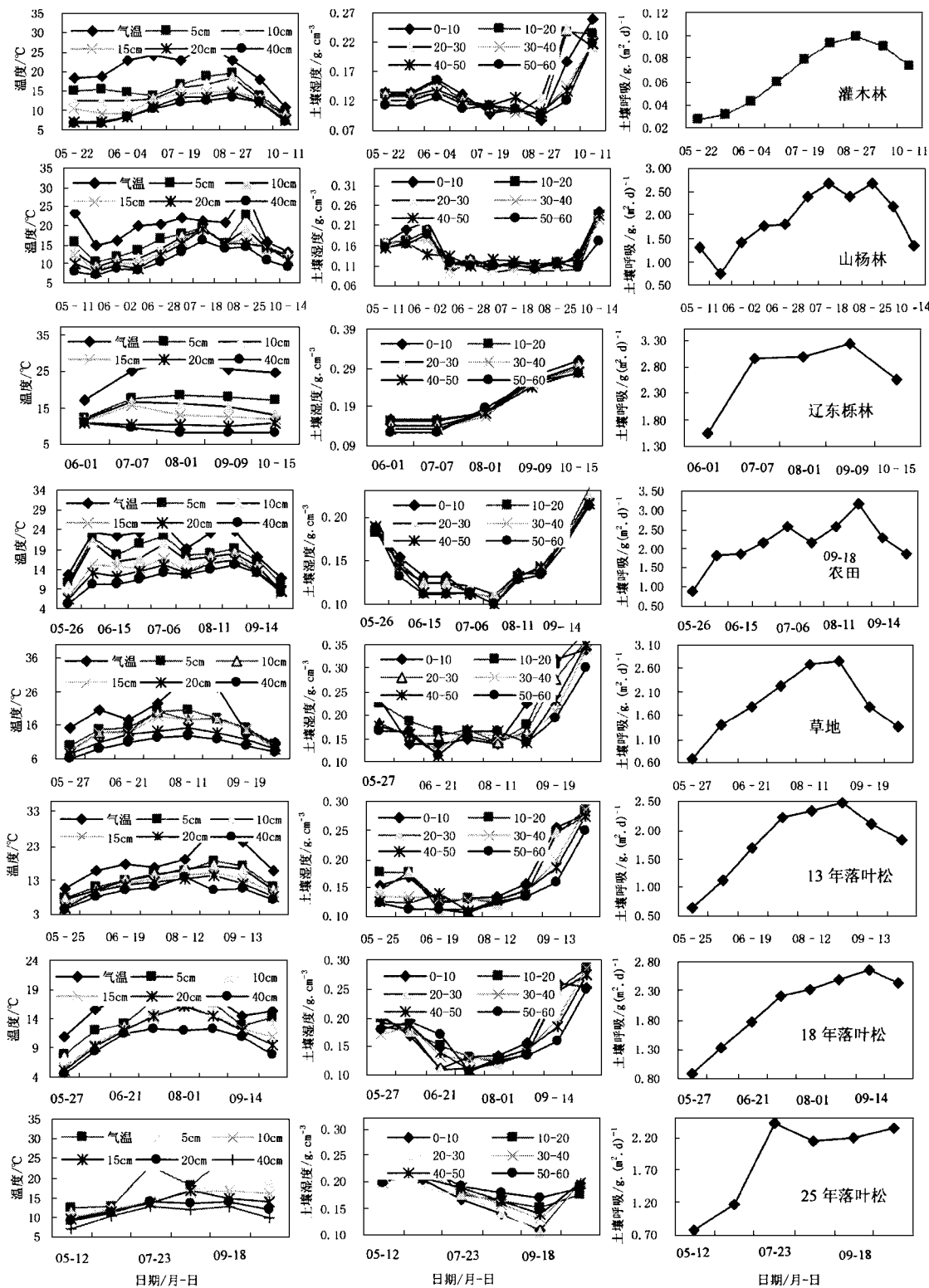


图 2 不同土地利用方式下土壤温度(左) 土壤湿度(中) 土壤呼吸(右)在不同月份的变化趋势

Fig.2 Change of soil temperature (left) , soil water content (middle) , soil respiration (right) under different land uses in different month

为进一步分析不同土地方式下土壤呼吸速率月变化的差异,对不同土地利用方式在 5 ~ 10 月土壤呼吸速率进行了差异性分析(见表 2)。表 2 显示,草地[$2.058\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]与农田[$1.952\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]土壤呼吸速率月变化的幅度较大,几类天然次生林[灌木林、山杨和辽东林分别是 1.526 、 1.595 和 $1.685\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]相对较小。这可能因为草地和农田植物对土壤温度和土壤湿度的影响比天然次生林树木对土壤温度和湿度的影响小,且草地和农田土壤有机碳含量较低且根系活动较弱。不同土地利用方式下土壤呼吸速率的最高和最低值也不同。表 2 也显示,草地[$0.660\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]和农田[$0.896\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]土壤呼吸速率最低值比天然次生林[灌木林、山杨和辽东林分别为 0.702 、 1.536 和 $1.020\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]低,最高值[牧草地和农田分别为 2.718 和 2.848

$\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]与天然次生林[灌木林、山杨和辽东林分别为 2.297 、 2.549 和 $3.220\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]接近。几类人工林土壤温度、湿度和土壤呼吸速率在 5 ~ 10 月的变化趋势也基本与天然次生林和草地类似。表 2 也显示,农田和草地土壤呼吸速率的月变化幅度比几类人工林[13a、18a 和 25a 落叶松人工林分别为 1.570 、 1.756 和 $1.780\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]大,农田和牧草地土壤呼吸速率最高值和最低值比人工林中最低值[13a、18a 和 25a 落叶松人工林分别为 0.654 、 0.770 和 $0.880\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]和最高值[13、18 和 25a 落叶松人工林分别为 2.410 、 2.415 和 $2.660\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$]低。总体上,草地和农田土壤呼吸速率月变化的幅度比天然次生林和人工林中大。在不同月份,不同土地利用方式间差异程度不同,在 7 ~ 10 月不同土地利用方式的差异程度比 5 ~ 6 月大(表 2)。

3.3 土壤年呼吸量

表 2 不同土地利用方式土壤呼吸速率月份变化的幅度¹⁾/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
Table 2 The seasonal variation range of soil respiration rate under different land uses/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

土地利用	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	变幅
灌木林	0.702aA	1.216aB	1.910aC	2.297aD	2.160aD	1.770aC	1.595a
山杨林	1.020bA	1.667bB	2.549bC	2.545bC	2.183aD	1.342bE	1.526a
辽东栎	NT	1.536bA	2.938cB	2.990cB	3.220bC	2.550cD	1.685a
农田	0.896cA	1.926cB	2.358bC	2.848cD	2.270bC	1.832aB	1.952b
草地	0.660dA	1.593bB	2.243bC	2.718cD	1.788cE	1.380bF	2.058b
13a 落叶松	0.654dA	1.399dB	2.206bC	2.410bD	2.114aC	1.812aE	1.756c
18a 落叶松	0.880cA	1.550bB	2.206bC	1.893dD	2.660dE	2.440cF	1.780c
25a 落叶松	0.770eA	1.166aB	2.415bC	2.152aD	2.190aD	2.340cC	1.570a

1) 表中行内相同小写字母表示同一土地利用方式在不同月土壤呼吸速率差异不显著,列中相同大写字母表示不同土地利用方式同一月土壤呼吸速率差异不显著($p=0.05$)。样本数为样地数。NT 表示没有测定。

由于受多种因素的影响,通过比较分析短期测定的土壤呼吸速率来确定不同土地利用方式碳排放速率的差异还不尽合理。一般以 1 年时间段的土壤呼吸排放 CO_2 量来比较不同土地利用方式碳排放的差异,直接测定土壤年呼吸量较困难,通常通过建立土壤温度和土壤呼吸速率间关系进行估计或用不同时间测定值均值进行推算。本文中,首先建立了土壤呼吸速度与 15 cm 土层深度的温度关系,又建立了 15 cm 土层温度与气温的关系。通过研究地区 42a 的月平均气温的资料,推算了 15 cm 土层月平均温

度和年平均温度,然后根据土壤呼吸速率与 15 cm 土层温度的关系,估计了土壤年呼吸 CO_2 通量(见表 3)。

表 3 显示,用 2 种方法估算农田中的土壤年呼吸量比天然次生林和人工林低。按月均温估算,牧草地土壤年呼吸 CO_2 排放量比灌木林和山杨林中高,而比辽东栎林低。根据年均温估算,牧草地土壤呼吸 CO_2 排放量比天然林高。以月均温进行估算,草地土壤年呼吸 CO_2 排放量比人工林高。以年均温估计,草地土壤年呼吸 CO_2 排放量比 13a 落叶松高,比 18a 和 25a 落叶

松低,以 2 种方法求均值,天然次生林土壤年呼吸 CO_2 排放量比农田高,而牧草地比天然林稍高;人工林比农田高,而与牧草地差异不大.这些结果表明,天然次生林变成农田后,土壤呼吸 CO_2 排放量减少,变成牧草地后,土壤呼吸 CO_2 排放量稍有增加;农田中造林后,土壤呼吸 CO_2 排放量增加,但是在草地中造林后,土壤呼吸 CO_2 年排放量变化不大.

表 3 不同土地利用方式中土壤年呼吸通量¹⁾/ $\text{t}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

Table 3 Annual soil respiration rate under different land use/ $\text{t}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$

土地利用	A	B	平均
杂灌木 Brushwood	4.10	3.82	3.96
山杨林 Natural secondary forest dominated by <i>populus davidiana</i>	3.67	4.46	4.06
辽东栎 Natural secondry forest dominated by <i>quercus liaotungensis</i>	5.43	3.58	4.51
农田 Cropland	1.83	1.99	1.91
草地 Rangeland	5.19	4.97	5.08
13a 落叶松 13-year old plantation of <i>larix principis-rupprechtii</i> mayr	4.27	4.36	4.31
18a 落叶松 18-year old plantation of <i>larix principis-rupprechtii</i> mayr	3.17	5.05	4.11
25a 落叶松 25-year old plantation of <i>larix principis-rupprechtii</i> mayr	5.17	5.94	5.55

1)表中 A 表示以月平均温度来估计全年碳排放量,B 表示以年平均温度推算全年碳素排放量.

4 讨论

许多研究表明,土壤呼吸速率具有明显的昼夜变化格局.如 Xu 和 Ye^[32]发现内华达山脉 8 年生的西黄松人工林土壤呼吸速率最小值在 09:00 点,最大值在 14:00 点;Kutsch 和 kappen^s^[33]发现农田土壤呼吸速率也是类似变化趋势,但土壤呼吸速率的最大值在 16:00 点以后;Davidson 等^[19]发现土壤呼吸速率的昼夜变化格局与土壤温度的昼夜变化格局类似.本研究结果与这些结果基本一致.土壤呼吸速率的昼夜变化格局主要与土壤温度的昼夜变化格局密切相关,土壤温度的昼夜变化又主要受空气温度的昼夜变化影响.不同土地利用方式中植被对土壤温度的影响及土壤热传导特性不同都将导致温度及土壤呼吸速率昼夜变化幅度的差异.森林高大的树冠降低了土壤温度对空气温度变化的敏感性,而草地和农田植物对土壤温度影响相对较小,所以农田和草地土壤温度的昼夜变化幅度较大,土壤呼吸速率的昼夜变化幅度也较大,森林土壤温度和土壤呼吸速率的变化都相对平缓.当然,不同土地利用方式土壤有机碳含量及有机质稳定性、质量和生物多样性的差异也影响土壤呼吸速率的昼夜变化格局.

许多研究也表明,土壤呼吸速率在生长季

不同月份也表现明显的变化格局.如 Fang 等^[34]发现佛罗里达州 26 年生的湿地松人工林土壤呼吸速率在 10 月最高,而在 1 月最低;Billings 等^[35]发现成熟的北方森林在 7 月前土壤呼吸速率较低,在 8 月最高;Xu 和 Ye^[32]发现土壤呼吸速率最高值在 6 月和 11~12 月,最低值在中夏;Davidson 等^[19]发现土壤呼吸速率在 6~7 月最高,在 8 月中旬到 9 月初下降.本研究显示,在 5~8 月,土壤呼吸速率逐渐增加,在 9~10 月下降.土壤呼吸速率季节性差异主要受土壤温度和土壤湿度变化的共同影响,但温度和湿度对土壤呼吸速率的影响程度不同.通常夏天的温度较高,土壤呼吸速率应该较高,但夏天的干旱可能会限制土壤呼吸而抵消温度升高对土壤呼吸的促进作用.除了温度和湿度效应外,土壤呼吸速率与根系的活动也有关系^[36].

土壤呼吸 CO_2 年排放量与土壤有机碳含量、土壤有机质稳定性和环境因素都密切相关.不同土地利用方式下,由于土壤有机碳含量、土壤有机质稳定性和环境因素影响等的差异,土壤呼吸 CO_2 年排放量将不同.Toland 和 Zak^[37]报道硬木林土壤呼吸测定结果,显示砍伐和未砍伐林地土壤年呼吸量分别为 4.78 和 4.70 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$;Raich 和 Schlesinger^[2]报道松栎林土

壤的年呼吸量为 $6.48 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$; Raich 和 Schlesinger^[2]报道温带针叶林土壤年呼吸量均值为 $6.95 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$;刘绍辉等^[38]测定北京白桦林、辽东栎林和油松林土壤年呼吸量分别为 3.09 、 3.90 、 $2.37 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$;Savage 和 Davidson^[15]报道哈佛山高地(Upland)森林土壤年呼吸量为 $6.40 \sim 8.60 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$.一些温带和北方森林年土壤呼吸量为 $7.30 \sim 9.30 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$ ^[39]和 $9.30 \sim 10.70 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$ ^[40] .本研究结果显示,天然次生林土壤年呼吸量平均为 $3.96 \sim 4.51 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$.农田为 $1.91 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$.草地为 $5.08 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$.人工林为 $4.11 \sim 5.55 \text{ t/ (hm}^2 \cdot \text{a)}$,总体比以上一些结果低,这些差异是多种原因造成的,如森林生产力、土地经营方式、气候和土壤类型和测定方法等.

土地利用变化对土壤呼吸的影响过程比较复杂. Raich 和 Tufekcioglu^[26]总结不同土地利用变化对土壤呼吸速率的影响,发现经常耕作农田的土壤呼吸速率平均比休闲农田高 20% ,但不显著;农田土壤呼吸量与附近森林没有显著差异、草地土壤呼吸速率比邻近农田高 25% ,但没有显著差异;而有些情况森林土壤年呼吸量比农田高,草地比农田高;在草地土壤呼吸速率比邻近森林高 20% 以上. Aslam 等^[24]发现土壤呼吸排放最高的是草地,减少耕作对生长季土壤呼吸速率影响较小.一般认为森林变成草地后将刺激土壤呼吸过程,针叶林比阔叶林低 10% ^[41] .但是, Raich 和 Potter^[42]发现针叶林和阔叶林间的土壤呼吸速率没有显著差别.本研究显示草地年呼吸量较高,农田较低,而针叶林并没有比阔叶林低.

总体上,土地利用变化对土壤呼吸的影响方面的研究还不够,已有的研究结果差异性还较大,还需要进行更加广泛深入的研究.

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 ~ 89 .
3 Musselman R C, Fox D G. A review of the role of temperate

forest in the global CO₂ balance. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 1991, **41**: 798 ~ 807 .
4 Marland G, Boden T A, Andres R J et al. Global regional and national CO₂ emissions. in: trends a compendium of data on global change. Carbon dioxide information analysis center, Oak Ridge national laboratory, US department of energy, Oak Ridge, Tennessee, 2000 .
5 Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 800 ~ 812 .
6 IPCC. Land Use, Land Use Change, and Forestry: a Special Report of the IPCC (Watson R T, Noble I R, Bolin B eds). Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 189 ~ 217 .
7 Houghton J T, Ding Y, Griggs D J (Eds) et al. Climate change 2001: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel On Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 185 ~ 237 .
8 Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, **34**: 1235 ~ 1241 .
9 Bochove E V, Jones H G, Bertrand N, Prévost. Winter fluxes of greenhouse gases from snow-covered agricultural soil: intra-annual and interannual variations. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14**(1): 113 ~ 125 .
10 Fang C J, Moncrieff B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 155 ~ 165 .
11 Broken W, Xu Y J, Davidson E A, Beese F. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce and scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 1205 ~ 1216 .
12 Ehman J L, Schmid H P, Grimmer C S B, Randolph J C, Hanson P J, Wayson C A, Cropley F D. An initial intercomparison of micrometeorological and ecological inventory estimates of carbon exchange in a mid-latitude deciduous forest. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 575 ~ 589 .
13 Rye A, Pegoraro E, Tedeschi V, Parri I, Jarvis P G, Valentini R. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 851 ~ 866 .
14 Yamamoto S, Murayama S, Saigusa N, Kondo H. Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and atmosphere in Japan. *Tellus*, 1999, **51B**: 402 ~ 413 .
15 Savage K E, Davidson E A. Interannual variation of soil respiration in two new England forests. *Global Biogeochemical*

- Cycles, 2001, **15**(2): 337 ~ 350.
- 16 Craine J M, Wedin D A. Determinants of growing season soil CO₂ flux in a Minnesota grassland. *Biogeochemistry*, 2002, **59**: 303 ~ 313.
 - 17 Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and inter-annual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 599 ~ 615.
 - 18 Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, **32**: 221 ~ 228.
 - 19 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. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 217 ~ 227.
 - 20 Liu X Z, W S Q, Su B, Hui D F, Luo Y Q. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, **240**: 213 ~ 223.
 - 21 Fang C J, Moncrieff B. A model for soil CO₂ production and transport I: model development. *Agricultural and forest Meteorology*, 1999, **95**: 225 ~ 236.
 - 22 Epron D, Dantec V L, Dufrene E, Granier A. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. *Tree Physiology*, 2001, **21**: 145 ~ 152.
 - 23 Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth *ponderosa* pine forests. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 1183 ~ 1194.
 - 24 Aslam T, Choudhary M A, Saggat S. Influence of land use management on CO₂ emissions from a silt loam soil in New Zealand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, **77**: 257 ~ 262.
 - 25 Thuille A, Buchmann N, Schulze E. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the southern Alps, Italy. *Tree Physiology*, 2000, **20**: 849 ~ 857.
 - 26 Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 71 ~ 90.
 - 27 曹广明, 张金霞, 赵新全, 李英年, 周兴民. 毛毡寒冻形土土壤 CO₂ 释放量估测方法初探. *土壤学报*, 2002, **39**: 261 ~ 266.
 - 28 张金霞, 曹广民, 周党卫, 赵新全, 周新民. 退化草地暗沃寒冻形土 CO₂ 释放的日变化和季节动态. *土壤学报*, 2001, **38**(1): 32 ~ 39.
 - 29 刘允芬, 欧阳华, 张宪洲, 钟华平, 罗天祥. 青藏高原农田生态系统碳平衡. *土壤学报*, 2002, **39**(5): 636 ~ 642.
 - 30 宁夏森林编辑委员会. *宁夏森林*. 北京: 中国林业出版社, 1990. 30 ~ 69.
 - 31 张万儒, 许本彤. *森林土壤定位研究方法*. 北京: 中国林业出版社, 1986. 66 ~ 80.
 - 32 Xu M, Ye Q. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young *ponderosa* pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 2001, **7**: 667 ~ 677.
 - 33 Kutsch W L, Kappen L. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of the temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different managements. *Biogeochemistry*, 1997, **39**: 207 ~ 224.
 - 34 Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, Clark K L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, 1998, **205**: 135 ~ 146.
 - 35 Billings S A, Richter D D, Yarie J. Soil carbon dioxide fluxes and profile concentrations in two boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1998, **28**: 1773 ~ 1783.
 - 36 Singh J S, Raghubansi A S, Reddy V S et al. Methane flux from irrigated paddy and dryland rice fields and from seasonally dry tropical forest and savanna soils of India. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, **30**(2): 135 ~ 139.
 - 37 Toland D E, Zak D R. Seasonal patterns of soil respiration in intact and clear-cut northern hardwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 1994, **24**: 1711 ~ 1716.
 - 38 刘绍辉, 方精云, 清田 信. 北京山地温带森林的土壤呼吸. *植物生态学报*, 1998, **22**(2): 119 ~ 126.
 - 39 Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A et al. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. *Tree Physiology*, 1993, **13**: 1 ~ 15.
 - 40 Andrews J A, Schlesinger W H. Soil CO₂ dynamics, acidification and chemical weathering in a temperate forest with experiments CO₂ enrichment. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**: 149 ~ 162.
 - 41 Hudgens E, Yavitt J B. Land use effects on soil methane and carbon dioxide fluxes in forests near Ithaca, New York. *Ecoscience*, 1997, **4**: 214 ~ 222.
 - 42 Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emission from soil. *Global Biogeochemical Cycle*, 1995, **9**: 23 ~ 36.