

干燥和重新湿润过程引起土壤 CO₂ 激发释放的模拟研究

戴万宏^{1,2}, 王益权², 黄耀¹, 刘军²

(1. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:应用短期培养实验研究了干燥和重新湿润引起的土壤CO₂ 激发释放及其动力学过程。结果表明,不经干燥和重新湿润处理土壤 CO₂ 释放速率基本不随时间变化,其 CO₂ 释放过程可以用零级反应动力学方程($Y = k_0 t$)描述;干燥和重新湿润处理过程能够引起明显的土壤 CO₂ 激发释放,这是干燥和重新湿润引起的土壤呼吸激发效应(一级反应)和土壤基本呼吸(零级反应)相互叠加的结果,可以用两库叠加模型 $Y = at + A_0(1 - e^{-kt})$ 很好描述。本实验条件下扰动、干燥和重新湿润引起的垆土 CO₂ 净激发释放量为 23.05 ~ 59.90 mg CO₂ - C · kg⁻¹, 主要与不同培肥措施长期实施造成的土壤性质和肥力差异,特别是有机质数量和质量差异有密切关系。

关键词: 短期培养; 土壤干燥和重新湿润; CO₂ 激发释放; 动力学

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 2043(2004)02 - 0318 - 05

Flush of Carbon Dioxide Caused by Soil Drying and Rewetting

DAI Wan-hong^{1,2}, WANG Yi-quan², HUANG Yao¹, LIU Jun²

(1. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Resource and Environment, Northwest Sci - Tech. University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: Flush of CO₂ and its kinetic courses of drying and rewetting soils were studied in short - time incubation. The results showed that CO₂ emission rate in no dried and rewetted soils was not changed with time, and its emission courses could be described by zero - order kinetic equation($Y = k_0 t$). For the drying and rewetting soils, the CO₂ emission showed the typical initial CO₂ flush, which can be explained by the additive effects of soil respiration prime effect (first - order) caused by drying and rewetting and the basic soil respiration (zero - order). The flush of CO₂ following drying and rewetting soils could be well described by the two - pool model $Y = at + A_0(1 - e^{-kt})$. In shorter - time incubation, the net CO₂ flush in different Lou soils caused by disturbance, drying and rewetting varied from 23.05 mg CO₂ - C · kg⁻¹ to 59.90 mg CO₂ - C · kg⁻¹, and it was correlated tightly with the differences of soil property and fertility, especially the differences of soil organic matter quality and quantity, caused by long - term different fertilization methods.

Keywords: short - time incubation; soil drying and rewetting; flush of carbon dioxide; kinetics

随着大气中温室气体浓度升高和全球气候变化加剧成为公众和科学界关注和研究的热点之一, CO₂ 作为一种最重要的温室气体,其源、汇及通量的准确预测格外受到重视。土壤是地球上仅次于海洋的第二

大有机碳库(约 1.394×10^{18} gC^[1]),是大气 CO₂ 的重要源/汇。据估计,土壤—大气间 CO₂ 通量约为 $68 \pm 4 \times 10^{15}$ g C · a⁻¹[2],如此巨大的交换通量使得其间轻微的变化也会引起大气中 CO₂ 浓度的明显改变。

土壤呼吸释放 CO₂ 过程作为土壤有机碳库周转与平衡的重要过程和唯一的 CO₂ 输出途径,在陆地生态系统碳循环过程中起着重要作用^[3],同时也是土壤生物活性、土壤肥力以及通气性的指标^[4,5]。土壤呼吸是微生物参与下土壤有机质分解的复杂生物化学过

收稿日期: 2003 - 06 - 25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目——中国陆地和近海生态系统碳收支研究(KZCX1 - SW - 01)

作者简介: 戴万宏(1965—),男,博士,副研究员,主要从事土壤肥力和农田土壤温室气体排放的研究。

E - mail: dwh@dq.cern.ac.cn

程,它的准确预测可部分归因于人们对土壤微生物在变化着的土壤管理措施和环境条件下生理反应的准确了解^[6]。干—湿交替是田间土壤频繁经历的自然过程,研究表明干—湿交替,特别是干土的快速重新湿润过程常常会引起土壤微生物数量、活性和土壤中易氧化活性有机碳数量的增加,导致土壤有机质矿化和微生物呼吸的“激发效应”,出现短时期的土壤 CO₂ 激发释放(flush of CO₂)^[7,8],增加土壤向大气排放 CO₂ 的数量。因此利用短期培养实验研究土壤干燥和重新湿润过程引起的土壤 CO₂ 激发释放及其动力学过程,将有助于人们深入认识和了解田间土壤 CO₂ 释放状况,对于准确估计土壤对大气温室气体 CO₂ 的贡献有重要作用。国外这方面已有一些研究报道^[9,10],但国内目前尚未见相关报道。

本文利用短期培养实验研究了土经过干燥和重新湿润后的 CO₂ 激发释放状况及其动力学过程,以期为准准确估计频繁经历干湿交替的干旱、半干旱地区土壤 CO₂ 释放提供依据。

1 材料与方法

供试土壤为黄土母质上发育形成的塬土(土垫旱耕人为土),土壤样品于 1999 年 10 月冬小麦播种前分别采自西北农林科技大学已连续 23 年的有机培肥长期定位试验不同处理小区的耕层(0~20 cm)。土样风干、拣去可见粗有机质后,过 2 mm 筛备用。供试土壤基本性状见表 1(均用常规方法测定)。有机培肥长期定位试验培肥方案和具体实施情况参见王旭东等(2000)的论文^[11]。

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 The basic properties of experimental soils

样号	培肥措施	有机质	容重	物理性粘粒 > 0.25 mm 团聚体	
		/g · kg ⁻¹	/g · cm ⁻³	/%	/%
1	无肥	13.11	1.33	46.94	79.95
2	化肥	14.78	1.36	47.31	82.26
3	休闲	13.96	1.32	47.28	83.86
4	低秸	16.58	1.28	46.89	84.53
5	中秸	18.68	1.15	46.78	85.61
6	高秸	19.66	1.16	45.84	87.75
7	厩肥	20.58	1.14	43.92	86.96

本研究采用短期培养方法^[9]进行。每种土壤分别称取过 2 mm 筛风干样品 200 g(以烘干重计)4 份,用微型喷雾器均匀喷入蒸馏水,使土壤湿润到含水量 21%,混均后按容重 1.3 g · cm⁻³ 装入 500 mL 广口瓶中,然后广口瓶置于恒温培养箱中,20 ℃ 条件下预培

14 d,以稳定土壤条件和 CO₂ 释放。预培结束后,将装土广口瓶均匀分为两组,每组分别拥有每种土样各 2 瓶。第一组土样进行扰动、干燥和重新湿润的处理:分别小心地取出瓶中土样,在 40 ℃ 左右快速干燥 48 h,使其达到风干状态,然后过 2 mm 筛,过筛后的土样重新均匀喷蒸馏水湿润至含水量 21%,混匀后按容重 1.3 g · cm⁻³ 装入原瓶中,瓶口用橡皮塞密封,放入恒温培养箱中。第二组不做处理,保持原状,在放入第一组广口瓶的同时用橡皮塞密封第二组广口瓶。然后将所有装土瓶在 20 ℃ 条件下进行 14 d 短期培养,培养过程中测定土壤呼吸释放 CO₂ 量。

土壤呼吸释放 CO₂ 量用碱液吸收滴定法测定^[5]。培养过程中,密封广口瓶的橡皮塞下悬挂一塑料杯,杯中加入 20 mL 0.1 mol · L⁻¹ NaOH 溶液以吸收土壤呼吸释放的 CO₂。塑料杯及杯中 NaOH 溶液在培养实验开始后的前 4 d 每天更换,第 4 d 后每两天更换一次。吸收了 CO₂ 的 NaOH 溶液用 0.1 mol · L⁻¹ HCl 溶液准确滴定,用滴定消耗 HCl 溶液量计算土壤 CO₂ 释放速率和释放量。

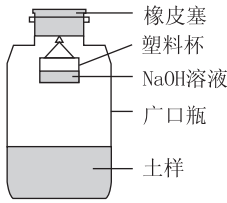


图 1 培养实验装置示意图

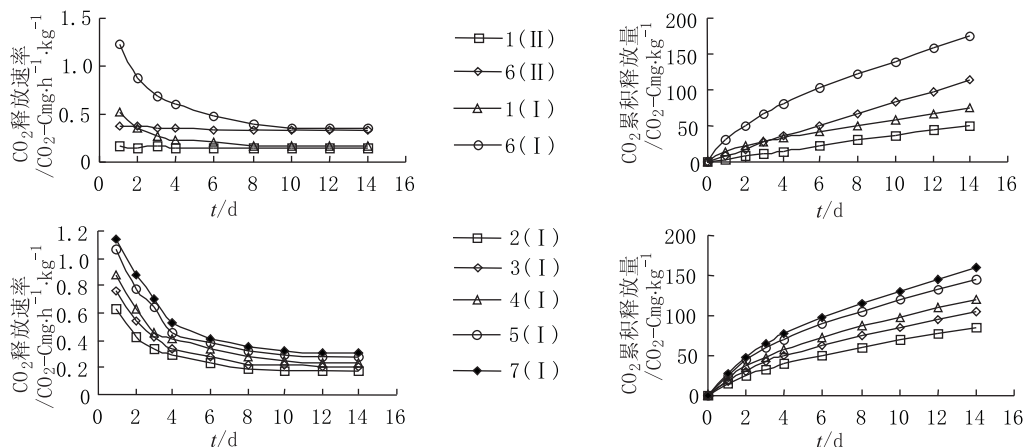
Figure 1 Schematic diagram of incubation apparatus

2 结果与讨论

2.1 土壤 CO₂ 释放及干燥和重新湿润的激发效应

短期培养条件下,7 种供试土样 CO₂ 释放随培养时间的变化模式在相同处理间是相同的,而在不同处理间截然不同(图 2)。不经过干燥和重新湿润处理土样的 CO₂ 释放速率基本保持不变,不随培养时间延长发生较大有规律的变化,土壤匀速释放 CO₂(图 2 中仅列出了 1、6 号样的结果),这是因为不经过干燥和重新湿润处理土样中可供微生物呼吸消耗的活性有机质数量有限,微生物活性和活性有机质数量的变化在短期培养时间内表现不明显,因此使得通过微生物呼吸释放 CO₂ 的速率也不会发生明显变化。

经过干燥和重新湿润处理的土样在短期培养过程中表现出典型的起始 CO₂ 激发释放现象(图 2)。培养开始第一天土壤 CO₂ 释放速率最高(可达不处理土



I 为扰动、干燥和重新湿润处理; II 为不处理

图 2 短期培养过程中土壤 CO₂ 释放速率和累积释放量

Figure 2 Rate of CO₂ emission and CO₂ cumulative emission of soils during short-time incubation

I denoted disturbing and drying-rewetting soils; II denoted no-treating soils

样 3 倍以上), 随着培养时间延长快速降低, 第 4 d 以后 CO₂ 释放速率降低速度明显变缓, 第 10 d 以后基本趋于稳定, 接近不处理土样 CO₂ 释放速率。这种由于干燥和重新湿润引起的短期土壤 CO₂ 激发释放现象是一种土壤有机碳矿化正的真激发效应 (positive real priming effects)^[8], 其产生原因主要是干燥过程使得大量土壤微生物死亡^[12], 而死亡微生物体是很容易被分解的活性有机质, 干土快速重新湿润过程也会使一部分仍存活的微生物不能重新适应新的生活环境被迫死亡而成为活性有机质, 同时存活微生物为了维持其水势与外界平衡也会被迫向其体外排放大量易分解有机化合物^[13], 这样就使得经过干燥和重新湿润的土壤中积累起了相当数量易被微生物呼吸消耗的活性有机质; 干土重新湿润后, 土壤微生物快速繁殖生长, 重新活跃起来的新微生物种群具有更强的生物活性^[14], 能够快速分解利用积累的大量活性有机质, 短时间内释放出大量 CO₂, 产生 CO₂ 激发释放现象。另外, 这种土壤 CO₂ 激发释放也可能有一部分是由于土壤干燥和重新湿润后土壤颗粒表面吸附的有机底物有效性增加和暴露在外的有机物表面增多而引起的^[15]。迄今为止, 以上几种原因的相对贡献大小还不十分清楚^[9]。

从图 2 可看出, 干燥和重新湿润过程引起的土壤 CO₂ 激发释放主要发生在培养开始后最初的几天里。干燥和重新湿润处理的土样在整个培养过程 (0 ~ 14 d) 开始后第 1 d 就释放出了 15.7% ~ 21.2%, 前 3 d 释放了 35.1% ~ 43.4% (表 2), 前 6 d 累积释放了

58.2% ~ 62.7%。将经过处理土样 CO₂ 释放量扣除未经处理土样 CO₂ 释放量之后的数值看作由干燥和重新湿润引起的土壤 CO₂ 净激发释放量, 这一数值代表了扰动、干燥和重新湿润引起的土壤呼吸激发效应的大小 (表 2)。由表 2 可以看出, 7 种土样 0 ~ 14 d 净激发释放量为 23.05 ~ 59.90 mg CO₂ - C · kg⁻¹, 分别相当于 0 ~ 14 d CO₂ 累积释放量的 31.0% ~ 42.1%。0 ~ 14 d CO₂ 净激发释放量在培养第 1 d 就释放了 32.2% ~ 46.4%, 前 3 d 共释放了 61.3% ~ 77.6%, 前 6 d 共释放了 87.2% ~ 95.6%, 表明干燥和重新湿润引起的土壤 CO₂ 激发释放主要集中在培养开始后 3 d 之内。这和以往土壤短期培养实验的结果相一致: Cabrera 的短期培养结果表明, 干土重新湿润引起的矿化氮激发释放主要发生在培养开始后的前 4 d 当中^[9]; Blet-Charaudean 等 2 °C ~ 28 °C 不同温度下的短期培养实验中土壤 CO₂ 激发释放表现在最初的 2 ~ 7 d^[10]。

2.2 土壤 CO₂ 激发释放动力学

图 2 中的土壤 CO₂ 累积释放曲线表明, 不经过干燥和重新湿润土样的 CO₂ 累积释放量与培养时间呈线性关系, 用零级动力学方程 $Y = k_0 t$ (Y 为 t 时间的 CO₂ 累积释放量, k_0 为速率常数) 拟合 7 种不经过处理土壤的 CO₂ 累积释放曲线, 拟合程度均达到极显著水平 ($r^2 = 0.9872 \sim 0.9995$, $P < 0.01$), 而一级反应动力学方程明显不适于拟合这种 CO₂ 累积释放曲线, 这说明此时土壤释放 CO₂ 服从零级反应动力学。这一结果与 Cabrera 的短期培养结果^[9] 和 Addiscott 较长期

研究有机质矿化的结果^[16]相一致,但似乎与大量研究表明的土壤微生物呼吸过程遵从一级反应动力学^[6,17]的结论相矛盾。土壤呼吸释放 CO₂ 过程是微生物参与下有机质分解的复杂生物化学过程,土壤中可供微生物呼吸消耗的有效底物量制约着 CO₂ 的释放,不经过干燥和重新湿润处理土样中活性有机质数量有限,使得土壤中可能遵从一级反应动力学的微生物呼吸特征在短期培养实验中用非线性方法检测不到,转而表现出零级反应动力学的特征,因此也有人将其称为表观零级反应^[9]。

图 2 中经过干燥和重新湿润处理土样的 CO₂ 累积释放曲线呈现类似于一级反应动力学的特征,这是处理土样过程引起的土壤呼吸激发效应导致 CO₂ 激发释放与土壤基本呼吸释放 CO₂ 两个过程相互叠加的结果。虽然一级动力学方程可以用来拟合并描述这种短期 CO₂ 激发释放现象^[6,17],但对其产生的机理解释显得过于笼统。一般情况下,两库叠加模型 $Y = at + A_0(1 - e^{-kt})$ 可以更好地拟合短期 CO₂ 激发释放累积曲线,并能清晰阐述短期 CO₂ 激发释放的相关过程机理^[9,10]。两库叠加模型中,土壤基本呼吸底物库

遵从零级反应动力学规律分解释放 CO₂,干燥和重新湿润导致增加的活性底物库遵从一级反应动力学规律产生并释放 CO₂; Y 为 t 时间土壤 CO₂ 累积释放量 ($\text{CO}_2 - \text{C mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), a 为土壤基本呼吸速率常数 ($\text{CO}_2 - \text{C mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), A_0 和 k 分别为处理引起激发效应的底物库大小 ($\text{C mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和时间常数 (d^{-1})。

两库叠加模型通过非线性方法拟合 7 种处理土样 CO₂ 累积释放曲线的结果(表 2)表明,各处理土壤拟合方程的参数 $a(3.772 \sim 8.163 \text{ 9 mg CO}_2 - \text{C} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1})$ 分别与未经处理土样的零级动力学方程参数 k_0 基本相当,参数 $A_0(22.63 \sim 60.66 \text{ mg C} \cdot \text{kg}^{-1})$ 分别与实测得到的 CO₂ 净激发释放量基本相当。这进一步证实了干燥和重新湿润后土样 CO₂ 激发释放现象是处理土壤过程导致的土壤 CO₂ 激发释放(一级反应)叠加在不处理土壤基本呼吸(零级反应)之上的综合表现;两库叠加模型可以区分这两种同时存在的动力学过程,并能准确合理地描述干燥和重新湿润引起的土壤 CO₂ 激发释放现象。

虽然表 2 中各处理土样两库叠加模型拟合参数 a

表 2 培养过程中土壤 CO₂ 释放及其动力学方程

Table 2 CO₂ emission and its kinetic equation in the soil during the incubation

样号	处理*	10 ~ 14 d 释放速率	CO ₂ 累积释放量 / CO ₂ - C mg · kg ⁻¹		0 ~ 14 d CO ₂ 净激发释放量**	动力学方程
		/CO ₂ - C mg · h · kg ⁻¹	0 ~ 3 d**	0 ~ 14 d		
1	I	0.162 9	27.35(36.8)	74.36	23.05(31.0)	$y = 3.7228t + 22.63(1 - e^{-0.4328t})$
	II	0.154 3		51.31		$y = 3.7013t (r^2 = 0.9994)$
2	I	0.161 4	33.12(38.8)	85.36	31.48(36.9)	$y = 4.2010t + 28.38(1 - e^{-0.4426t})$
	II	0.164 7		53.88		$y = 3.9565t (r^2 = 0.9926)$
3	I	0.198 2	41.38(39.8)	103.89	36.00(34.6)	$y = 4.7323t + 38.38(1 - e^{-0.4421t})$
	II	0.190 7		67.89		$y = 4.5996t (r^2 = 0.9884)$
4	I	0.203 9	47.39(39.1)	121.09	51.86(42.1)	$y = 5.1325t + 47.35(1 - e^{-0.4323t})$
	II	0.206 8		70.23		$y = 4.9889t (r^2 = 0.9872)$
5	I	0.269 1	60.14(39.2)	145.48	55.64(38.3)	$y = 6.9820t + 52.86(1 - e^{-0.4356t})$
	II	0.276 2		89.84		$y = 6.6233t (r^2 = 0.9956)$
6	I	0.360 3	66.58(38.3)	173.84	59.90(34.5)	$y = 8.1639t + 60.66(1 - e^{-0.4347t})$
	II	0.342 6		113.94		$y = 8.2416t (r^2 = 0.9995)$
7	I	0.345 3	56.33(35.4)	159.32	55.84(35.1)	$y = 7.3835t + 53.10(1 - e^{-0.4511t})$
	II	0.333 4		103.58		$y = 7.2287t (r^2 = 0.9971)$

注: * I 为干燥和重新湿润处理; II 为不处理。* * 括号内分别为 0 ~ 3 d CO₂ 释放量或 0 ~ 14 d CO₂ 净激发释放量占 0 ~ 14 d 累积释放量的百分数。

分别与未经处理土样的零级动力学方程参数 k_0 基本相当,但一般情况下参数 a 略大于 k_0 ,说明了干燥和重新湿润过程不仅新增加了遵从一级反应动力学的 CO₂ 激发释放,而且也可能通过增加微生物活性而使遵从零级反应动力学的土壤基本呼吸稍有增大。7 种处理土样中由干燥和重新湿润增加的微生物呼吸有

效底物库大小 A_0 分别为 $22.63 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 $60.66 \text{ mgC} \cdot \text{kg}^{-1}$ 不等,由此也可以推测出在频繁经历干湿交替的田间土壤中可能会有大量有机碳通过干湿变化引起的土壤呼吸激发效应而被微生物分解,以 CO₂ 进入大气,因此在估算田间土壤 CO₂ 释放中应特别加以考虑。两库叠加模型中一级反应的时间常数 k 在不

同土壤间变化不大(0.432 8 ~ 0.442 6 d⁻¹), 没有一致的规律性, 它的倒数 1/k 约为 2.3 d 左右, 进一步说明了干燥和重新湿润引起的 CO₂ 激发释放主要集中在培养实验开始的前 3 d。

2.3 CO₂ 激发释放与土壤肥力

7 种供试土样分别采自垆土同一地块、不同培肥措施长期培育后形成的 7 种不同肥力土壤耕层。短期培养过程中不同供试土样间 CO₂ 释放量及干燥和重新湿润引起的 CO₂ 激发释放均有很大差异(表 2), 长期施用有机物培肥的土壤(3 ~ 7 号样)基本呼吸 CO₂ 释放量及干燥和重新湿润引起的 CO₂ 激发释放均明显高于长期不施肥和单施化肥土壤(1、2 号样), 而秸秆施用量大的土壤高于量小的, 单施化肥土壤又高于不施肥的, 施用厩肥的土壤低于施用等量秸秆的土壤。统计分析表明, 短期培养 14 d 的土壤 CO₂ 累积释放量和净激发释放量(表 2)与土壤有机质含量(表 1)均呈极显著的正线性相关, 而与土壤有机质氧化稳定系数(王旭东等 1998 年数据)^[11]呈极显著负线性相关关系。这些都说明了不同培肥措施长期实施所造成的土壤性质和肥力差异、特别是土壤有机质数量和质量差异是影响土壤 CO₂ 释放及干燥和重新湿润后 CO₂ 激发释放的重要因素。王旭东等^[11]对同一培肥实验的研究表明, 长期使用有机物可以明显提高土壤有机质含量, 同时不同培肥措施也明显影响土壤有机质的质量及其氧化活性。长期使用有机物明显增加了土壤易氧化碳含量, 降低了有机质氧化稳定系数, 使土壤胡敏酸的芳构化度降低, 脂肪族侧链碳增加, 芳核碳所占比例减少, 胡敏酸趋于简单化, 因而使得土壤有机质更容易被氧化分解, 释放出 CO₂。正是由于不同培肥措施长期培育造成了土壤物理、化学和生物性质的不同, 才使得土壤具有了不同的肥力和生产力, 而土壤呼吸培养实验能够使土壤中化学、物理和生物组分之间的相互关系和相互作用自然地综合表现出来, 因此实验结果能很好地代表土壤肥力或者土壤微生物的潜在活性。目前已经有研究者提出并尝试用干土重新湿润后短期培养实验 1 d 或 3 d 土壤 CO₂ 激发释放量作为土壤肥力和土壤质量的生物学指标^[5, 18]。

参考文献:

[1] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351: 304 – 306.

[2] Raich J W, Schelesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellu*, 1992, 44B: 81 – 99.

[3] Valentini R, Mettencci G, Dolman A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests[J]. *Nature*, 2000, 404(6780): 861 – 865.

[4] Neilson J W, Pepper I L. Soil respiration as an index of soil aeration [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54: 428 – 432.

[5] Franzluebbbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, et al. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 613 – 623.

[6] Zak D R, Holmoes W E, MacDonald N W, et al. Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63: 575 – 584.

[7] Pulleman M, Tietema A. Microbial C and N transformations during drying and rewetting of coniferous forest floor material[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 275 – 285.

[8] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1485 – 1498.

[9] Cabrera M L. Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57: 63 – 66.

[10] Blet – Charaudean C, Muller J, Laudelout H. Kinetics of carbon dioxide evolution in relation to microbial biomass and temperature[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54: 1324 – 1328.

[11] Wang X – D(王旭东), Zhang Y – P(张一平), Lu J – L(吕家珑), et al. Effect of long term different fertilization on properties of soil organic matter and humic acids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*(中国农业科学), 2000, 33: 75 – 81 (in Chinese).

[12] van Gestel M, Ladd J N, Amato M. Carbon and nitrogen mineralization from two soils of contrasting texture and micro – aggregate stability: Influence of sequential fumigation, drying and storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23: 313 – 322.

[13] Kieft T L, Soroker E, Firstone M K. Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19: 119 – 126.

[14] Soulides D A, Allison F E. Effect of drying and freezing of soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population[J]. *Soil Sci*, 1961, 91: 291 – 298.

[15] Seneviratne R, Wild A. Effect of mild drying on the mineralization of soil nitrogen[J]. *Plant Soil*, 1985, 84: 175 – 179.

[16] Addiscott T M. Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with different histories[J]. *J Soil Sci*, 1983, 34: 343 – 353.

[17] MacDonald N W, Zak D R, Pregitzer K S. Temperature effects on kinetics of microbial respiration and net nitrogen and sulfur mineralization[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1995, 59: 233 – 240.

[18] Franzluebbbers A J, Arshad M A. Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in northwestern Canada[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60: 1422 – 1427.