

UV-B 辐射增强与秸秆施用对大豆田土壤呼吸的影响

胡正华¹, 李涵茂¹, 杨燕萍¹, 陈书涛¹, 李岑子¹, 申双和²

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 利用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统测定土壤呼吸, 研究了 UV-B 辐射增强和秸秆施用对大豆田土壤呼吸的影响。结果表明, UV-B 辐射增强 20% 使土壤呼吸速率降低了 30.31%, 秸秆施用使土壤呼吸速率提高了 14.51%, UV-B 辐射增强 + 秸秆施用复合处理对土壤呼吸速率没有显著影响。UV-B 增强提高了施用秸秆的碳转化率。对照、UV-B 增强、秸秆施用和 UV-B 增强 + 秸秆施用 4 种处理的土壤呼吸与土壤温度都存在极其显著的指数关系 ($p < 0.01$), 拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.434、0.563、0.451 和 0.513。土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 值分别为 1.55、1.91、1.80 和 1.71。可见, UV-B 辐射增强、秸秆施用和 UV-B 辐射增强 + 秸秆施用提高了大豆田土壤呼吸的 Q_{10} 。

关键词: UV-B 辐射增强; 秸秆施用; 大豆; 土壤呼吸; 碳转化率; 温度敏感性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)07-1638-05

Influence of Enhanced UV-B Radiation and Straw Application on Soil Respiration in Soybean Field

HU Zheng-hua¹, LI Han-mao¹, YANG Yan-ping¹, CHEN Shu-tao¹, LI Cen-zi¹, SHEN Shuang-he²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Field experiment was carried out in 2008 in order to investigate the effects of enhanced UV-B radiation and straw application on soil respiration in soybean field. LI-8100 automated soil CO₂ flux system was used to measure soil respiration under 20% enhanced UV-B radiation, straw application, 20% enhanced UV-B radiation + straw application and control. Environmental factors such as air temperature, soil temperature and moisture were also measured. Results indicated that supplemental UV-B radiation reduced soil respiration rate by 30.31%, straw application increased soil respiration rate by 14.51%, while enhanced UV-B radiation + straw application combined treatment had no significant effect on soil respiration. Enhanced UV-B radiation enhanced the carbon conversion rate of straw. Significant relationship were found between soil respiration rate and soil temperature under the control, enhanced UV-B, straw application, and enhanced UV-B + straw application, the fitting equation determined coefficients R^2 were 0.434, 0.563, 0.451 and 0.513. The Q_{10} (temperature sensitivity coefficients) for soil respiration were 1.55, 1.91, 1.80 and 1.71, respectively. It was reflected that enhanced UV-B radiation, straw application and enhanced UV-B radiation + straw returning increased the Q_{10} for soil respiration.

Key words: enhanced UV-B radiation; straw application; soybean; soil respiration; carbon conversion rate; temperature sensitivity

温室效应引起的气候变暖是重要的全球性环境问题,其主要原因是大气中温室气体(CO₂、CH₄和N₂O等)浓度的不断增加,其中CO₂是最重要的温室气体,在大气中的浓度已由工业革命前的280 × 10⁻⁶上升到379 × 10⁻⁶^[1]。因氟氯烷烃(CFCs)和氮氧化物(N_xO)的大量排放,平流层臭氧层正不断变薄,使得到达地表紫外线B辐射(UV-B, 280 ~ 320 nm)强度增加^[2]。Taalas等^[3]认为北半球在2010 ~ 2020年间UV-B辐射强度将增加14%左右,大量淘汰旧冰箱中CFCs的释放和温室气体N₂O的作用使得平流层臭氧的修复十分缓慢^[4,5],地表UV-B辐射强度在相当长一段时间内还将处于较高水平^[6]。

农田土壤碳库是全球碳库和陆地生态系统碳库的重要组成部分,农田土壤固碳在一系列固碳减排

措施中处于重要地位^[7]。农田碳排放通常包括土壤呼吸和作物的呼吸作用,土壤呼吸主要由根系呼吸、根际共生体的呼吸和土壤微生物呼吸3部分组成^[8]。农田管理措施影响土壤呼吸^[9]。秸秆施用是一种重要的农田有机质管理措施^[10,11],影响着农田土壤呼吸^[12~14],也是增加农田土壤碳库的有效措施^[15,16]。已有报道发现UV-B辐射增强能影响土壤呼吸^[17],但UV-B辐射增强对施用秸秆分解的影响如何则鲜见报道。

农田生态系统作为陆地生态系统的一个重要组

收稿日期:2009-08-27;修订日期:2009-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(40605029);中国博士后科学基金项目(20070420195)

作者简介:胡正华(1973~),男,博士,副教授,主要研究方向为陆地生态系统温室气体排放与全球变化, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

成部分,易受外界环境因子和人类活动的影响.为客观评价未来全球变化背景下农田土壤碳排放的清单,有必要对农田土壤呼吸动态进行深入研究.本研究通过对大豆田土壤呼吸速率的测定,分析了 UV-B 辐射增强和秸秆施用对农田土壤呼吸的影响,对全面评价农田土壤碳源/汇作用具有一定意义.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2008 年大豆生长季在南京信息工程大学生态与农业气象试验站(32.0°N,118.8°E)进行.土壤为潜育型水稻土,灰马肝土属,耕层土壤质地为壤质黏土,黏粒含量为 26.1%,土壤 pH(H₂O) 值为 6.2,有机碳、全氮的含量分别为 19.4 g·kg⁻¹、1.45 g·kg⁻¹.

1.2 试验设计

UV-B 处理设对照(自然光)和 UV-B 增强 20% 这 2 个水平;秸秆施用量为 225 g·m⁻². 共计 4 种处理:对照(CK,自然光和秸秆不还田)、UV-B 增强(U)、秸秆施用(S)、UV-B 增强+秸秆施用(U+S),每处理各 4 重复,计 16 个试验小区,每小区面积为 (3×4) m²,各小区之间有间隔,以防止物质交换.将 UV-B 灯管(40 W,峰值 313 nm,上海华德电光源厂)悬挂于作物上方,用于模拟 UV-B 辐射增强.所有试验小区均悬挂 6 根 UV-B 灯管,但 CK 和 S 小区的灯管包裹 Mylar 膜(厚度 125 μm,美国杜邦公司),以滤掉 320 nm 以下的波段,保证遮阴、UV-A 和 PAR 等环境条件相同.采用 UV-B 监测装置(SKU430,光谱范围 280~315 nm,Skype 公司,英国)和数字采集器(Skye-Datalog,Skype 公司,英国)自动记录 UV-B 强度.施用秸秆为前茬小麦秸秆,碳含量、全氮含量分别为 51.2% 和 0.9%,铡成约 2 cm 段,在播种前均匀撒于地表,全部翻埋.

大豆品种为八月白,2008-07-06 播种,株距 30 cm,行距 30 cm,7 月 9 日出苗.从大豆出苗开始进行 UV-B 辐射增强处理,直至大豆收获,每天辐照时间为 08:00~16:00.

1.3 土壤呼吸测定

采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统(LI-COR 公司,美国)对土壤呼吸速率进行自动观测,所测的土壤呼吸为土壤表观呼吸.大豆出苗后,在各小区随机选取 4 株相邻大豆植株,并在其对角线交叉点安装 PVC 测量圈.观测在 08:00~10:00 进行.

1.4 环境因子测定

用 LI-8100 的土壤温度探头测定土壤 10 cm 深处温度,土壤含水量采用烘干法测定^[18].

1.5 统计分析

采用回归分析法,数据分析利用 SPSS13.0 (SPSS Inc., Chicago, USA)、Office Excel 2003 等软件完成.

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸的变化

由图 1 可见,在整个大豆生育期,土壤呼吸速率与土壤温度的变化具有明显相关性,各处理的土壤呼吸速率变化趋势相似,UV-B 辐射增强与秸秆施用没有改变土壤呼吸的季节性变化规律.

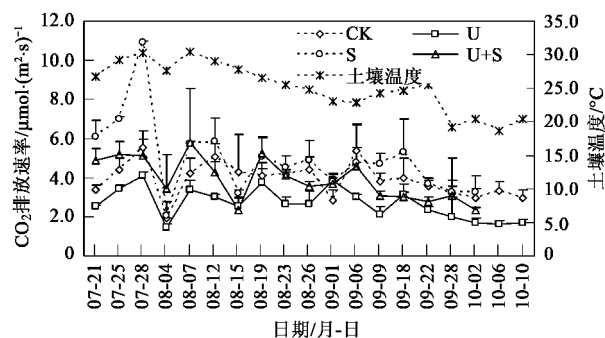


图 1 土壤呼吸速率与土壤温度

Fig. 1 Soil respiration rate and soil temperature

各处理的土壤平均呼吸速率如表 1 所示,与 CK 相比,UV-B 辐射增强(U)显著降低了土壤呼吸速率,降幅约为 30.31%;秸秆施用(S)提高了土壤呼吸速率,增幅为 14.51%;而 UV-B 增强与秸秆施用复合处理(U+S)对土壤呼吸速率没有显著影响.在整个大豆生育期,土壤 CO₂ 排放总量在 919.27~1319.06 g·m⁻²之间. UV-B 辐射增强显著降低了土壤 CO₂ 排放总量($p=0.002$);秸秆施用提高了土壤 CO₂ 排放总量($p=0.055$);而 UV-B 增强与秸秆施用复合处理对土壤 CO₂ 排放总量没有显著影响($p=0.193$).

表 1 土壤平均呼吸速率与 CO₂ 排放总量¹⁾

Table 1 Average soil respiration rate and cumulative CO₂ emission

处理	平均呼吸速率 /μmol·(m ² ·s) ⁻¹	CO ₂ 排放总量 /g·m ⁻²
CK	3.86 ± 0.42 ^a	1319.06 ± 142.29 ^a
U	2.69 ± 0.25 ^b	919.27 ± 86.18 ^b
S	4.42 ± 0.35 ^c	1512.70 ± 86.18 ^c
U+S	3.50 ± 0.15 ^a	1196.36 ± 49.93 ^a

1) 数据后不相同字母的表示处理间差异性显著($p < 0.05$)

2.2 UV-B 辐射增强对秸秆碳转化率的影响

根据 4 种水平处理的 CO₂ 排放总量(表 1)和单位面积施用秸秆的含碳量,可以计算出秸秆的碳转化率.在无 UV-B 增强处理条件下(S 与 CK,碳转化率是 45.84%;在有 UV-B 增强处理条件下(U + S 与 U),碳转化率为 65.60%.可见,UV-B 增强提高了施用秸秆的碳转化率. UV-B 增强对 CO₂ 排放的抑制效应(U - CK,以 CO₂ 计)是 -399.79 g · m⁻²,而秸秆还田条件下,UV-B 增强对 CO₂ 排放的抑制效应[(U + S) - S,以 CO₂ 计]是 -316.34 g · m⁻².可见,在有秸秆施用条件下,UV-B 对 CO₂ 排放的抑制效应降低.

2.3 土壤呼吸的温度敏感性(Q₁₀)

将土壤呼吸速率与土壤温度进行回归分析(图 2),可见土壤温度与土壤呼吸速率间存在极显著的指数关系($p < 0.01$). CK、U、S 和 U + S 的拟合方程的可决系数 R^2 分别为 0.434、0.563、0.451 和 0.513,根据指数方程计算得到的温度敏感系数 Q_{10} 值(温度每增加 10℃ 呼吸速率变为初始值的倍数)分别为 1.55、1.91、1.80、1.71,UV-B 增强和秸秆施用的单一和复合处理均在一定程度上提高了土壤呼吸的 Q_{10} 值.表明 UV-B 增强虽降低了土壤呼吸但增加了其对温度的敏感性.在 UV-B 增强、秸秆施用条件下,大豆田土壤呼吸对温度增加的响应更加明显.

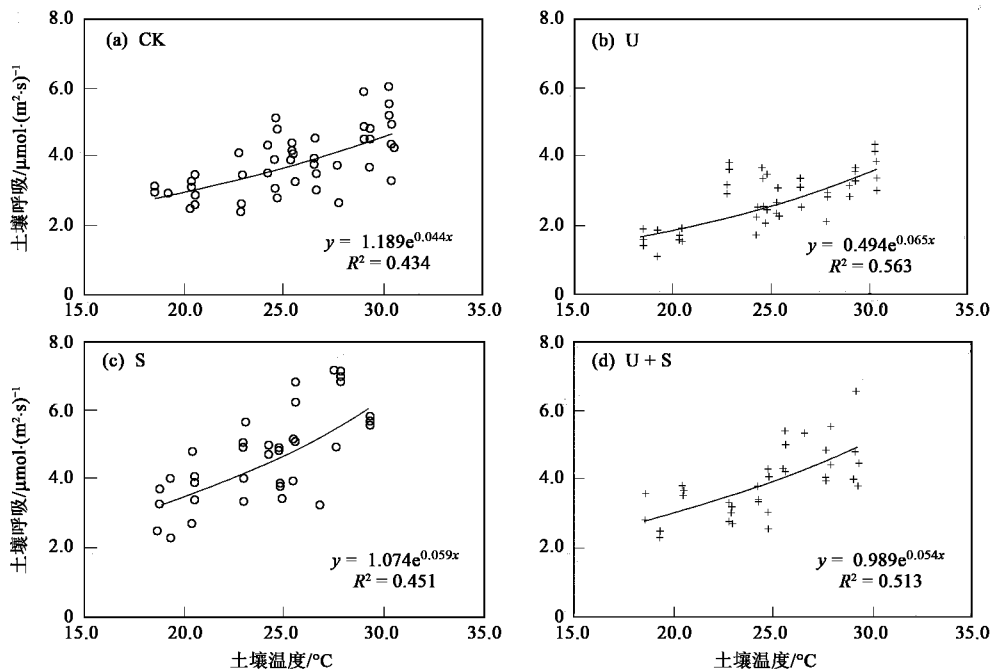


图 2 土壤呼吸与土温的关系
Fig.2 Relationship between soil respiration and soil temperature

2.4 大豆生物量

各处理的大豆生物量见表 2. 无秸秆施用,UV-B 增强显著降低了生物量,地上、地下和总生物量分别降低了 68.29% ($p = 0.011$)、73.91% ($p = 0.003$)和 73.61% ($p = 0.003$). 秸秆施用显著增加了生物量,S 处理的地上、地下和总生物量分别增加了 87.80% ($p = 0.002$)、60.49% ($p = 0.011$)和 61.98% ($p = 0.009$). S + U 处理也增加了生物量,地上、地下和总生物量分别增加了 69.69% ($p = 0.01$)、82.37% ($p = 0.001$)和 81.72% ($p = 0.001$). S + U 与 S 的生物量没有显著差异,说明在秸秆施用条件下,UV-B 增强对生物量的负效应不

明显,施用秸秆后,UV-B 的抑制效应有遮蔽或削弱的趋势.

表 2 UV-B 增强与秸秆施用对大豆收获生物量的影响¹⁾

Table 2 Effect of enhanced UV-B radiation and straw addition on dry matter yield of soybean			
处理	生物量/g · 株 ⁻¹		
	地下部分	地上部分	总生物量
CK	2.87 ± 0.16 ^a	50.64 ± 2.46 ^a	53.50 ± 2.31 ^a
U	0.91 ± 0.10 ^b	13.21 ± 1.17 ^b	14.12 ± 1.26 ^b
S	5.39 ± 0.86 ^c	81.27 ± 12.80 ^c	86.66 ± 13.63 ^c
U + S	4.87 ± 0.70 ^c	92.35 ± 6.63 ^c	97.22 ± 7.18 ^c

1) 表中数据为平均值 ± 标准误差;同列不同上标字母表示处理间差异性显著($p < 0.05$)

3 讨论

3.1 UV-B 增强与秸秆施用对土壤呼吸的影响

本研究发现,UV-B 辐射增强显著降低了大豆田土壤呼吸.其主要原因可能是 UV-B 辐射增强对植物生长的直接效应,抑制大豆的光合作用,限制根生长及干物质的积累^[19],从而降低了大豆根呼吸,而大豆田土壤根起源呼吸能占土壤呼吸的 50%^[20].由于 UV-B 辐射对土壤的穿透能力很弱,根际微生物不能直接受到 UV-B 辐射,因此,它对 UV-B 辐射是间接响应:UV-B 辐射可能通过大豆的生长和生理代谢^[19],引起土壤营养成分的变化^[21],间接影响根际微生物数量,使得土壤中微生物呼吸排放速率和排放量的减少. UV-B 辐射增强通过抑制大豆根呼吸和土壤微生物呼吸,从而造成土壤呼吸降低.

秸秆施用促进了农田土壤呼吸,其原因可能是秸秆施用后,增加了土壤中 Glomalin 和有机质含量^[10],促进了土壤碳的矿化作用^[13,22],增加易被微生物分解和利用的轻组分有机碳和轻组分有机氮^[23],并提高了土壤中微生物数量^[24],从而增加了土壤碳交换量.研究认为分配到根的碳有 70% 用来呼吸,只有 30% 用来生长^[25],秸秆施用能显著提高作物的根冠比^[26],从而提高了根呼吸量.土壤呼吸增加是根呼吸和微生物呼吸共同提高的结果.

UV-B 增强与秸秆施用复合处理对土壤呼吸的作用要小于 UV-B 增强的抑制效应或秸秆施用的促进效应,秸秆施用能有效缓释 UV-B 增强对土壤呼吸的抑制效应.其原因可能与秸秆施用促进大豆生长有关,本试验发现(表 2),施用秸秆可以有效地缓解甚至消除 UV-B 对大豆生长的伤害.表现在施用秸秆条件下,UV-B 处理对大豆生物量没有抑制作用.但在不施用秸秆条件下,UV-B 增强显著降低了大豆的地上、地下和总生物量.

3.2 UV-B 增强与秸秆施用对 Q_{10} 的影响

土壤呼吸温度敏感系数(Q_{10})是表征呼吸作用的重要指标,对了解未来气候变暖条件下生态系统中的碳排放通量变异规律具有一定的参考意义. Q_{10} 与温度、有机质含量、微生物数量、土壤有效可利用底物^[27]、植株的 LAI^[28]以及其他环境因素季节性波动^[29]有关. UV-B 辐射增强能提高土壤呼吸的 Q_{10} 值,这与本课题组之前试验结果一致^[17].其可能原因是:① UV-B 辐射增强降低植物的光合作用、抑制根的生长及干物质的积累^[19]等,进而影响到 Q_{10} 值.

② UV-B 辐射增强通过影响作物生长而间接导致一些无性系细菌数量、真菌数量或放线菌数量上升^[30],如果这些无性系微生物对温度响应比较敏感,则可能造成导致 Q_{10} 值也相应增大. ③ 研究认为 UV-B 辐射增强能提高土壤中微生物生物量碳和氮^[31],这可能导致土壤呼吸在温度升高时对碳、氮营养源的分解能力加强,进而影响到 Q_{10} . 秸秆施用也能提高 Q_{10} 值,其可能原因是:① 作物秸秆是重要的有机肥源之一,可增加土壤有机质含量,改善土壤物理性质^[32],进而影响到 Q_{10} 值. ② 秸秆施用能提高土壤微生物量^[22]、土壤细菌群落分子多态性的丰富度^[13,33]以及土壤微生物的活性^[34].微生物数量和活性的提高,对土壤呼吸的贡献增大,如果对温度敏感的微生物数量所占比例上升,则可能导致 Q_{10} 值也相应增大. ③ 秸秆施用提高土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶的活性^[34],加速了土壤碳氮循环速率,从而提高 Q_{10} 值.

UV-B 辐射增强和秸秆施用作用提高了土壤呼吸的 Q_{10} ,将使土壤呼吸的温度敏感性增加,在全球变暖背景下,农田土壤的 CO_2 排放量增加,会使农田土壤的有机碳贮量减少.

4 结论

(1) UV-B 辐射增强与秸秆施用都没有改变大豆田土壤呼吸的季节性变化规律. UV-B 辐射增强显著降低了土壤呼吸速率,秸秆施用显著提高了土壤呼吸速率,而 UV-B 增强与秸秆施用的复合处理对土壤呼吸没有明显影响.

(2) UV-B 增强提高了秸秆的碳转化率,在秸秆施用条件下,UV-B 对 CO_2 排放的抑制效应降低.

(3) UV-B 辐射增强、秸秆施用的单一处理和复合处理都增大了大豆田土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10}).

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Rozema J, Boelen P, Blokker P. Depletion of stratospheric ozone over the Antarctic and Arctic: Responses of plants of polar terrestrial ecosystems to enhanced UV-B, an overview[J]. Environ Pollut, 2005, 137: 428-442.
- [3] Taalas P, Kaurola J. The impact of greenhouse gases and halogenated species on future solar UV radiation doses[J]. Geophys Res Lett, 2000, 27(8): 1127-1130.

- [4] Weatherhead E C, Reinsel G C, Tiao G C, *et al.* Detecting the recovery of total column ozone[J]. *J Geophys Res*, 2000, **105**: 22201-22210.
- [5] 叶林顺, 汤心虎. 冰箱 CFCs 及其替代物的温室效应比较[J]. *环境科学与技术*, 2001, **96**(4): 17-20.
- [6] McKenzie R L, Aucamp P J, Bais A F, *et al.* Changes in biologically-active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface[J]. *Photochem Photobiol Sci*, 2007, **6**: 218-231.
- [7] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context[J]. *Eur J Agron*, 2004, **20**: 229-236.
- [8] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**: 425-448.
- [9] Ding W, Meng L, Yin Y, *et al.* CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, **39**: 669-679.
- [10] Nie J, Zhou J M, Wang H Y, *et al.* Effect of long-term rice straw return on soil glomalin, carbon and nitrogen [J]. *Pedosphere*, 2007, **17**(3): 295-302.
- [11] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, *et al.* Effect of long-term application of K fertilizer and wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems[J]. *Agric Sci China*, 2007, **6**(2): 200-207.
- [12] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2005, **25**(1): 2883-2887.
- [13] Duong T T T, Baumann K, Marschner P. Frequent addition of wheat straw residues to soil enhances carbon mineralization rate [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41**: 1475-1482.
- [14] Iqbal J, Hu R G, Li S. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2009, **131**: 292-302.
- [15] Freibauer A, Rounsevell M D A, Smith P, *et al.* Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. *Geoderma*, 2004, **122**: 1-23.
- [16] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 612-619.
- [17] 陈书涛, 胡正华, 李涵茂, 等. 紫外 (UV-B) 辐射增强对拔节-孕穗期小麦植株呼吸和土壤呼吸的温度敏感性的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1249-1254.
- [18] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [19] Pal M, Zaidi P H, Voleti S R, *et al.* Solar UV-B exclusion effects on growth and photosynthetic characteristics of wheat and pea [J]. *J New Seeds*, 2006, **8**: 19-34.
- [20] 刘巧辉, 黄耀, 郑循华. 基于 BaPS 系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(8): 1105-1111.
- [21] 强维亚, 陈栢, 汤红官, 等. Cd 胁迫和增强 UV-B 辐射对大豆根系分泌物的影响[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(3): 293-298.
- [22] Jacinthe P, Lal R, Kimble J M. Effects of wheat residue fertilization on accumulation and biochemical attributes of organic carbon in a central Ohio Luvisol[J]. *Soil Sci*, 2002, **167**(11): 750-758.
- [23] Malhi S S, Lemke R. Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle[J]. *Soil Till Research*, 2007, **96**(1-2): 269-283.
- [24] Tu C, Ristaino J B, Hu S J. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: Effects of organic inputs and straw mulching[J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, **38**: 247-255.
- [25] Höglberg P, Nordgren A, Ågren G I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest[J]. *Oecologia*, 2002, **132**: 579-581.
- [26] 李凤博, 牛永志, 高文玲, 等. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(3): 549-552.
- [27] Davidson E, Janssens I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, **440**: 165-173.
- [28] Curiel Y J, Janssens I A, Carrara A, *et al.* Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity[J]. *Glob Change Biol*, 2004, **10**(2): 161-169.
- [29] Davidson E C 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 [J]. *Glob Change Biol*, 1998, **4**(2): 217-227.
- [30] 祖艳群, 魏兰芳, 杨济龙, 等. 紫外辐射增加对 40 个割手密无性系土壤微生物种群数量动态和多样性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(1): 6-11.
- [31] 蒋静艳, 牛传坡, 胡正华, 等. 地表 UV-B 辐射增强对土壤-冬小麦系统 N₂O 排放的影响机理研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1712-1716.
- [32] 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(5): 539-542.
- [33] 卜元卿, 黄为一. 稻秸对土壤细菌群落分子多态性的影响[J]. *土壤学报*, 2005, **42**: 270-277.
- [34] 肖嫩群, 张杨珠, 谭周进, 等. 稻草还田翻耕对水稻土微生物及酶的影响研究[J]. *世界科技研究与发展*, 2008, **30**(2): 192-194.