旱塬地区不同耕作模式小麦田土壤 CO₂ 释放 通量的变异特征

焦彩强,王益权,刘 军,宋小燕,赵加瑞,徐 海

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌712100)

[摘 要]【目的】揭示不同耕作管理条件下,旱塬地区农田土壤 CO₂ 的释放规律。【方法】在陕西关中头道塬 设置小麦田与休闲田、旋耕与深耕等双因子 4 处理裂区试验,用碱吸收法监测小麦生育期间土壤剖面 0~40 cm 土层 土壤 CO₂ 的释放通量。【结果】(1)小麦生育期间不同处理农田土壤 CO₂ 释放通量的变化过程呈现出双峰和双谷特 征,分别在小麦播种后秋季苗期及竖年 4 月初拔节一孕穗期呈现峰值,在越冬期和小麦成熟期出现低谷。小麦田和 休闲田土壤 CO₂ 释放通量差异明显,其变化规律基本相似。(2)在小麦全生育期,主要根区土壤剖面中 CO₂ 释放通量 呈现出明显上层低下层高的空间分布梯度。不同耕作模式对土壤剖面中 CO₂ 释放通量的时空变异特征有明显影响。 (3)在小麦全生育期,不同处理农田土壤 CO₂ 累计释放总量差异明显,表现为旋耕处理高于深耕处理,小麦田高于休 闲田。【结论】不同土壤耕作管理措施是调控农田土壤碳素循环及土壤空气质量的有效措施。

[关键词] CO₂释放通量;小麦田;休闲地;耕作模式

[中图分类号] S152.6 [文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)05-0178-07

The variation characteristics of soil CO₂ release in wheat growing period in dry land

JIAO Cai-qiang, WANG Yi-quan, LIU Jun, SONG Xiao-yan, ZHAO Jia-rui, XU Hai (College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Soil respiration is one of the key components of the terrestrial carbon cycle. The objective of this field study was to compare the effect of different crop and tillage systems on CO_2 release from dryland soil on the Guanzhong plain. [Method] The study area consisted of four 70 m² (7 m×10 m) field plots. There were two cropping treatments and two tillage treatments. Soil CO_2 flux from the 0-40 cm depth was determined using the alkali absorption method. [Result] The result showed two peaks and two valleys in soil CO_2 flux rates across the growing season. Soil CO_2 flux rates were low during the seedling stage and again during the jointing-booting stage. In contrast CO_2 flux rates were low during the over-wintering and mature stages. CO_2 release amount varied with the two tillage treatments, but changes in flux rates across the growing season. [Conclusion] In summary, the results indicated that total CO_2 release during the growing season was much larger for a wheat field compared to a fallow field. In the fallow field, total CO_2 release was significantly larger in the rotary tillage treatment compared to the deep tillage treatment.

* [收稿日期] 2008-07-28

[基金项目] 陕西省优质小麦生产基地建设项目

[作者简介] 焦彩强(1980-),男,河南南乐人,在读硕士,主要从事长期集约化生产条件下土壤疲劳研究。

E-mail; jiaocaiqiang@nwsuaf.edu.cn [通信作者] 王益权(1957-),男,陕西旬邑人,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤物理与改良研究。 E-mail; soilphysics@163.com

Key words: CO₂ flux rate; wheat field; fallow field; tillage pattern

CO₂ 是土壤空气的重要成分,土壤空气中 CO₂ 浓度一般高于近低层大气,是其几倍到数十倍,甚至 上百倍,直接反映着土壤内部植物根系、动物以及微 生物的生理活性,表征着土壤中有机物质分解与转 化过程的强弱等^[1]。土壤是一个"类生物体",表现 在土壤空气与近地层大气之间不时地进行交换。研 究土壤空气中 CO₂ 的浓度变化特征,目的在于揭示 土壤内部的物质转化过程与生物活性的变异规律, 反映土壤耕作管理水平对于土壤空气的更新作用与 影响等。

土壤是大气中 CO₂ 的源和汇,土壤呼吸作用释放的 CO₂维持着陆地生态系统的碳平衡^[2]。土壤碳 库总贮量为 2 500 Pg,其中有机碳 1 500 Pg,无机碳 1 000 Pg^[3],有机碳贮量是植被、大气碳贮量的 2~3 倍^[3-4]。据有关资料估算,全球每年经由陆地生态系 统进入大气的碳可达 60 Pg^[5-6]。土壤碳库容量巨 大,0.1%的土壤碳发生变化可导致大气圈 CO₂ 浓 度 1 g/cm³ 的变化^[6]。近年来随着全球气候变化, 土壤碳库管理以及全球碳循环已成为学术界关注的 核心问题^[7]。国内外已广泛开展了各种自然生态系 统中,土壤呼吸系统观测及其与相关环境因素之间 关系的研究^[8-9]。

农田 CO₂ 的释放特征是土壤内部一系列生物、 化学过程的综合反映,也是土壤物理状态的直观表 现,表征着土壤的肥力水平和土壤内部物质的循环 规律,间接地反映着不同地区生态环境因子对土壤 内部物质转化过程的作用强度。有学者将土壤呼吸 作为环境污染程度及生态系统对污染承受力的依 据^[10]。为了揭示农田生态系统中 CO₂ 的释放规律, 必须深入研究土壤空气中 CO₂ 的时空变化特征。 在此领域内虽然国内已有学者进行了一些卓有成效 的研究^[11-15],基本上揭示了不同农田生态系统中土 壤 CO₂ 释放过程的季节变化或日变化特征等,但对 土壤剖面上作物主要根区内 CO₂ 动态变化特征的 研究甚少。本试验对陕西关中地区不同耕作模式 下,小麦生育期间农田土壤 CO₂ 释放通量的时空变 化特征进行了连续测定,旨在揭示旱塬地区不同耕 作模式农田土壤空气中 CO₂ 时空动态变化过程及 土壤表层 CO₂ 释放特征,为土壤的科学管理提供依 据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验观测点设在陕西关中地区头道塬上的旱地 农田,该地区光热资源比较丰富,年均温度12.9℃, ≥10℃积温4185℃;多年平均降水量545 mm,其 中50%以上降水量集中在7~9月;年均蒸发量 993.2 mm;冬旱、春旱和伏旱等类型的干旱频繁发 生,属于暖温带半湿润易旱大陆性季风气候区。多 年来实施冬小麦-夏玉米一年两熟的轮作制度。

试验地土壤为±娄土(土垫旱耕人为土,Earthcumuli-orthic anthrosols),土质疏松,土层深厚,通 气透水性强,农艺性状良好,耕层土壤全氮 0.67 g/kg,铵态氮 8.81 mg/kg,碱解氮 72.95 mg/kg,速 效磷 13.24 mg/kg,速效钾 189.91 mg/kg,pH = 8.28。供试土壤剖面基本性状见表 1。

表⊥ 供试土壤剖面的埋化性状	
K KMLKNHNEICEN	

土层深度/cm Soil depth	土壤颗粒组成/% Soil particle composition				有机质含量/
	粘粒 (<0.002 mm) Clay	粉砂粒 (0.02~0.002 mm) Silt	砂粒 (2~0.02 mm) Sand	质地交型 Soil texture	(g • kg ⁻) Organic matter content
0~10	9.21	70.75	20.04		15.74
10~20	10.29	71.49	18.22	粉质粘壤土	15.26
20~30	10.29	73.75	15.97	Silty clay loam	14.19
$30 \sim 40$	9.29	69.98	20.73		10.05

Table 1 Physicochemical characters of experimental soil profile

1.2 供试作物

供试小麦品种为小堰22号,由西北农林科技大 学农作一站提供。

1.3 试验处理及研究方法

试验观测点选在具有代表性的多年来实施旋耕

的农田,裂区试验以深耕与旋耕为主因子、以休闲和 种植小麦为副因子,试验小区总面积为20 m×14 m,主区面积为10 m×7 m;副区面积为7 m×5 m。 旋耕同大田,用旋耕机进行,旋耕深度为20 cm;深 耕则是人工用铁锨翻深30 cm。休闲田和小麦田均 施用无机化肥,施肥及其他管理水平均与大田相同, 在小麦生育期间未进行灌溉。

目前,虽然学术界普遍认为,涡度相关法和箱法 等是测定土壤 CO₂ 释放通量的先进方法,但由于这 些方法仅适宜于监测土壤表面 CO₂ 的释放通量,无 法监测土壤内部不同层位空气中 CO₂ 的变化过程, 故以上 2 种方法均不宜采用。对土壤内部不同层位 空气中 CO₂ 含量,可以用气相色谱方法进行测定, 但其监测精度会受到气体采样时间密度的影响。因 本试验监测的是不同耕作模式和种植模式农田土壤 不同层位空气中 CO₂ 释放通量的变化过程,所以选 定了传统的土壤空气研究方法——碱液吸收法 (Ba(OH)₂ 溶液)。在每种处理土壤上选取了 2 个观 察点,共安置两组 CO₂ 监测装置,即重复 2 次。分 别在每组土壤剖面的 0,10,20,30,40 cm 深处各安 置1套CO₂ 吸收装置(图1)。在小麦播种后立刻埋 设漏斗开始观测试验,漏斗被埋设在小麦行间里。 先用直径为90 mm的土钻打孔到设计的土层深度, 并把坑底整平,然后将口径为75 mm的玻璃漏斗倒 置放入,再按剖面层次依次回填土壤。CO₂ 气体的 碱液吸收瓶放置于地面,以便于定期更换吸收液,同 时测定CO₂ 吸收量。为了获得农田土壤CO₂ 的释 放通量和累计释放量,在小麦生育期间约每隔10 d 更换1次碱液吸收瓶,同时用盐酸反滴定,测定该时 间段内碱液中CO₂ 的累计吸收量。该时间段内各 层土壤空气中CO₂ 的平均释放通量(*Fc*)按照下式 进行计算:

 $Fc/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}) = m/(s \cdot t)$

式中:*m* 为滴定测得 CO₂ 质量(g),*s* 为埋设漏斗的 面积(m²),*t* 为吸收时间(d)。



图 1 CO₂ 吸收装置图(A)和田间布设(B)示意图 Fig. 1 CO₂ absorption device(A)and field distribution(B)diagram

2 结果与分析

2.1 小麦生育期间旱地农田土壤表层 CO₂ 释放通 量的动态变化

土壤表层 CO₂ 的释放量,是农田生态系统中 CO₂ 平衡的主要组成部分,土壤表层 CO₂ 的释放特 征不仅依赖于土壤的基本性状,而且也依赖于气候 以及其他境因素等。表层土壤 CO₂ 释放特征是土 壤有机物质含量、内部各种生物活性与环境因素等 共同作用的结果。图 2 和图 3 分别是陕西关中旱地 小麦生育期间小麦田和休闲田土壤表层(0 cm)CO₂ 释放通量的动态变化过程。从图 2 可以看出,在小 麦生育过程中,土壤表层 CO₂ 释放通量变化过程呈 现出明显的阶段特征。从小麦播种到越冬期间 (2006-10-12-11-30),因为播种前对土壤进行了不 同程度的耕翻扰动、施肥等措施,土壤疏松,且在该 时段土壤内部具有较高积温、水热条件适宜,虽然此 时小麦种子处于萌发出苗阶段,作物根系呼吸微弱, 但土壤中微生物活动非常强烈,使得该阶段成为旱 地土壤表层 CO₂ 释放通量最高的时期,CO₂ 平均释 放通量达 0.8 g/(m² · d)以上;自 11 月末进入小麦 越冬期以后(2006-12-01-2007-02-26),气候逐渐变 冷,微生物活性明显受到抑制,生物呼吸微弱,土壤 表层 CO₂ 释放通量急剧下降至较低水平,平均值仅 为 0.061 g/(m² • d),不足入冬前的 1/10。直至初 春(2007-02-26-2007-03-20),随着气温回升,土壤 内部微生物活性逐渐增强,小麦也进入返青期,根系 呼吸逐渐旺盛,土壤表层 CO₂ 释放通量呈现出波动 性增大的趋势;小麦拔节一孕穗期(2007-03-20-04-04),小麦生长较为旺盛,土壤 CO₂ 释放通量呈 现出第 2 个峰值,平均值为 0.196 g/(m² • d)。由 于此时地面植被阴蔽度高,土壤积温小,春旱土壤墒 情欠缺等原因,尽管此时有微生物和作物根系呼吸 的叠加效应,但土壤表层 CO₂ 释放通量仅相当于秋 季播种出苗期的 1/4 左右。在 2007-04-05-06-06, 由于土壤墒情严重亏缺,土体收缩紧实,小麦根系活 力衰减等原因,土壤表层 CO₂ 释放通量又呈现出明 显的下降过程,土壤表层 CO₂ 释放通量几乎接近于 冬季水平。

在小麦全生育期内,旋耕和深耕2种耕作模式 下,小麦田土壤表层 CO₂ 释放通量变异过程呈现出 一致性,且旋耕地略高于深耕地(图2)。这说明旱 地小麦生育期间土壤表层 CO₂ 释放通量主要依赖





Fig. 2 Dynamic changes of soil surface CO2

release in different tillage treatments of wheat field

在休闲田中,旋耕和深耕2种耕作模式的土壤 表层 CO₂ 释放通量有明显差异,尤其是从春季到小 麦收获期间,旋耕处理土壤表层 CO₂ 的平均释放通 量明显高于深耕处理,深耕处理土壤表层 CO₂ 释放 通量的波动性强于旋耕处理(图 3)。这与旋耕地土 壤相对紧实、土壤内部空气中 CO₂ 较高有关。

2.2 小麦田作物根区土壤空气中 CO₂ 释放通量的 时空变异

除环境因素外,土壤 CO₂ 释放通量还受土壤内 部 CO₂ 浓度的影响^[15]。作物根区内土壤空气中 于土壤内部生物活性,其次才与土壤的气体扩散能 力有关。

不同耕作模式下,休闲田土壤表层 CO2 的释放 特征,主要反映着土壤内部微生物活性的动态变化 过程。由图 3 可知,2 种耕作模式下,休闲田土壤表 层(0 cm)CO₂释放通量动态过程与小麦田基本一 致,即在冬前最高,到越冬期降低至较低值,初春 (2007-03-22)以后,随着气温回升土壤表层 CO₂ 释 放通量也逐渐增大,2007-04-04 出现一个较小的峰 值,其后再缓慢下降。在2种不同耕作模式下,比较 休闲田与小麦田(图2)可知,从播种到小麦返青期 (2006-10-12-2007-02-27),休闲田土壤表层 CO₂ 释放通量与小麦田基本相当;从小麦返青期到灌浆 期(2007-02-28-05-18),休闲田土壤表层 CO2 释放 通量明显低于小麦田,随着时间的延长土壤 CO2 释 放通量变化过程也相对平缓,第2个峰值不明显。 反映出春季小麦根系的呼吸是旱地土壤表层 CO₂ 释放量的主要贡献者。



图 3 不同耕作模式下休闲田土壤表层 CO₂释放通量的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of soil surface CO₂

release in different tillage treatments of fallow field 波座目上撞开册机能及上撞层体态换能力的

CO₂ 浓度是土壤生理机能及土壤气体交换能力的综 合体现,土壤内部空气质量状况直接影响作物根系 的呼吸及生长发育等。为了全面探明旱地小麦田土 壤 CO₂ 释放通量的时空变异规律,在小麦生育期全 程监测作物主要根区各土层空气中 CO₂ 释放通量, 结果见图 4 和图 5。从图 4 和图 5 可以看出,在小麦 生育期,0~40 cm 各层土壤 CO₂ 释放通量均具有明 显的垂直梯度特征,其下层土壤 CO₂ 释放通量高于 上层,土壤内部 CO₂ 释放通量垂直梯度成为农田土 壤不断向大气释放 CO₂ 的动力。同时还可以看出, 土壤剖面 CO₂ 垂直梯度与有机物质含量梯度(表 1) 相反,说明在旱地土壤中,CO₂ 的释放通量与有机物 质分解关系不大。在小麦播后第 40~60 天,气温较 低,在 0~40 cm 土层,上下土层间土壤 CO₂ 释放通 量差异较大,变异为 0.02~0.1 g/(m² · d),反映了 土壤的温度效应;在其他时期,土壤 CO₂ 释放通量 均较高,上下土层间土壤 CO₂ 释放通量差值基本维 持在 0.1 g/(m² · d)左右,土壤水分成为影响 CO₂ 释放的主要因子。表层土壤墒情欠缺,而下层墒情 相对稳定,各种生物活性强于表层,使土壤表层 CO₂ 释放通量低于下层。土壤剖面中 CO₂ 释放通量梯 度成为旱地农田土壤空气的基本特征。



图 4 深耕耕作模式下小麦田土壤剖面 CO₂ 释放通量的动态变化等值线图 Fig. 4 Isoline map of CO₂ release in soil profile of deep loosing cornfield





Fig. 5 $\,$ Isoline maps of CO_2 release in soil profile of rotary tillage wheat field

比较图 4 和图 5 可以看出,2 种不同耕作模式 下,小麦田土壤内部 CO₂ 释放通量的空间梯度差异 明显。尤其从春季到小麦收获期间(138~218 d), 旋耕耕作模式下土壤剖面中,相同土层空气中的 CO₂ 释放通量均高于深耕耕作模式,表明旋耕田土 壤内部空气质量相对较差。

从图 4 和图 5 的时间序列还可以看出,播种后 25~40 d 是土壤 CO₂ 释放通量的高峰期,0~40 cm 土层空气中的 CO₂ 释放通量变异为 0.8~0.9 g/(m² · d);进入越冬期(播种后 49 d)后,生物活性 急剧降低,土壤内部 CO₂ 释放通量达到最低值,仅 为 0.05~0.1 g/(m² · d);从播种第 50 天起,随着 气温回升,土壤 CO₂ 释放通量缓慢递增,到第 130 天有一个快速增长阶段,于145 d 左右达到第 2 次 高峰,土壤 CO₂ 释放通量为 0.2~0.3 g/(m² · d), 之后再急速下降到较低水平。在小麦生育过程中, 0~40 cm 各土层空气中的 CO₂ 的释放通量变异过 程,总体上呈现出不同程度的同步性。

2种不同耕作模式下,在0~40 cm 土层,小麦 田土壤 CO₂ 释放通量变化过程既具有一定相似性, 也呈现出一定的差别。其相似性主要表现为从春季 小麦返青(138 d)到拔节孕穗期(200 d),受气温回 升、小麦快速发育的影响,土壤内部 CO₂ 释放通量 出现了明显差异。在 0~40 cm 土层中,土壤 CO₂ 释放通量依照从上层到下层逐渐递增。但不同耕作 模式下,土壤 CO₂ 释放通量的增幅不同,其中深耕 处理较大。两种不同耕作模式土壤内部,CO₂释放 通量的时空变异过程是土壤内部水热效应的综合反 映。在春季深耕处理土层比较疏松多孔,土壤温度 逐层回升,微生物和作物根系活性明显增强,故其土 壤 CO₂释放通量增幅较土体相对紧实的旋耕处理 高。土壤剖面上 CO₂释放通量的时空变异,充分反 映了不同土壤耕作制度在作物生育全过程所具有的 生物学效应。

2.3 不同耕作方式对土壤表层 CO₂ 累计释放量的 影响

农田生态系统中,土壤 CO₂ 释放量是土气界面 气体交换的主要度量指标,一定时期内土壤 CO₂ 累 计释放量是近地层大气碳循环与碳平衡体系的重要 组成部分。图 6 为陕西关中旱地不同耕作模式下, 小麦田以及休闲田土壤表层 CO₂ 累计释放量的变 化。从图 6 可以看出,播种后 30~220 d,2 种耕作 模式下,小麦田土壤表层 CO₂ 累计释放量明显高于 休闲田。休闲田土壤表层 CO₂ 累计释放量明显高于 休闲田。休闲田土壤表层 CO₂ 的累积过程,是土壤 微生物生理代谢强度与变异过程的体现,而小麦田 则是土壤微生物及小麦生理代谢强度与变异过程的 共同体现。在休闲田中,不同耕作模式对土壤表层 CO₂ 累计释放量有明显影响,其中播种后 30~220 d 旋耕处理的土壤,表层 CO₂ 累计释放量高于深耕处 理;在小麦田中,2 种耕作处理土壤表层 CO₂ 累计释 放量无明显差异。

在小麦生育过程中,从第 60 天起各处理间出现 差异,至第 120 天,2 种耕作模式下小麦田 CO₂ 累计 释放量急剧增大;从春季气温回升期开始(136 d),4 种不同处理间土壤表层 CO₂ 累计释放量呈现出明 显差异(图 6)。

整个小麦生育期(2006-10-12-2007-06-06)内, 4 种处理土壤 CO₂ 累计释放总量见表 2。由表 2 可 知,旋耕处理土壤 CO₂ 累计释放总量高于深耕处 理,小麦田高于休闲田。4 种处理中,以旋耕小麦田 土壤 CO₂ 累计释放总量最大,深耕休闲田最低。由 此可知,不同的耕作管理措施,是调控农田土壤碳素 循环及改善土壤空气质量的主要调控措施。



different treatment.

◆-. Rotary fallow; ---. Deep tillage fallow;

 $- \blacktriangle -$. Rotary cultivation; $- \times -$. Deep tillage cultivation

mol/m²

表 2 在小麦生育期间 4 种不同处理农田土壤 CO₂ 的累计释放总量

Table 2	Cumulative release a	amount of soil CO ₂ in	four treatments
---------	----------------------	-----------------------------------	-----------------

处理 Treatment	休戶 Follov	利地 w field	小麦田 Wheat field	
	旋耕 Rotary tillage	深耕 Deep loosing	旋耕 Rotary tillage	深耕 Deep loosing
CO ₂ 累计释放总量 CO ₂ total emission	0.728 0	0.677 1	0.993 3	0.963 3

3 结 论

(1) 在小麦全生育期,旱地农田土壤表层 CO₂ 释放通量变化呈现出明显的阶段特征,一般以小麦 播种后的秋季最高,第2次峰值出现在竖年4月初 的小麦拔节一孕穗期,而在小麦越冬期和成熟期均 较低。在休闲田中,不同耕作措施对土壤表层 CO₂ 释放通量有明显的影响。

(2)在小麦全生育期,旱地农田作物根区范围 (0~40 cm 土层),随着土层深度的增加,土壤空气 中的 CO₂ 释放通量呈现出递增的梯度特征,CO₂ 分 布梯度是维持土壤内部不断地向近地层释放 CO₂ 的动力。旱地土壤剖面 CO₂ 释放通量梯度与土壤 有机物质含量梯度变异不同,证实土壤水热条件及 其物理状态是影响土壤空气质量的主导因子。不同 耕作模式影响土壤剖面中 CO₂ 释放通量的变异过 程。总体而言,旋耕处理土壤内部 CO₂ 释放通量比 深耕处理高,其变化过程较深耕处理相对平缓。

(3)土地的利用情况、耕作模式均可影响土壤 CO₂的累计释放总量。土壤 CO₂累计释放总量呈 现出旋耕处理高于深耕处理、小麦田高于休闲田的 规律,其中以旋耕小麦田土壤 CO₂累计释放总量最 大,深耕休闲田最低。证实采取不同的土壤耕作管 理措施,既能调控土壤碳素循环,又能改善土壤空气 质量。

[参考文献]

- [1] 戴万宏,王益权,黄 耀,等. 缕土剖面 CO₂ 浓度的动态变化及 其受环境因素的影响 [J]. 土壤学报,2004,41(5):827-828.
 Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, et al. Seasonal dynamic of CO₂ concentration in Lou soil and impact by environmental factors
 [J]. Acta Pedologica Sinica,2004,41(5):827-828. (in Chinese)
- [2] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis [R]. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change. USA: Cambridge University Press, 2001:881.
- [3] Lal R. World soils and greenhouse effect [J]. IGBP Global Change Newsletter, 1999, 37: 4-5.
- [4] William H, Schlesinger. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils [J]. Nature, 1990, 348:232-234.
- [5] Rosenzweig C, Hillel D. Soils and global climate change: Challenges and opportunities [J]. Soil Science, 2000, 165(1):47-56.
- [6] Raich J W, Potter C S. Global pat terns of carbon dioxide emission from soils [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9:23-26.
- Schlesinger W H. An overview of the carbon cycle[M]//Lai
 R. Soil and global change. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995:9-25.
- [8] 李凌浩,王佐忠.草地群落的土壤呼吸[J].生态学杂志,1998, 17(4):45-51.

Li L H, Wang Z Z. Soil respiration in grassland communities in

the world [J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(4): 45-51. (in Chinese)

- [9] 刘绍辉,方精云,青田信.北京山地温带森林的土壤呼吸[J]. 植物生态学报,1998,22(2):119-126.
 Liu S H, Fang J Y, Qing T X. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China[J]. Acta Phytoecologica Sinica,1998,22(2):119-126. (in Chinese)
- [10] Palmborg C, Bringmark L, Bringmark E, et al. Multivariate analysis of microbial activity and soil organic matter at a forest site subjected to low level heavy metal contamination [J]. Integ Soil anal Ambio, 1998, 27(1):53-57.
- [11] Bajracharya R M, Lai R, Kimble J M. Erosion effects on carbon dioxide concentration and carbon flux from an Ohio Alfisol [J]. Soil Sci Soc Am J,2000,64:694-700.
- [12] De Jong E, Shappert J V. Calculation of soil respiration and activity from CO₂ profiles in the soil [J]. Soil Sci, 1972, 113: 328-333.
- [13] Fernandez I J, Son Y, Kraske C R, et al. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest
 [J]. Soil Sci Soc Am J,1993,57:1115-1121.
- [14] 贾金生,李 俊,张永强,夏玉米生长盛期农田土壤 CO₂ 排放的研究 [J]. 中国生态农业学报,2003,11(3):1-4.
 Jia J S,Li J,Zhang Y Q. Study on CO₂ emission from soil of typical farmland in North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2003,11(3):1-4. (in Chinese)
- [15] 梁福源,宋林华,王 静.土壤 CO₂ 浓度昼夜变化及其对土壤
 CO₂ 排放量的影响 [J]. 地理科学进展,2003,22(2):170-175.
 Liang F Y, Song L H, Wang J. Diurnal variation of soil CO₂ concentration and its relationship with soil CO₂ flux [J]. Progress in Geography,2003,22(2):170-175. (in Chinese)