

格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应

杨玉盛^{1,2}, 陈光水^{1,2}, 董 彬², 王小国², 谢锦升², 李 灵², 卢豪良²

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建农林大学林学院, 南平 353001)

摘要:通过室外定位观测前期连续干旱情况下天然降雨及室内模拟不同温度(10 C、19 C和 28 C)下测定格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土壤增湿后呼吸动态,探讨不同林型土壤呼吸对土壤干湿交替的响应。结果发现室外定位观测和室内模拟试验均出现了增湿后土壤呼吸骤升至最大值及随后逐渐衰减的现象,且这种变化可由时间过程模型($R = ate^{-bt} + c$)较好地进行拟合。温度升高提升了土壤呼吸对干湿交替的响应值 RV 。格氏栲天然林土壤呼吸对干湿交替的响应对温度最为敏感,随温度升高其响应指数 RE 增加;杉木林土壤呼吸对干湿交替的响应指数 RE 最高,且对土壤水分变化最敏感,但随温度升高超过一定限度后其响应指数 RE 反而降低。

关键词:土壤呼吸; 干湿交替; 土壤温度; 天然林; 人工林

Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China

YANG Yu-Sheng^{1,2}, CHEN Guang-Shui^{1,2}, DONG Bin², WANG Xiao-Guo², XIE Jin-Sheng², LI Ling², LU Hao-Liang² (1. College of Geography Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953~958.

Abstract: The "inspiration" of soil respiration due to soil rewetting might not be ignorable and should be included in calculating of the annual soil CO₂ efflux. The effect of soil rewetting on soil respiration was determined in field of a natural forest of *Castanopsis kawakamii* (NF), a *C. kawakamii* plantation forest (CK), and a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) (CF) plantation forest in Sanming Nature Reserve, Fujian, China, and in laboratory at different temperature of 10 C, 19 C and 28 C with soil rewetting. The research, not only in the field, but also in the laboratory, found an increase of soil respiration and an subsequent decline after reaching a maximum following soil rewetting. This process can be simulated by a time model: $R = ate^{-bt} + c$. Higher temperature can increase the response value (E). The response of soil respiration in NF to soil rewetting showed the highest sensitive to temperature, the higher response efficiency with higher temperature. Soil respiration in CF had the highest response efficiency and the highest sensitive to soil water content, but temperature have an negative effect on its response efficiency. It was concluded that the inspiration effect of soil respiration following soil rewetting could contribute to a ignorable part of total soil CO₂ efflux on the annual basis, given the fact that there are high frequency of rain events in the local area.

Key words: soil respiration; soil rewetting; soil temperature; natural forest; monoculture plantations

文章编号: 1000-0933(2004)05-0953-06 中图分类号: Q945.1, Q948, S714.31 文献标识码: A

土壤是陆地生态系统最大的 C 库(约含 1600 Pg C),约是大气中 C(750 Pg)的 2 倍和活植物体 C 库的 3 倍^[1]。土壤呼吸(释放量约 68~75 Pg C/a)的微小变化就可引起大气中 CO₂ 浓度的明显改变,对全球碳循环和碳预算产生很大影响^[2]。

基金项目:教育部高校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目;福建省基础研究重大资助项目(2000-F-004)

收稿日期: 2003-09-22; **修订日期:** 2004-02-15

作者简介: 杨玉盛(1964~),男,福建仙游人,教授,博士,主要从事亚热带常绿阔叶林 C、N 循环研究。E-mail: Geoyys@fjnu.edu.cn

Foundation item: Teaching and Research Award Program for MOE P. R. C. (TRAPOYT), and Basic Research Program of Fujian Province(No. 2000-F-004)

Received date: 2003-09-22; **Accepted date:** 2004-02-15

Biography: YANG Yu-Sheng, Ph. D., Professor, mainly engaged in C and N cycling in subtropical broad-leaved evergreen forests.

近 20a 来,随着对温室效应日趋关注,人们对土壤呼吸及其主要影响因素(土壤温度和土壤湿度)进行了大量研究^[3~16]。目前土壤温度与土壤呼吸关系研究较多且较为深入^[3~8],而土壤湿度对土壤呼吸的调节机制研究则相对较少^[9~14]。由降雨分布不均引发的土壤干湿交替现象是一个重要的生态学过程,但有关土壤呼吸对干湿交替响应的研究极少,目前仅见在地中海半干旱森林^[15]、加拿大渥太华的农田^[16]和美国中南部高草草原等的研究^[17]。这些有限研究初步显示,干旱的土壤增湿会导致土壤呼吸的迅速且大幅度增加,是构成土壤年呼吸 CO₂ 释放量的一个重要组成部分^[15~17]。但由于目前野外土壤呼吸定位观测时间偏短(每月 1~3 次,每次 2~3d),国际上除了以上几例报道外,其它有关土壤呼吸对干湿交替响应的研究较少,从而导致干湿交替现象在年土壤呼吸估算模型中被忽略的现象。本文通过野外定位观察和室内模拟探讨格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)天然林、格氏栲人工林和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林土壤呼吸对干湿交替的响应,为正确估算土壤呼吸 CO₂ 年释放量提供基础数据。

1 试验地概况

试验地位于福建省三明市莘口镇,试验地自然概况及格氏栲天然林(NF)、格氏栲人工林(CK)和杉木人工林(CF)林分特征、土壤性质请参见文献^[19~22]。

2 研究方法

2.1 野外定位观测

自 2002 年 1 月起,用碱吸收法^[15]于每月下旬对格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林土壤呼吸连续测定 7~8d(每个林分 5 个重复),每 24h 测定 1 次。同一林分各观测点荫蔽条件一致,密闭室外表均涂白漆。观测期间数次观测到降雨对土壤呼吸的激发现象。针对 2002 年 9 月 30 日至 10 月 15 日未发生降雨,地表 5cm 处土壤温度较高(22.0~24.2℃),土壤含水量下降到一年中的较低水平状况(格氏栲天然林、人工林及杉木林分别为 26.62%、14.11%和 21.54%),从 10 月 16 日开始每 24h 观测 1 次土壤呼吸,连续观测 16d(至 10 月 31 日止),其中从 10 月 20 日 1:12~10:11 出现 1 场降雨量为 27.9mm 的降雨过程,21 日又出现 13.6mm 降雨,此后连续 12d 未再降雨。

2.2 室内模拟试验

为验证室外定位观测结果,在室内模拟不同温度(10℃、19℃和 28℃)下无根土壤呼吸对干湿交替的响应。土样从各林地土壤呼吸观测地点附近采集,取样深度为 0~20cm,取样点 10~15 个,多点土样混合后,去除根系和杂物,过 2mm 筛备用。在每个 1000 ml 的广口玻璃瓶中装入相当于 25g 烘干土重的风干土,内吊一个盛 10ml 0.1mol/L 的 NaOH 溶液的 50 ml 小烧杯(用于吸收土壤呼吸释放的 CO₂),用凡士林密封瓶口后,分别放进 10℃、19℃和 28℃生化培养箱中。每个处理设 3 个重复,每 24h 测定 1 次,连续观测 3d 后将土壤湿度调至最大持水量的 90%,再连续测定 12d;同时将过 2mm 筛的土样湿度也调至最大持水量的 90%,待其完全风干后进行第 2 次和第 3 次模拟干湿交替处理和相关观测(同上)。

2.3 数据分析

室外和室内土壤呼吸对干湿交替的响应采用时间过程模型进行拟合^[17],即:

$$R_t = a \cdot t \cdot e^{-bt} + c \quad (1)$$

式中, R_t 为 t 时刻的土壤呼吸速率; a 、 b 、 c 为模型参数,可分别代表土壤呼吸速率的增加速率、衰减速率和初始值; t 为时间, $t=0$ 表示土壤增湿前的状态。

为更直观表示土壤呼吸对干湿交替的响应,引入了土壤呼吸最大值出现时间(t_{max})、响应值(RV)和响应指数(RE)等概念。

最大值出现时间 t_{max} 可综合反映参数 a 和 b , t_{max} 愈大,则土壤呼吸速率达最大值时间愈慢且衰减愈慢,可以证明:

$$t_{max} = 1/b \quad (2)$$

响应值 RV 表示干湿交替过程土壤呼吸增加的数量大小,可由下式计算:

$$RV = \int_0^{+\infty} (a \times t \times e^{-bt} + c - c) dt = a/b^2 \quad (3)$$

响应指数 RE 则表示土壤呼吸对干湿交替响应的能力大小,由下式计算:

$$RE = RV/c \quad (4)$$

分别采用 3 因素方差分析和双因素方差分析分析不同林型土壤、温度和干湿交替次数对土壤呼吸响应值、响应指数、最大值出现时间的影响及不同林型土壤与温度间的交互作用,差异显著性分析采用 t 检验。所有计算均在 SPSS 10.0 程序上进行。

3 结果

3.1 室外土壤呼吸对干湿交替响应

与土壤含水量的变化相似,降雨后第 1 天 3 种林型土壤呼吸骤升至最大值,尔后逐渐降低,第 7 天后基本稳定在某一水平(图 1)。干湿交替过程中土壤呼吸和水分的变化均可用时间过程模型较好地拟合(R^2 均达 0.87 以上)(图 1)。与 CK 和 CF 相

比, NF 土壤呼吸最大值出现时间最慢(1.3d), 响应值 RV 则均为 CK 和 CF 的 1.2 倍。而响应指数 RE 则以 CF 最高, NF 和 CK 的则相似(表 1)。

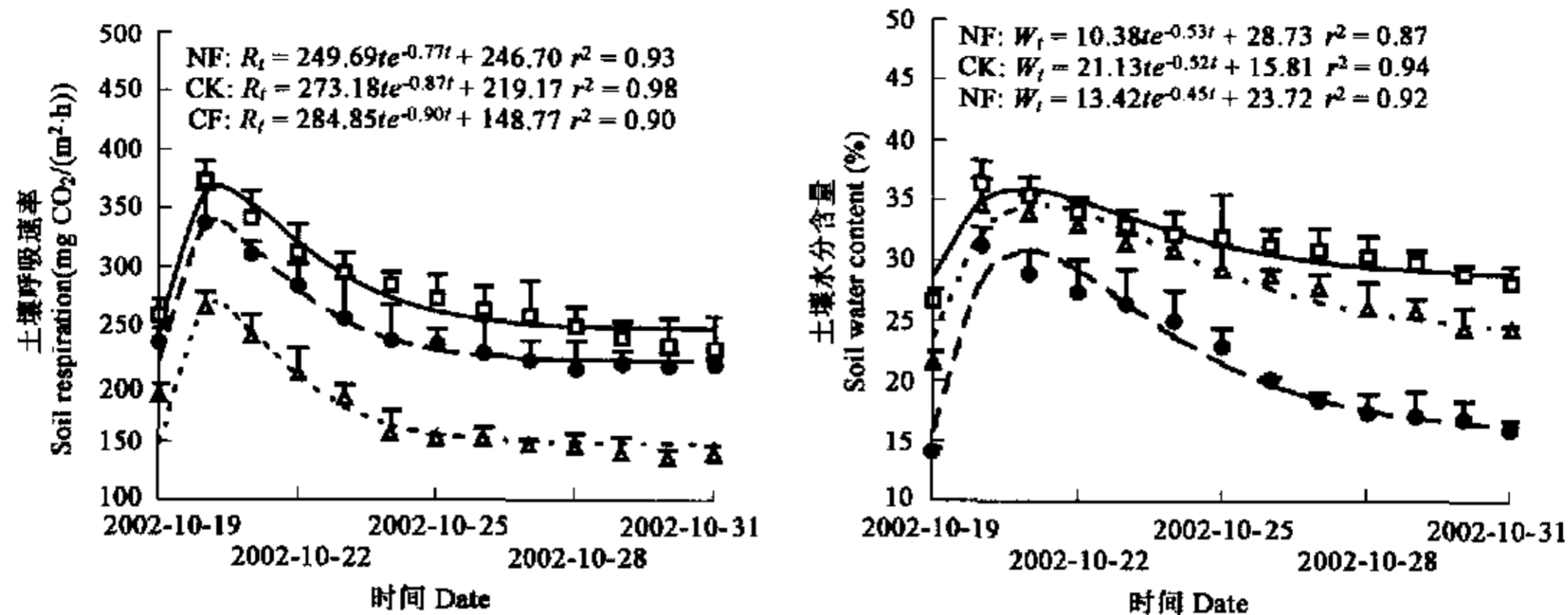


图 1 室外干湿交替过程中土壤呼吸和水分含量动态 (□ NF ● CK △ CF)

Fig. 1 Daily changes of soil respiration and soil water content following soil rewetting

3.2 室内土壤呼吸对干湿交替的响应

在室内不同温度下不同林型土壤呼吸对干湿交替的响应与室外定位观测结果相似, 即增湿后土壤呼吸骤升到最大值后下降至某一稳定值, 且均可用时间过程模型较好地拟合 (R^2 均在 0.85 以上)(图 2)。

通过对响应值 RV 、响应指数 RE 、土壤呼吸最大值 Max 和最大值出现时间 t_{max} 分别作 3 因素方差分析发现(表 2), 土壤和温度对响应值 RV 、响应指数 RE 和土壤呼吸最大值 Max 均有显著影响, 而干湿交替次数则无显著影响; 而仅土壤对土

壤呼吸最大值出现时间 t_{max} 有显著影响, 温度和干湿交替次数则均无显著影响。通过对响应值 RV 、响应指数 RE 和土壤呼吸最大值 Max 分别进行双因素方差分析发现, 土壤与温度两个因素间存在显著的交互作用(表 3)。

表 1 室外干湿交替过程中土壤呼吸响应值 RV 及响应指数 RE

Table 1 The response value (RV) and response efficiency (RE) of soil respiration to soil rewetting in the field study

林型 Forest types	最大值 Max (mg CO ₂ /(m ² ·h))	最大值出现时间 Time for Max t_{max} (d)	响应值 RV (mg CO ₂ /(m ² ·h))	响应 指数 RE
NF	365.99	1.3	421.13	1.7
CK	334.68	1.1	360.92	1.6
CF	265.20	1.1	351.67	2.4

表 2 土壤呼吸对干湿交替响应的 3 因素方差分析

Table 2 Three-way ANOVA of the response of soil respiration to soil rewetting

指标 Index	误差来源 Error source	方差 Sum of square variance	自由度 df	均方差 Mean square variance	F	Sig.
响应值 RV	土壤 Forest soil	785104.590	2	392552.295	20.934	0.000
	温度 Temperature	3439661.617	2	1719830.808	91.713	0.000
	次数 Time	4432.376	2	2216.188	0.118	0.889
	余差 Residue	375046.137	20	18752.307		
响应指数 RE	土壤 Forest soil	647.547	2	323.773	38.443	0.000
	温度 Temperature	113.082	2	56.541	6.713	0.006
	次数 Time	21.136	2	10.568	1.255	0.307
	余差 Residue	168.442	20	8.422		
最大值出现时间 Time for max	土壤 Forest soil	4.096	2	2.048	40.065	0.000
	温度 Temperature	0.027	2	0.013	0.261	0.773
	次数 Time	0.002	2	0.001	0.022	0.979
	余差 Residue	1.022	20	0.051		
最大值 Max	土壤 Forest soil	71284.802	2	35642.401	27.553	0.000
	温度 Temperature	252664.854	2	126332.427	97.659	0.000
	次数 Time	2339.554	2	1169.777	0.904	0.421
	余差 Residue	25872.072	20	1293.604		

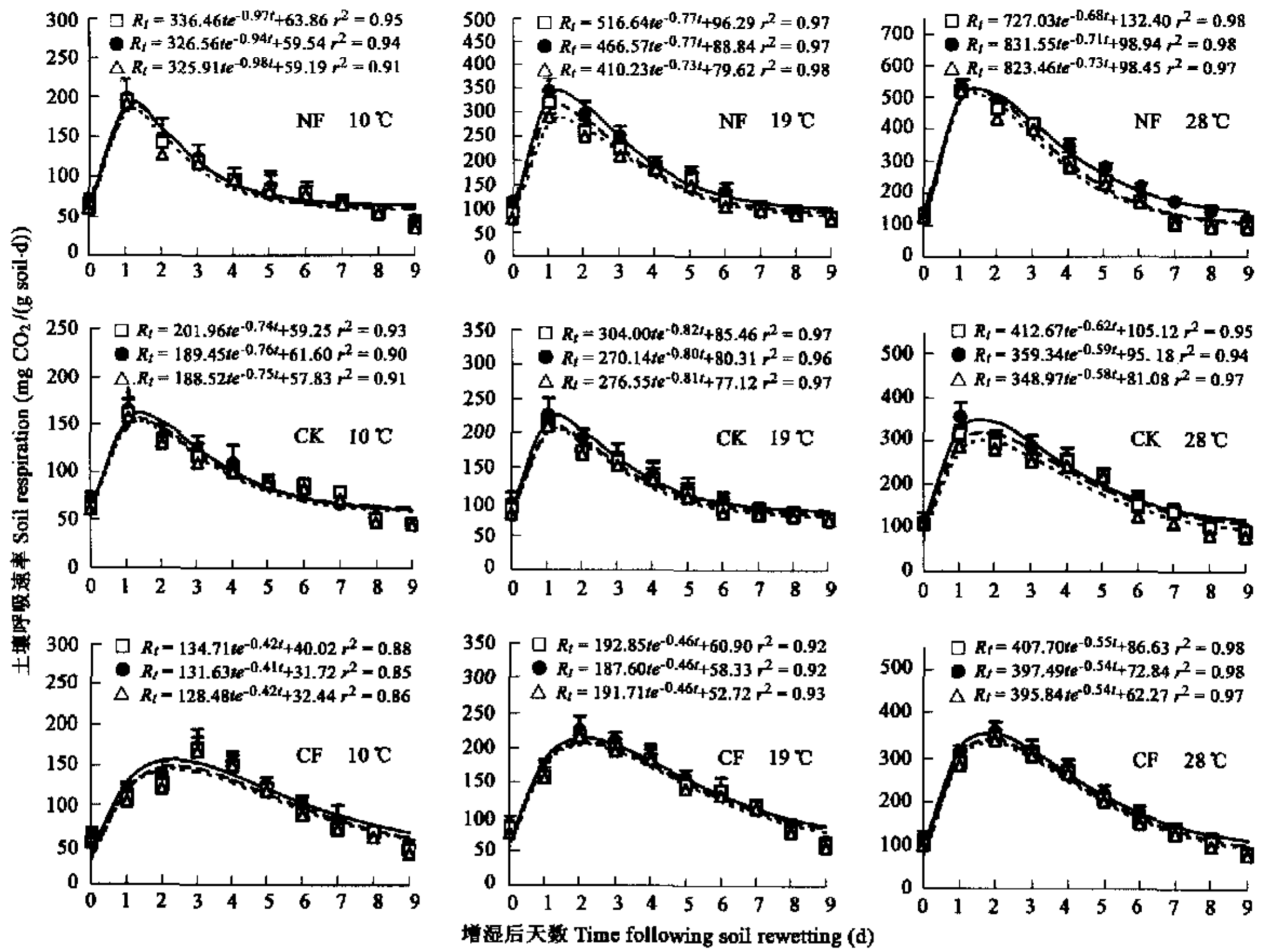


图 2 不同林地土壤在 3 种培养温度下 3 次增湿后呼吸 (mg CO₂(m² · h)) 动态

Fig. 2 Soil respiration following three consecutive soil rewetting under different temperature

□ 第 1 次干湿交替 The first rewetting ● 第 2 次干湿交替 The second rewetting △ 第 3 次干湿交替 The third rewetting

表 3 土壤呼吸对干湿交替响应的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA of the response of soil respiration to soil rewetting

指标 Index	误差来源 Error source	方差 Sum of square variance	自由度 df	均方差 Mean square variance	F	Sig.
响应值 RV	土壤 Forest soil	785104.590	2	392552.295	420.234	0.000
	温度 Temperature	3439661.617	2	1719830.808	1841.107	0.000
	土壤 × 温度 Forest soil × Temperature	362664.198	4	90666.049	97.059	0.000
	余差 Residue	16814.315	18	934.129		
响应指数 RE	土壤 Forest soil	647.547	2	323.773	104.718	0.000
	温度 Temperature	113.082	2	56.541	18.287	0.000
	土壤 × 温度 Forest soil × Temperature	133.924	4	33.481	10.829	0.000
	余差 Residue	55.653	18	3.092		
最大值 Max	土壤 Forest soil	71284.802	2	35642.401	170.933	0.000
	温度 Temperature	252664.854	2	126332.427	605.862	0.000
	土壤 × 温度 Forest soil × Temperature	24458.322	4	6114.580	29.324	0.000
	余差 Residue	3753.303	18	208.517		

不同温度下 NF 土壤呼吸最大值均显著高于 CK 和 CF 的, 而 CK 和 CF 间差异则不显著(表 4); 不同林型土壤呼吸最大值均随温度升高而显著增加, 但以 NF 的增加速率为最大, NF 的 Max₂₈/Max₁₀ = 2.8, 均高于 CK(2.1)和 CF(2.3)。

不同温度下不同林型土壤呼吸最大值出现时间 t_{max} 两两之间均差异显著, 且均以 CF 的最大; NF 和 CK 的 t_{max} 均有随温度上升而增大的趋势, 但 CF 则呈下降的趋势(表 4)。

表 4 室内土壤呼吸对干湿交替响应的响应值 RV 和响应指数 RE Table 4 Response value (RV) and response efficiency (RE) of soil respiration to soil rewetting

指标 Index	林型 Forest type.	10 C				19 C				28 C				28 C/ 10 C
		1	2	3	Mean	1	2	3	Mean	1	2	3	Mean	
Max mg CO ₂ /(g soil · d)	NF	191.5	187.3	181.5	186.8aA	343.1	311.8	286.4	313.7bA	525.7	529.8	513.4	523.0cA	2.8
	CK	159.7	153.3	150.3	154.4aB	221.8	204.5	202.7	209.7bB	350.0	319.2	302.4	323.9cB	2.1
	CF	158.0	149.8	145.0	150.9aB	215.1	208.4	206.0	209.8bB	359.3	343.6	331.9	345.0cB	2.3
t_{max} (d)	NF	1.0	1.1	1.0	1.0aA	1.3	1.3	1.4	1.3bA	1.5	1.4	1.4	1.4bA	1.4
	CK	1.4	1.3	1.3	1.3aB	1.2	1.3	1.2	1.2aB	1.6	1.7	1.7	1.7bB	1.3
	CF	2.4	2.4	2.4	2.4aC	2.2	2.2	2.2	2.2bC	1.8	1.9	1.9	1.9cC	0.8
RV mg CO ₂ /(g soil · d)	NF	357.6	369.6	339.4	355.5aA	871.4	786.9	769.8	809.4bA	1572.3	1649.6	1545.2	1589.0cA	4.5
	CK	368.8	328.0	335.2	344.0aA	452.1	422.1	421.5	431.9bB	1073.5	1032.3	1037.4	1047.7cB	3.0
	CF	763.7	783.1	728.3	758.4aB	911.4	886.6	906.0	901.3bC	1347.8	1363.1	1357.5	1356.1cC	1.8
RE	NF	5.6	6.2	5.7	5.8aA	9.0	8.9	9.7	9.2bA	13.9	15.7	14.7	14.8cA	2.6
	CK	6.2	5.3	5.8	5.8aA	5.3	5.3	5.5	5.4aB	10.2	10.8	12.8	11.3bB	1.9
	CF	20.1	23.7	22.5	22.1aB	15.0	15.2	17.2	15.8bC	17.6	18.7	19.8	18.7cC	0.8

* 数字具有不同小写字母(同一行)或大写字母(同一列)表示有显著差异($P < 0.05$),否则无显著差异 Different letter in a column or in a row indicated significant difference ($P < 0.05$) between forests or temperature, and otherwise no significant difference ($P > 0.05$)

除了 10 C 时 NF 和 CK 的响应值 RV 和响应指数 RE 均差异不显著外,不同林分不同温度下响应值 RV 和响应指数 RE 均两两间差异显著。不同林分响应值 RV 均随温度升高而显著增大,但以 NF 的升高速率最快,NF 的 RV_{28}/RV_{10} 值(4.5)最大,CK (3.0)次之,而以 CF(1.8)最慢;10 C 时,CF 的响应值 RV 最大,约是 NF 的 2 倍,19 C 时,NF 的响应值 RV 仅略低于 CF 的,但 28 C 时 NF 的响应值 RV 则超过了 CF。NF 和 CK 的响应指数 RE 均有随温度升高而增大的趋势,但 CF 的响应指数 RE 则呈下降趋势,NF 的 RE_{28}/RE_{10} 值(2.6)最大,CK 的(1.9)次之,而 CF(0.8)的最小;但不同温度下 CF 的响应指数 RE 均远高于 NF 和 CK 的。

4 讨论

不论是室外还是室内,不同林分的土壤呼吸对干湿交替的响应均有相似趋势,但在响应幅度上有所不同,这在室内模拟条件下更为明显(图 2)。室外条件下,以格氏栲天然林土壤呼吸的响应值 RV 最高,这与其土壤呼吸作用底物数量、质量,土壤微生物数量及特性,树种性质以及雨前土壤呼吸作用较高等有关^[19,20]。在室外条件下,以杉木林土壤呼吸响应指数 RE 最大,这与其土壤微生物区系对水分的敏感性可能高于阔叶林及杉木树种特性有关,这种情况在室内时(室内土壤含水量远高于室外)表现更为明显(表 4)。与格氏栲天然林和人工林相比,室内条件下杉木林土壤呼吸最大值出现时间 t_{max} 存在明显的滞后现象,而室外则不出现此现象(表 1,表 4),这有待进一步观测。

本研究通过室内模拟试验显示了随温度升高,土壤(无根)呼吸对干湿交替响应的响应值 RV 均升高(表 4、图 2),这可能与温度对微生物活性的影响有关,杨平等报道,在水分不受限制情况下,土壤微生物活性一般随温度升高而升高,在 27 C 左右达最高,而 40 C 以上则显著降低^[23]。本研究中在 10 C 的温度下仍观测到土壤呼吸对干湿交替的响应,这与 Casals 等报道的地中海半干旱森林只有在高温时干燥的土壤重新湿润才出现土壤呼吸急剧增大的现象有所差异^[15]。

格氏栲天然林的响应值 RV 和响应指数 RE 随温度升高其增加幅度最大(表 4、图 2),说明温度升高对刺激其土壤微生物活性最为有效;而杉木林的响应值 RV 增大幅度最小,且其响应指数 RE 反而有所下降。土壤呼吸最大值出现时间 t_{max} 与微生物激增效应的持续期长短有关。随温度升高,格氏栲天然林和人工林土壤呼吸 t_{max} 均有所延长(表 4、图 2),表明其土壤微生物的激增效应持续期长;而杉木林的则相反。

虽然随干湿交替次数增加,土壤中微生物代谢底物的减少会影响土壤呼吸对干湿交替的响应^[24],但在本研究中并未发现随干湿交替次数增加土壤呼吸显著降低趋势,这与本研究中干湿交替次数较少(仅 3 次)、培养时间尚短(仅 30d)、代谢底物的损耗少等有关。

3 种林分室外土壤呼吸的响应指数 RE 均低于与室外土温相近的室内气温为 19 C 的土壤呼吸,这与 Liu 等的研究相似^[17],这可能与室内试验中排除了根系的影响、土壤水分含量较高、土壤均为表层土和土壤干扰促进微生物活动等有关^[25]。

本研究所揭示亚热带森林土壤呼吸对干湿交替的响应与地中海半干旱森林^[15]、加拿大渥太华的农田^[16]和美国中南部高草原^[17]等的研究基本一致。这种增湿后土壤呼吸激增效应可能与“替代效应”(加水后水分挤出土壤孔隙中原先含 CO₂ 气体)、对微生物活动的刺激效应和微生物生物量的激增效应有关^[14,24]。

References:

- [1] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185~190.

- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 7~20.
- [3] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration; Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 71~90.
- [4] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old-growth ponderosa pine forests. *Global change boil.*, 2002, **8**(12): 1183~1193.
- [5] Raich J W and Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, **44B**: 81~99.
- [6] Risk D, Lisa K, Hugo B. Carbon dioxide in soil profiles; Production and temperature dependence. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(6): 1~4.
- [7] Certini G, Corti G, Agnelli A, et al. Carbon dioxide efflux and concentrations in two soils under temperate forests. *Biol. Fertil. Soils*, 2003, **37**: 39~46.
- [8] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, **32**: 1625~1635.
- [9] Davidson B A, Belk E and Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biol.*, 1998, **4**: 217~227.
- [10] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, et al. Special Issue. Controls on soil respiration; implications for climate change. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 53~69.
- [11] Mielnick P C and Dugas W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, **32**: 221~228.
- [12] Maier C A, Kress L W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**(3): 347~359.
- [13] O'Neill K P, Kasischke E S and Richter D D. Environmental controls on soil CO₂ flux following fire in black spruce, white spruce, and aspen stands of interior Alaska. *Can. J. For. Res.*, 2002, **32**(9): 1525~1541.
- [14] Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Effects and mechanisms of water on soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(5): 972~978.
- [15] Casals P, Romanya J, Cortina J, et al. CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 261~281.
- [16] Rochette P, Desjardins R L and Pattey E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Can. J. For. Sci.*, 1991, **71**: 189~196.
- [17] Liu X Z, Wan S Q, Su B, et al. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, **240**: 213~223.
- [18] Yang Y S, Dong B, Xie J S, et al. Soil respiration of forest ecosystems and its response to global change. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(3): 583~591.
- [19] Yang Y S, Liu Y L, Chen G S, et al. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in Subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, **24**(1): 1~8.
- [20] Yang Y S, He Z M, Zhou S Q. A study on the soil microbes and biochemistry of rhizospheric and total soil in natural forest and plantation of *Castanopsis kawakamii*. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, **18**(2): 198~202.
- [21] Yang Y S, Lin P, Guo J F, et al. Litter Production, Nutrient Return and Leaf-Litter Decomposition in Natural and Monoculture Plantation Forests of *Castanopsis kawakamii* in Subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(7): 1278~1289.
- [22] Yang Y S, Chen G S, Lin P, et al. Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(9): 1719~1730.
- [23] Yang P, Du B H. Oversea studies on soil CO₂ efflux. *Chinese Journal of Agricultural Weather*, 1996, **17**(1): 48~50.
- [24] Orchard V A and Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, **22**: 153~160.
- [25] Johnson D W, Walker R F and Ball J T. Lessons from lysimeters, soil N release from disturbance compromises controlled environment study. *Ecol. Appl.*, 1995, **5**: 395~400.

参考文献:

- [14] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 水分对土壤呼吸的影响及机理,生态学报,2003,23(5):972~978.
- [18] 杨玉盛,董彬,谢锦升,等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应,生态学报,2004,24(3):583~591.
- [19] 杨玉盛,刘艳丽,陈光水,等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机C含量及分配. 生态学报,2004,24(1):1~8.
- [20] 杨玉盛,何宗明,邹双全. 格氏栲天然林与人工林根际土壤微生物及其生化特性差异的研究. 生态学报,1998,18(2):198~202.
- [21] 杨玉盛,林鹏,郭剑芬,等. 格氏栲天然林与人工林凋落物数量、养分归还及凋落叶分解(英文). 生态学报,2003,23(7):1278~1289.
- [22] 杨玉盛,陈光水,林鹏,等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力. 生态学报,2003,23(9):1719~1730.
- [23] 杨平,杜宝华. 国外土壤二氧化碳释放问题的研究动态. 中国农业气象,1996,17(1):48~50.