

# 土剖面 CO<sub>2</sub> 浓度的动态变化及其受环境因素的影响\*

戴万宏<sup>1,2</sup> 王益权<sup>1</sup> 黄耀<sup>2</sup> 刘军<sup>1</sup> 赵磊<sup>1</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 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)

## SEASONAL DYNAMIC OF CO<sub>2</sub> CONCENTRATION IN LOU SOIL AND IMPACT BY ENVIRONMENTAL FACTORS

Dai Wanhong<sup>1,2</sup> Wang Yiquan<sup>1</sup> Huang Yao<sup>2</sup> Liu Jun<sup>1</sup> Zhao Lei<sup>1</sup>

(1 College of Resource and Environment, Northwest Sci Tech. University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 IAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

关键词 土; 土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度; 季节动态; 土壤温度; 土壤含水量

中图分类号 S147.3 文献标识码 A

CO<sub>2</sub> 是土壤空气的重要组成, 土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度一般高于大气几倍到数十倍, 甚至上百倍<sup>[1]</sup>。土壤空气中 CO<sub>2</sub> 主要来源于土壤呼吸, 其浓度主要决定于生物因素(植物根系、土壤微生物活性等)和环境因素(土壤温度、含水量等)<sup>[2-4]</sup>。土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度可以反映和影响土壤向大气释放 CO<sub>2</sub> 的通量<sup>[4,5]</sup>, 同时对植物根系生长发育、土壤微生物活动和各种养料物质转化也有很大影响<sup>[1]</sup>。研究了解土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度剖面分布、季节动态及其影响因素, 有助于人们认识土壤中 CO<sub>2</sub> 产生、累积、输运以及向大气排放的生物和物理过程, 制定和实施合理的农作措施以改善作物生长环境和减少土壤向大气排放的 CO<sub>2</sub>。国外已在森林、草地和农田土壤上开展了较长时间的土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度观测研究<sup>[4-7]</sup>, 但我国的研究和报道很少<sup>[8,9]</sup>。本文通过土壤剖面不同深度 CO<sub>2</sub> 浓度的定位观测, 初步揭示了土剖面 CO<sub>2</sub> 浓度的分布特征、季节动态及其受水热条件的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于西北农林科技大学试验农场内。年平均气温 12.9℃, 年均降水量 635.1 mm; 降水年际变化大, 年度内分布极不均匀, 干旱频繁发生<sup>[10]</sup>。

土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度观测在已持续 24 年的土壤培肥定位试验不施肥小区(重复 3 次)进行; 作物为小麦-玉米一年两熟; 耕作管理措施与一般农田相同。试验地土壤为土(土垫旱耕人为土), 质地为粉砂粘壤, 有机质含量 13.11 g kg<sup>-1</sup>, 容重 1.33 g cm<sup>-3</sup>, 物理性粘粒含量 469.4 g kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 研究方法

田间土壤不同深度埋设自制简易空气采集器, 2001 年 3 月至 2002 年 3 月期间每隔 10 d 左右采集一次土壤空气样品, 测定其中 CO<sub>2</sub> 浓度。

1.2.1 土壤空气采集 (1)采集器(图 1a)。惰性硬质塑料管(内径 2 mm)的一端插入倒置并外裹尼

\* 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01)资助

作者简介: 戴万宏(1965~), 男, 陕西西安人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤肥力和温室气体排放的研究。E-mail: dwh@dq.cern.ac.cn

收稿日期: 2003-05-21; 收到修改稿日期: 2003-11-03

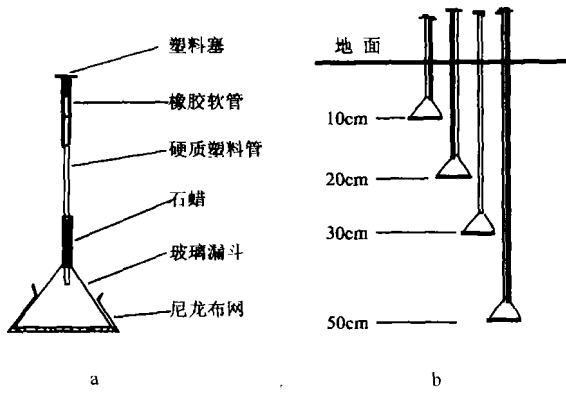


图1 土壤空气采集器构造(a)和田间布设(b)示意图

龙网的玻璃漏斗颈部, 联接处用石蜡密封, 另一端引出地面, 套上橡胶软管并用小塞密封。(2) 样点设置及采样。3个不施肥小区内分别各选3点, 用土钻打孔, 每点分别在距地面50、30、20和10cm深度处依次相互错位地埋设采集器(如图1b), 并按原土层回填钻孔。待回填土壤与周围土壤环境趋于一致后开始取样观测。采样时间固定在每个采样日的上午9:00~11:00; 先用注射器缓慢抽排掉采集器中积聚的空气, 然后密闭使采集器中空气更新; 约30min后用5ml注射器在同一小区相同深度的3个采集器中各准确抽取1ml土壤空气, 组成混合气体样品; 3个小区分别取样作为重复。

**1.2.2 CO<sub>2</sub>浓度测定** 土壤空气样品中CO<sub>2</sub>浓度用气相色谱仪(日立663-30型)测定<sup>[11]</sup>。条件为: 硅胶色谱柱(150℃老化24h), 气化室温度100℃, 色谱柱温度120℃, 热导池检测器(TCD), 载气N<sub>2</sub>流速为40ml min<sup>-1</sup>; 待测气体进样量0.6ml。测定前用纯CO<sub>2</sub>气体作标准曲线, 比照标准曲线计算土壤空气CO<sub>2</sub>浓度。

田间采气样的同时, 用烘干法测定5~15cm、15~25cm、25~35cm和45~55cm土壤含水量, 用地温计测定10cm和20cm深度处土壤温度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤空气CO<sub>2</sub>浓度的剖面分布

观测期间土剖面CO<sub>2</sub>浓度的动态变化如图2a所示。一般情况下, 剖面CO<sub>2</sub>浓度呈现比较规律的上低下高分布特征, 表层10cm处最低, 随着土层加深而明显增加, 50cm处通常比10cm处高2倍以上, 10、20、30和50cm深度处土壤空气CO<sub>2</sub>浓度平均值分别为3.379、4.500、6.032和7.366 μL L<sup>-1</sup>。不

同季节土壤剖面不同深度处CO<sub>2</sub>浓度的差异大小不同, 冬季差异很小, 其余季节差异较大, 并有随土层加深而增大的趋势。表层土壤孔隙发达, 作物根系呼吸和微生物呼吸产生的CO<sub>2</sub>能够快速扩散、逸出土壤, 而深层土壤容重大、孔隙度小以及犁底层等限制了CO<sub>2</sub>扩散, 使其在较深土层积累较多, 从而形成了土CO<sub>2</sub>浓度上低下高的剖面分布特征。

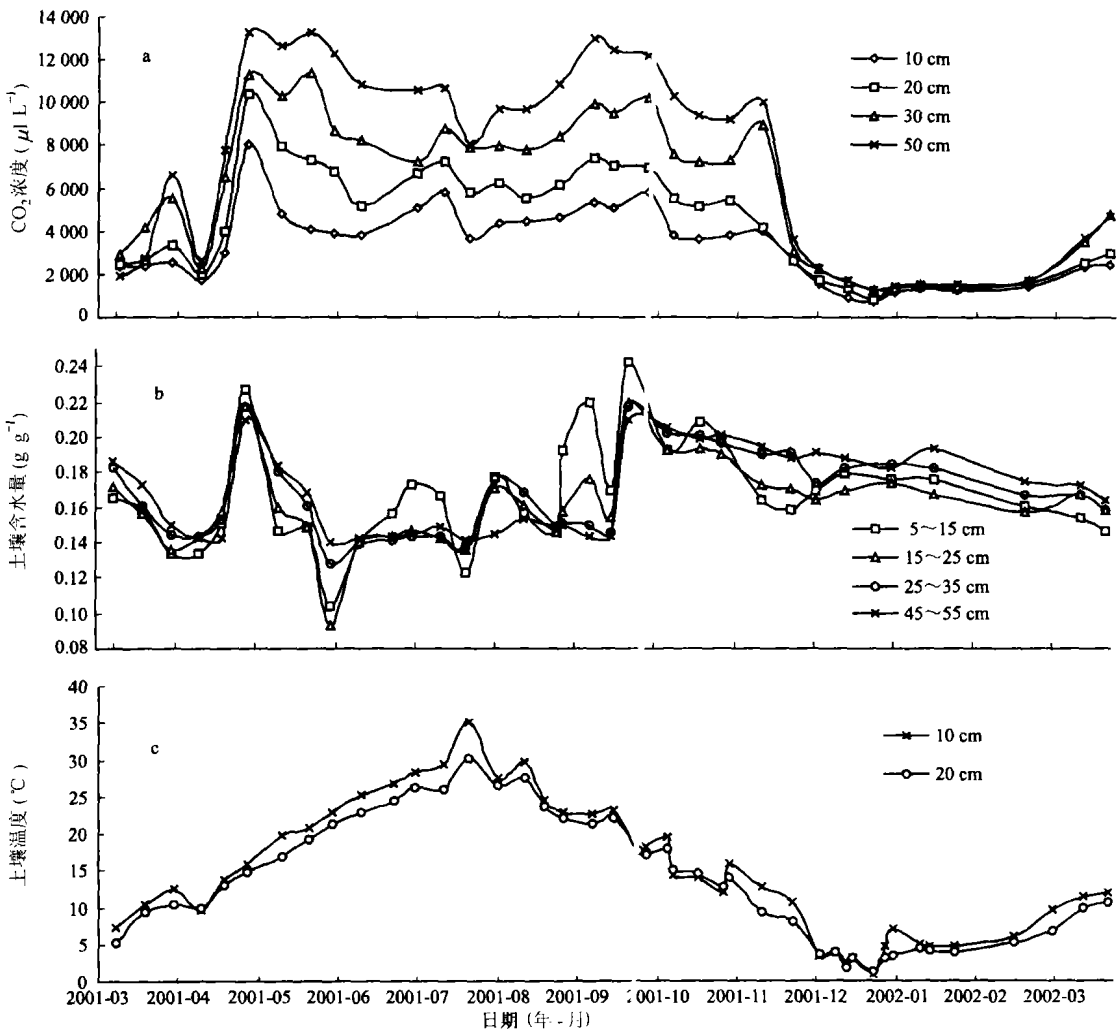
### 2.2 土壤空气CO<sub>2</sub>浓度的季节动态

土壤空气CO<sub>2</sub>浓度具有明显的、较为复杂的双峰型季节变化规律(图2a)。3月初至4月底总体呈上升趋势, 但4月上旬强烈倒春寒发生时出现一个短暂低谷; 4月底~5月中旬出现全年最高峰, 10、20、30和50cm处最高值分别为8.066、10.381、11.384和13.294 μL L<sup>-1</sup>; 5月中旬~8月底维持中等浓度并小幅波动; 8月底~9月下旬出现第二高峰, 其浓度小于春季的最高峰值, 10和20cm处CO<sub>2</sub>浓度的第二高峰相对不很明显; 9月下旬~11月底总体呈下降趋势; 12月初~来年2月底在极低浓度范围波动, 其中2001年12月27日出现全年最低值(762~1.265 μL L<sup>-1</sup>)。整个观测期间土壤空气CO<sub>2</sub>浓度变化范围为762~13.294 μL L<sup>-1</sup>, 与我国山西棉田(1.400~15.900 μL L<sup>-1</sup>)<sup>[9]</sup>相类似; 比国外报道的草地(500~22.600 μL L<sup>-1</sup>)<sup>[5]</sup>和农田(560~20.900 μL L<sup>-1</sup>)<sup>[4]</sup>稍窄。

### 2.3 水热条件对土壤空气CO<sub>2</sub>浓度的影响

土壤温度和水分是影响土壤空气CO<sub>2</sub>浓度的最重要环境因素, 它们一方面通过影响作物生长和微生物活性而影响土壤CO<sub>2</sub>产生, 另一方面也影响CO<sub>2</sub>在土壤中扩散及其向大气排放<sup>[1,5]</sup>。观测结果表明, 土CO<sub>2</sub>浓度季节变化(图2a)与土壤含水量季节变化(图2b)没有明显一致性, 而与土壤温度季节变化(图2c)有明显的相似性, 整体上呈现出CO<sub>2</sub>浓度随土壤温度升高而增加、降低而减小的趋势, 但在严重干旱、土壤含水量很低的夏季(6月~8月)没有出现这种趋势, 土壤空气CO<sub>2</sub>浓度在夏季高温时期维持相对较低的中等浓度。

观测期间10cm处土壤温度低于5℃的冬季(2001年11月26日至2002年2月20日), 冬小麦处于越冬期, 生长缓慢, 土壤微生物活性很低, 因此土壤呼吸微弱, 土壤空气CO<sub>2</sub>浓度很低, 与此同时土壤空气CO<sub>2</sub>浓度、土壤温度和含水量变化均很小, 以下定量探讨土壤温度和含水量对土壤空气CO<sub>2</sub>浓度影响时不考虑这一时期。



注: a 为土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度; b 为土壤含水量; c 为土壤温度

图 2 土土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度、土壤温度和含水量

回归分析(表 1)表明,土壤温度大于 5 $^{\circ}\text{C}$  时土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度呈极显著二次曲线相关 ( $p < 0.01$ ); 10 cm 深度处 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤含水量呈极显著正线性相关 ( $p < 0.01$ ), 其他深度处二者几乎不相关 ( $R^2$  为 0.003~0.032)。由 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度回归方程可以计算出 10 和 20 cm 深度处土壤温度分别为 24.1 $^{\circ}\text{C}$  和 21.9 $^{\circ}\text{C}$  时, 该深度处 CO<sub>2</sub> 浓度达到最高值, 低于此温度时 CO<sub>2</sub> 浓度随土温升高而增加, 高于此温度时则随土温升高明显降低; 显然这一临界温度远远低于一般认为的土壤呼吸临界温度, 但是田间实际情况下, 高于这一临界温度的时期正好是土壤含水量很低(图 2b)的夏季持续严重干旱期, 虽然土壤温度很高, 且适于作物生长和微生物活动, 但严重的水分胁迫限制了土壤呼吸, 因此使得土壤空气 CO<sub>2</sub> 维持中等浓度(3 800~10 690  $\mu\text{L L}^{-1}$ )。

表 1 中 10 cm 和 20 cm 深度处 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度和含水量的两因素回归方程均达极显著水平 ( $R^2$  分别为 0.773 和 0.783,  $p < 0.01$ ), 即观测期内土温大于 5 $^{\circ}\text{C}$  时土壤温度和含水量变化可以解释土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度季节变异的 77.3% 和 78.3%, 这说明了土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度同时受土壤温度和含水量的共同影响, 且具有交互效应, 但回归方程中交互项的影响没有达到显著程度 ( $p = 0.609$  和 0.360)。

考虑到极端干旱下水分胁迫对土壤呼吸的限制及其对 CO<sub>2</sub> 浓度季节动态的影响, 将土温大于 5 $^{\circ}\text{C}$  的观测期分为两部分: 夏季干旱期(2001 年 5 月 22 日至 9 月 17 日, 5~55 cm 土壤平均含水量 0.116~0.167  $\text{g g}^{-1}$ ) 和春秋季节(除 10 cm 处土温小于 5 $^{\circ}\text{C}$  的冬季和夏季干旱期以外的时期), 两者的土壤温度分界线约为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。回归分析(表 1)表明, 夏季干旱期土

表1 土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度和含水量的回归分析

| 观测时期  | 深度<br>(cm) | 土壤温度                               |                | 土壤含水量                         |                | 土壤温度 + 含水量   |                |
|---|------------|------------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|--|----------------|
|   |            | 回归方程                               | R <sup>2</sup> | 回归方程                          | R <sup>2</sup> | 回归方程   | R <sup>2</sup> |
| 全年<br>(2001-03-08 ~ 2001-11-26,2002-02-20 ~ 2002-03-29<br>N = 27)                                   | 10         | $Y = -11.8t^2 + 569.4t - 1921.1$   | 0.536**        | $Y = 25\ 103.2w - 272.2$      | 0.302**        | $Y = -7.6t^2 + 91\ 397.4w^2 - 551.2tw + 496.3t + 1\ 352.7w - 3\ 373.8$               | 0.773**        |
|   | 20         | $Y = -21.7t^2 + 952.3t - 3\ 515.0$ | 0.669**        | $Y = 14\ 909.5w - 2\ 803.6$   | 0.032          | $Y = -16.9t^2 + 300\ 148.4w^2 - 2\ 375.5tw + 1\ 170.1t - 331\ 198.3w - 5\ 140.6$     | 0.783**        |
| 夏季干旱期<br>(2001-05-22 ~ 2001-09-17,<br>N = 10)   | 10         | $Y = -19.8t + 5\ 054.5$            | 0.014          | $Y = 17\ 360.2w + 1\ 822.7$   | 0.565*         | $Y = 5.8t^2 + 20\ 289.9w^2 + 2\ 662.5tw - 692.6t - 52\ 929.4w + 15\ 502.9$           | 0.642          |
|   | 20         | $Y = -95.7t + 8\ 753.7$            | 0.157          | $Y = 3\ 223.6w + 6\ 014.2$    | 0.008          | $Y = -1.5t^2 + 369\ 617.2w^2 - 5\ 001.4tw + 699.4t + 17\ 576.7w - 2\ 473.9$          | 0.384          |
| 春秋季节<br>(2001-03-08 ~ 2001-05-11,<br>2001-09-24 ~ 2001-11-26,<br>2002-02-20 ~ 2002-03-29<br>N = 17) | 10         | $Y = 831.4e^{0.1029t}$             | 0.729**        | $Y = 38\ 341.5w - 3\ 142.4$   | 0.554**        | $Y = -5.1t^2 + 974\ 471.6w^2 - 10\ 946.4tw + 2\ 039.8t - 157\ 472.6w + 0.819$        | 0.819**        |
|   | 20         | $Y = 973.6e^{0.1174t}$             | 0.789**        | $Y = 71\ 148.6w - 7\ 941.0$   | 0.493**        | $Y = 29.5t^2 + 2\ 953\ 924.5w^2 - 30\ 537.5tw + 4\ 784.0t - 593\ 464.7w + 19\ 925.8$ | 0.929**        |
|   | 30         |                                    |                | $Y = 82\ 072.3w - 8\ 666.4$   | 0.420**        |  |                |
|   | 50         |                                    |                | $Y = 102\ 653.7w - 11\ 529.0$ | 0.331*         |  |                |

注: \* 表示显著水平达到 5%, \*\* 表示显著水平达到 1%; 回归方程中 Y 为土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度 (μL L<sup>-1</sup>), t 为土壤温度 (°C), w 为土壤含水量 (g g<sup>-1</sup>)

壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度间没有显著的相关关系; 10 cm 深度处 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤含水量显著线性相关, 但 20 cm 及其以下深度处二者之间却没有明显相关关系。春秋季节(10 cm 处土温为 5~20℃) 10 cm 和 20 cm 深度处土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度均呈极显著指数关系( $R^2$  分别为 0.729 和 0.789,  $p < 0.01$ ); 各深度处土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤含水量均呈极显著或显著正线性关系。进一步地, 夏季干旱期土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度和含水量的二元回归方程拟合度没有达到显著水平(表 1); 春秋季节 10 cm 和 20 cm 深度处土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度和含水量的二元回归方程拟合度均达极显著水平( $R^2$  分别为 0.819 和 0.929), 即土壤温度和含水量变化可以解释 CO<sub>2</sub> 浓度变异的 81.9% 和 92.9%, 同时二者对 CO<sub>2</sub> 浓度的影响有明显交互效应, 10 cm 深度处的交互效应接近显著水平( $p = 0.123$ ), 20 cm 深度处则达到了极显著水平( $p = 0.001$ )。以上分析说明, 观测期间春秋季节土的土壤温度和含水量同时显著地影响土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度, 且二者的影响有明显交互作用; 而夏季干旱期土壤温度和含水量对土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响较为复杂, 表现出土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度基本不受土壤温度和含水量变化影响的趋势, 这可能是夏季干旱导致土壤水分严重亏缺, 强烈限制了土壤呼吸的缘故, 尚需进一步观测研究。

### 3 结 论

1) 土剖面上土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度呈现比较规律的上低下高分布特征。10、20、30 和 50cm 深度处 CO<sub>2</sub> 浓度全年平均值分别为 3 379、4 500、6 032 和 7 366  $\mu\text{L L}^{-1}$ 。

2) 2001 年 3 月至 2002 年 3 月, 土土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度呈双峰型季节动态特征。10~50 cm 土壤剖面 CO<sub>2</sub> 浓度的周年变化范围为 762~13 294  $\mu\text{L L}^{-1}$ 。

3) 土土壤温度和含水量对土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响有明显的季节差异。春秋季节土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度与土壤温度呈极显著指数关系, 与土壤含水量呈显著或极显著正线性相关; 土壤温度和含水量对土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度的影响有明显交互作用; 10 cm 和 20 cm 深度处土壤温度和含水量变化可以解释 CO<sub>2</sub> 浓度变异的 81.9% 和 92.9%。夏季干旱期土壤空气 CO<sub>2</sub> 浓度表现出基本不受土壤温度和含水量变化影响的趋势, 可能与严重水分胁迫限制了土壤呼吸有关。

### 参 考 文 献

- [1] 贝费尔等著. 周传槐译. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1983. 234~240
- [2] Amundson R G, Davidson E A. Carbon dioxide and nitrogenous gases in the soil atmosphere. *J. Geochem. Explor.*, 1990, 38: 13~41
- [3] Buyanovsky G A, Wagner G G. Annual cycles of carbon dioxide level in soil air. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1983, 47: 1139~1145
- [4] Bajracharya R M, Lai R, Kimble J M. Erosion effects on carbon dioxide concentration and carbon flux from an Ohio Alfisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 694~700
- [5] de Jong E, Schappert J V. Calculation of soil respiration and activity from CO<sub>2</sub> profiles in the soil. *Soil Sci.*, 1972, 113: 328~333
- [6] Fernandez I J, Son Y, Kraske C R, *et al.* Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and after harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 1115~1121
- [7] Sotomayor D, Rice C W. Soil air carbon dioxide and nitrous oxide concentrations in profile under tallgrass prairie and cultivation. *J. Environ. Quality*, 1999, 28: 784~793
- [8] 刁一伟, 郑循华, 王跃思, 等. 开放式空气 CO<sub>2</sub> 增高条件下旱地土壤气体 CO<sub>2</sub> 浓度廓线测定. *应用生态学报*, 2002, 13: 1249~1252
- [9] 王坚. 棉花地膜栽培的土壤空气状况. *西南农业大学学报*, 1989, (增刊): 129~132
- [10] 中国科学院西北水土保持研究所编. 武功土壤. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987. 1~15, 38~65
- [11] 方肇伦编. 仪器分析在土壤学和生物学中的应用. 北京: 科学出版社, 1983. 186~218