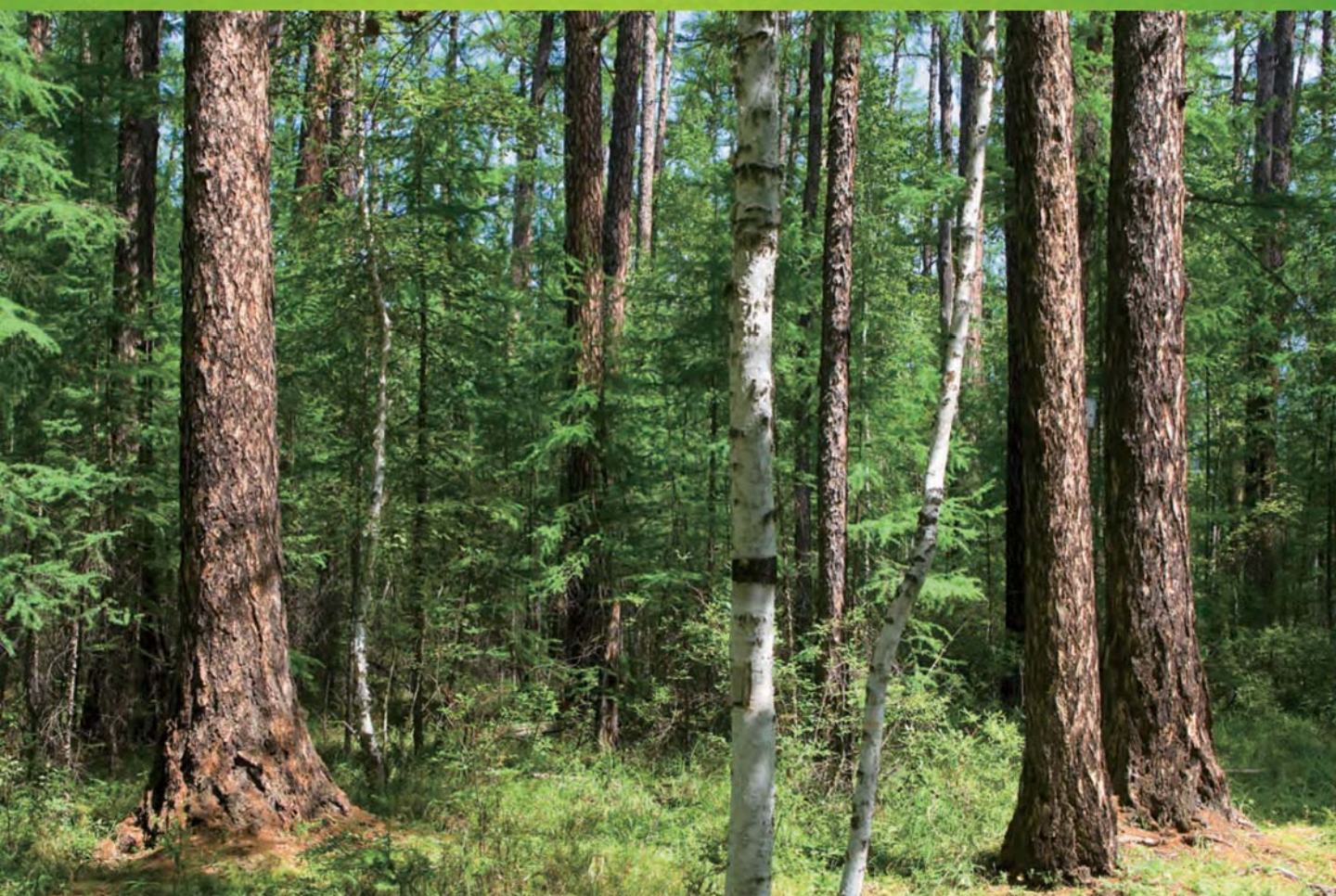


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第23期 Vol.33 No.23 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201204140536

周小平,王效科,张红星,庞军柱,任玉芬,侯培强,刘文兆.黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化.生态学报,2013,33(23):7525-7536.

Zhou X P, Wang X K, Zhang H X, Pang J Z, Ren Y F, Hou P Q, Liu W Z. Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7525-7536.

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化

周小平^{1,2}, 王效科¹, 张红星^{1,*}, 庞军柱³, 任玉芬¹, 侯培强¹, 刘文兆³

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态重点实验室, 北京 100085;

2. 青海省环境科学研究设计院, 西宁 810007; 3. 西北农林科技大学林学院, 杨陵 712100)

摘要:采用自行开发的全自动多通道通量箱法对黄土高原小麦田土壤呼吸变化特征进行了连年原位监测,在此基础上,采用斜率同质性模型(homogeneity-of-slop model, HOS 模型)对农田土壤呼吸季节和年际变化的成因进行了解析。结果表明,在日尺度上,土壤呼吸主要受土壤温度的影响,呈现出明显的单峰变化趋势,在 12:00 左右达最大值。季节尺度上,土壤呼吸冬季较低,春季上升,7 月下旬达最大值,之后下降,土壤呼吸季节变化主要受土壤温度和湿度的影响。土壤呼吸年际间变化较大,其变化幅度为 815.72—980.12 g C·m⁻²·a⁻¹。土壤温度是引起土壤呼吸年际变化最重要的因素,逐步回归分析表明,土壤温度和土壤含水量均与土壤呼吸呈显著的正相关,可以用 $R_{\text{soil}} = 1.761 + 0.119T_{\text{soil}} - 1.30\text{SWC}$, ($R^2 = 0.48$, $P < 0.0001$) 来描述土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的关系。降水量与土壤呼吸没有显著的相关关系。用 HOS 模型对土壤呼吸年际变化的成因进行分析的结果表明,功能变化(FC)、环境因子季节变化、环境因子年际变化以及随机误差分别可以解释年际变化的 10.6%、58.4%、4.5% 和 26.5%,功能变化对土壤呼吸年际变化的影响要大于土壤温度年际变化的影响。因此,在土壤呼吸的预测中,不能仅仅依靠环境因子的变化来预测土壤呼吸的变化,还必须考虑到功能变化对土壤呼吸的影响。

关键词:土壤呼吸; 年际变化; 功能变化; 农田; 斜率同质性模型

Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China

ZHOU Xiaoping^{1,2}, WANG Xiaoke¹, ZHANG Hongxing^{1,*}, PANG Junzhu³, REN Yufen¹, HOU Peiqiang¹, LIU Wenzhao³

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Qinghai Academy of Environmental Science, Xining 810007, China

3 College of forest, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: The interannual variability (IAV) in soil respiration (R_{soil}) is crucial for learning the carbon budget in the global climate change, the factors and the processes controlling the soil respiration. Variability in climate factors may directly control changes in the R_{soil} , but also may indirectly control the R_{soil} by “function change” by changing the biological and ecological processes. We measured the soil respiration and climate factors (air temperature, soil temperature, soil water content and precipitation) on the winter wheat farmland in the Loess Plateau, China, for four growing seasons. The homogeneity-of-slope model (HOS model) was used to distinguish direct effect of IAV in soil respiration and the function change. The results indicated that the soil respiration had a very significant diurnal, seasonal and interannual variability. The diurnal variability was controlled by the soil temperature, reached the peak at 13:00—16:00. The stepwise regress

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA05050602, XDA05060102); 国家自然科学基金资助项目(71003092)

收稿日期:2012-04-14; **修订日期:**2013-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhx973@rcees.ac.cn

analysis indicated that the seasonal variability in soil respiration was controlled by the soil temperature (T_{soil} , ranged from -3.8°C to 30.7°C) and soil water content (SWC, ranged from 1.5% to 50.3%), both of them showed positive relationships with soil respiration that could be described by the function: $R_{\text{soil}} = 1.761 + 0.119T_{\text{soil}} - 1.30\text{SWC}$, ($R^2 = 0.48$, $P < 0.0001$). The precipitation had no significant relationship with R_{soil} . The mean annual R_{soil} ranged from $815.72 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $980.12 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The interannual variability of R_{soil} was controlled by the soil temperature. The results of HOS model analysis indicated that function change, interannual climatic variability, seasonal climatic variability and random error explained 10.6%、4.5%、58.4%、and 26.5%, respectively, of the observed variation in soil respiration. Function change account for more than twice the variance in soil respiration of interannual climatic variability, it suggests that the soil respiration in the future can not be predicted from the climatic variability alone, the function change must be considered into mechanistic models.

Key Words: soil respiration; interannual variability; Homogeneity-of-slope model; climatic variability; function change

过去 100 年间,地球表面的温度增加了 0.6°C , 预计到下个世纪,气温将会增加 $1.4\text{—}5.8^{\circ}\text{C}$, 甚至更多^[1]。空气中 CO_2 浓度在很大程度上控制着全球气候变化^[1], 土壤作为仅次于海洋的全球第二大有机碳库, 其碳存储量为 $1300\text{—}2000 \text{ Pg C}$ ^[2], 是陆地植被碳库的 2—3 倍, 是大气碳库的 2 倍多^[3]。土壤呼吸是生态系统 CO_2 交换的重要组成部分^[4-5], 是土壤碳输出的主要途径, 每年约有 $50\text{—}75 \text{ Pg C}$ 通过土壤呼吸排放到大气中, 约占全球总排放的 5%—25%, 土壤呼吸的变化可能会导致大气 CO_2 浓度的较大改变, 进而影响全球气候变化^[6]。因此, 土壤呼吸作为碳循环的核心问题而引起了国内外的极大关注和广泛研究^[6-8]。

土壤呼吸的季节变化和年际变化主要受环境因素和植物生长的影响。研究土壤呼吸的季节变化和年际变化以及调控因素, 是准确预测未来气候变化条件下土壤呼吸变化的关键。许多研究表明, 土壤温度是决定土壤呼吸季节变化和年际变化的最重要因素^[9-11], 温度升高会加速有机碳的分解, 进而促进土壤呼吸的增加^[12-16]。很多模型都是基于土壤温度与土壤呼吸之间的指数关系来模拟土壤呼吸, 但也有很多研究的结果有所不同。Grace 和 Rayment 指出短期的增温实验可能提高土壤呼吸, 但是这个结果并不能代表温度长期升高情况下土壤呼吸的变化趋势^[17]。Giardina 和 Ryan 研究表明, 仅仅增加土壤温度并不能刺激森林土壤的 C 的降解^[18]。也有很多研究表明, 土壤呼吸的季节变化和年际变化由土壤温度和土壤水分共同调控^[19-25]。但 Epron 等研究表明, 与土壤温度相比, 土壤水分对土壤呼吸季节变化的影响更为重要^[1]。

以往对土壤呼吸的年际变化主要通过年平均^[26]、变异系数^[27]和变化范围等来表示。但为提高全球碳循环预测的准确性, 仅仅研究土壤呼吸年际变化是不够的, 还需要对土壤呼吸年际变化的成因进行分析。Hui 等^[28]用斜率同质性模型将土壤呼吸年际变化的成因分为 4 种: (1) 气候因子年际变化对土壤呼吸的直接影响; (2) 气候因子季节变化对土壤呼吸的直接影响; (3) 气候因子通过影响生物生态过程而间接对土壤呼吸的调控 (FC); (4) 随机误差。Hui 对森林生态系统呼吸年际变化的分析表明, 功能变化对土壤呼吸的影响要大于环境因子年际变化对土壤呼吸年际变化的直接影响^[28]。

农田是我国最重要的生态系统之一, 我国农田生态系统土壤呼吸连续多年原位监测的研究较少, 缺少对农田生态系统土壤呼吸年际变化及其成因的分析。因此, 本研究对黄土高原小麦田生态系统 CO_2 交换进行了 4a 的连续观测, 分析了土壤呼吸的日变化、季节变化和年际变化特征, 分析了主要环境因子 (土壤温度、空气温度、土壤湿度、降水量) 对土壤呼吸的影响, 并对土壤呼吸年际变化的成因进行了分解, 旨在为准确预测未来气候变化下的土壤呼吸变化提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究场地布设于中国科学院长武农业生态试验站, 该站位于黄土高原中南部的陕西甘肃交界处, 长武

县东王村(北纬 35°12',东经 107°40'),海拔 1200 m,地下水位 60 m 以下。该地区农业生产全部依靠自然降水,属典型的旱作农业区,作物为一年一熟,主要有冬小麦(*Triticum aestivum* L.)、春玉米(*Zea mays* L.)、糜子(*Panicum miliaceum* L.)等。该地区属暖温带半湿润大陆型季风气候,1957—2009 年年平均降水量为 580.5 mm,其中休闲期降水量占年降水量的 54%,降水分布不均,年际间差异大,干旱频繁。年均气温 9.1℃,无霜期 171d。土壤属黑垆土,土壤有机质含量约 3%,pH 值为 8.4,粘粒(<0.002 mm)含量为 24%,土质均匀疏松。

1.2 研究材料及管理方法

供试冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为长旱 58,是黄土高原典型的小麦品种。冬小麦 9 月中旬播种,翌年 4 月中旬人工锄草,6 月中旬用联合收割机收获。播种时同时施肥,施肥品种主要为尿素和磷肥,施肥标准为:尿素(含氮量为 46%)300 kg/hm²,过磷酸钙 750 kg/hm²。本研究区为雨养农业区,无灌溉措施。小麦收获后机械翻耕,深度为 30 cm。

本研究时间范围为 2005 年 7 月 1 日—2009 年 6 月 30 日,经历 4 个小麦生长期。在年际变化研究时,每年的时间划分为:2005 年 7 月 1 日—2006 年 6 月 30 日(以下简称为 2005—2006 年),2006 年 7 月 1 日—2007 年 6 月 30 日(以下简称为 2006—2007 年),2007 年 7 月 1 日—2008 年 6 月 30 日(以下简称为 2007—2008 年),2008 年 7 月 1 日—2009 年 6 月 30 日(以下简称为 2008—2009 年)。在研究期间,小麦田管理措施见表 1。

表 1 黄土高原冬小麦管理措施

Table 1 Schedule of management activities in a winter wheat ecosystem in the Loess Plateau, China

管理措施 Management activity	2005—2006	2006—2007	2007—2008	2008—2009
翻地日期 Plough date	07-23	07-26	07-23	07-31
	09-05	09-13	09-13	09-13
种植日期 Sowing date	09-16	09-17	09-26	09-20
收获日期 Harvest date	06-16	06-17	06-18	06-19
肥料 Fertilizer 尿素 Urea/(kg N/hm ²)	138	138	138	138
	磷肥 Superphosphate/(kg P ₂ O/hm ²)	90	90	90
灌溉 Irrigation	No	No	No	No

1.3 CO₂通量的测定方法

本研究采用多通道通量箱法对 CO₂通量进行测定^[29]。多通道全自动通量箱系统由两个子系统组成:CO₂浓度分析和记录子系统及全自动通量箱子系统(图 1)。两个子系统都在一台可编程逻辑控制器(PLC, Programmable Logic Controller)控制下工作。全自动通量箱子系统由 8 个全自动通量箱和 1 台空气压缩机组成。全自动通量箱为长、宽、高均为 50 cm 的正方体,框架由铝合金制成。箱体四壁采用透明的亚克力板(透光率 98%),并通过双面密封胶条和铝合金框架粘接起来用螺钉固定。箱盖采用较厚的亚克力板(透光率 98%),与箱体间用不锈钢合页连接。为了防止箱盖热胀冷缩变形,箱盖外表面固定有高强度 U 型铝合金板。箱体与箱盖间镶有高密度密封条以提高气密性。箱盖中部位置和箱体的一侧中部位置之间固定一个适当长度的气缸。当气缸完全伸展时,箱盖完全打开,保持与外界很好的气体交换;当气缸回缩后,箱盖完全关闭,进行通量的测定。气缸往返动作由 PLC 控制的电磁阀控制,由空气压缩机的压缩空气驱动。在气缸缸体上固定着 1 个风扇,用于通量测定时进行箱内气体的混合。通量箱盖关闭时,风扇开始运转以充分搅拌通量箱中的气体。箱体的一侧靠上位置安装有出气管,对侧的靠下位置安装进气管,分别与 CO₂分析子系统相连。在通量箱的顶部接 1 根长 1.5 m 的塑料管(4 mm×6 mm)以平衡通量箱内外气压差。

CO₂浓度分析和记录子系统由红外 CO₂分析仪(LI-820, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska)、缓冲管、干燥器、过滤器、流量计、气泵、多通阀和数据采集器组成。气泵将通量箱中的气样抽出,并经过多通阀、缓冲管、干燥器、过滤器和流量计后,进入红外 CO₂分析仪,测定通量箱中的空气 CO₂浓度,分析后的气体经过另外一个多通阀流回通量箱。每个箱子测定时间为 3 min^[30],CO₂分析仪连接在数据采集器上(CR10, Campbell

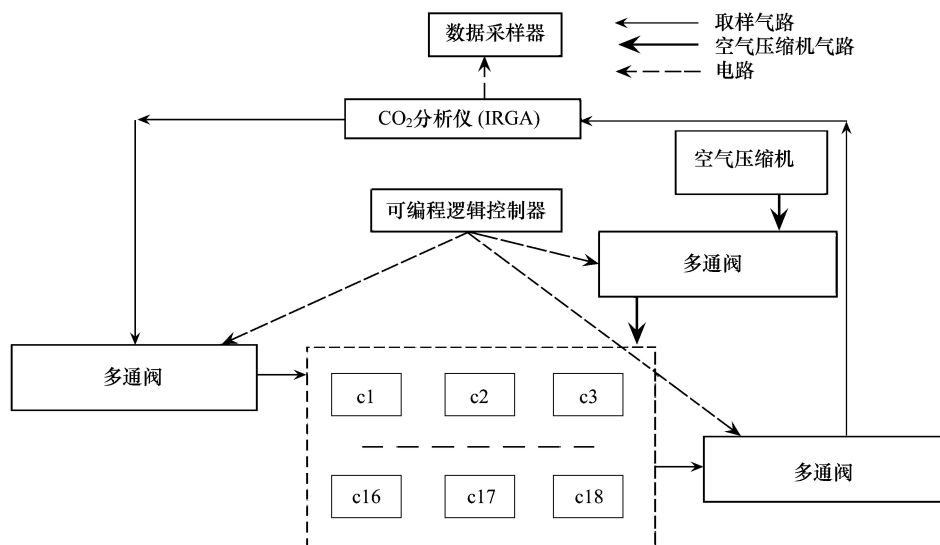


图1 多通道全自动通量箱系统结构示意图

Fig.1 Multi-channel automated chamber system

Scientific Inc., Logan, UT, USA)。数据采集器设定为每 10s 记录 1 次红外 CO₂分析仪的读数。

用透明通量箱系统来测定土壤 CO₂通量时,在小麦田行间放置通量箱,小麦出苗后,去除箱子内部的小麦,保证通量箱内没有小麦植株,箱体内部的气体交换仅为土壤呼吸。

本研究以通量箱为重复,共设 4 个重复。

1.4 环境因子的测定方法

降水量和大气压数据来源于中国科学院长武农业生态试验站气象站。土壤温度(5cm)和空气温度采用 T 型热电偶(T 型)测定;土壤水分采用 EC-H₂O 传感器测定(测定土壤水分分为 0—30cm 土壤的体积含水量),T 型热电偶和 EC-H₂O 传感器均连接在数据采集器 CR10x 上进行数据记录和保存。数据采集频率为 1 次/10min。

1.5 数据处理方法

1.5.1 原始数据分箱及 CO₂通量计算

将数据采集器里的数据下载到计算机中,用 C++语言编写计算机程序,将整块数据分到各对应的通量箱,然后转化为 Excel 形式,在此形式下,利用下式计算 CO₂通量:

$$A = \frac{dc}{dt} \frac{V}{S} \frac{P}{RT} \quad (1)$$

式中, A 是单位面积上单位时间内 CO₂释放量 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), c 是 CO₂摩尔浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$); t 是时间 (s); V 是通量箱体积 (m^3); S 是通量箱底面积 (m^2); P 是大气压 (kPa); R 是气体常数 ($8.3 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T 是通量箱内气体温度 (K)。方程(1)中 dc/dt 是通量箱中气体 CO₂浓度变化率,即为所测得的一组 CO₂浓度及其相应的时间回归所得直线方程的斜率。该直线方程的 $R^2 < 0.85$ 时,舍弃拟合所得的斜率值。

1.5.2 土壤呼吸 IAV 的成因分析

为研究引起土壤呼吸年际变化的因素,采用 HOS 模型对土壤呼吸年际变化的成因进行分析^[28]。将引起土壤呼吸年际变化的原因分为 4 种:(1)环境因子对土壤呼吸的间接影响(功能变化),(2)环境因子年际变化对土壤呼吸的直接影响,(3)环境因子季节变化对土壤呼吸的直接影响,(4)随机误差。

HOS 模型是一种基于回归分析的模型,该模型用来检验环境因子和年之间的交互作用对土壤呼吸的影响:

$$Y_{ij} = a + \sum_{k=1}^m b_k X_{ijk} + \sum_{k=1}^m b_{ik} X_{ijk} + e_{ij} \quad (2)$$

式中, Y_{ij} 表示土壤呼吸, i 表示第 i 年, $i=1, 2, \dots, y$ (本研究中, $y=4$); j 表示第 j 天, $j=1, 2, \dots, n$; Y_{ij} 表示第 i 年第 j 天的土壤呼吸, k 表示第 k 个因素, $k=1, 2, \dots, m$ (本研究中, $m=4$, 是土壤温度、空气温度、土壤湿度和降水量)。

其假设为:各环境因素与土壤呼吸的关系斜率在各年际间均相同。即不存在功能变化($b_{ik}=0$)。用 F 检验对每年使用不同的斜率与所有年使用相同的斜率相比较, 是否能显著提高方程(2)的拟合度。如果原假设 H_0 被接受, 则表明斜率的年际间差异并不显著, 认为功能变化不存在, 方程 2 可以简化为多元线性回归模型:

$$Y_{ij} = a + \sum_{k=1}^m b_k X_{ijk} + e_{ij} \quad (3)$$

如果原假设 H_0 被拒绝, 则表明斜率有显著的年际间差异, 认为功能变化存在, 方程 2 则被简化为多元线性回归模型:

$$Y_{ij} = a + \sum_{k=1}^m b_{ik} X_{ijk} + e_{ij} \quad (4)$$

由方程 3 和方程 4 模拟出来的因变量的差值即为功能变化。

通过用统计学的方法将因变量变异的平方和进行分解, 从而实现土壤呼吸年际变化的成因分解:

$$SS_T = SS_f + SS_{ic} + SS_{sc} + SS_e \quad (5)$$

式中, SS_T 为土壤呼吸的变异平方和, SS_f 为环境因素对土壤呼吸的间接影响(功能变化)所能解释的土壤呼吸的变异平方和, SS_{ic} 为由环境因素年际变化引起的因变量的变异平方和, SS_{sc} 为由环境因素的季节变化引起的因变量的变异平方和, SS_e 为由系统误差引起的因变量的变异平方和。通过对 SST 的分解, 从而得出不同成因对土壤呼吸年际变化的贡献率。如果 HOS 模型的检验结果表明 FC 并不显著, 则将土壤呼吸的变异分解为 3 部分, 环境因素的年际变化, 环境因素的季节变化, 以及随机误差。

用 SPSS 16.0 进行所有的统计分析。用 sigmaplot 10.0 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸和各环境因素的变化

2.1.1 土壤呼吸的日变化

除冬天外, 土壤呼吸日变化呈显著的单峰曲线(图 2)。土壤呼吸日变化的主要驱动因素是土壤温度的日变化。夜间(0:00—5:00)土壤温度的变化较大, 但土壤呼吸夜间的变化幅度较小。从 7:00 左右开始, 土壤呼吸随着土壤温度的增加而增加, 在 12:00 左右达到最大值, 不同季节土壤温度和土壤呼吸达到最大值的时间不同。冬季土壤温度在 0℃ 以下, 虽然土壤温度的变化幅度较大, 但土壤呼吸变化幅度很小。

2.1.2 土壤呼吸和各环境因素的季节变化

土壤温度、空气温度均表现出明显的季节变化, 由于季风型气候的影响, 降水量和土壤含水量也表现出明显的季节变化(图 3)。温度和湿度的季节变化趋势较为一致, 6 月份至 9 月份是全年中温度最高的季节, 也是降水量集中分布的季节, 占全年降水量的 60%。土壤含水量的季节变化趋势与降水量季节变化趋势一致。

各环境因子的年平均值年际间变化较大(表 2)。年平均空气温度的变化幅度为 11.0—9.5℃, 年平均土

表 2 每年土壤呼吸和环境因子年平均值

Table 2 Mean annual values of soil temperature, air temperature, precipitation and soil water content

变量 Variable	2005—2006	2006—2007	2007—2008	2008—2009
土壤呼吸 Soil respiration/(g C·m ⁻² ·a ⁻¹)	815.72	856.91	980.12	896.16
空气温度 Air temperature/℃	10.3	11.0	9.5	10.1
土壤温度 Soil temperature/℃	11.2	11.7	11.5	10.5
土壤含水量体积分数 Soil water content/%	28.01	19.62	22.01	20.87
降水量 Precipitation/mm	568.2	502.7	559.3	495.9

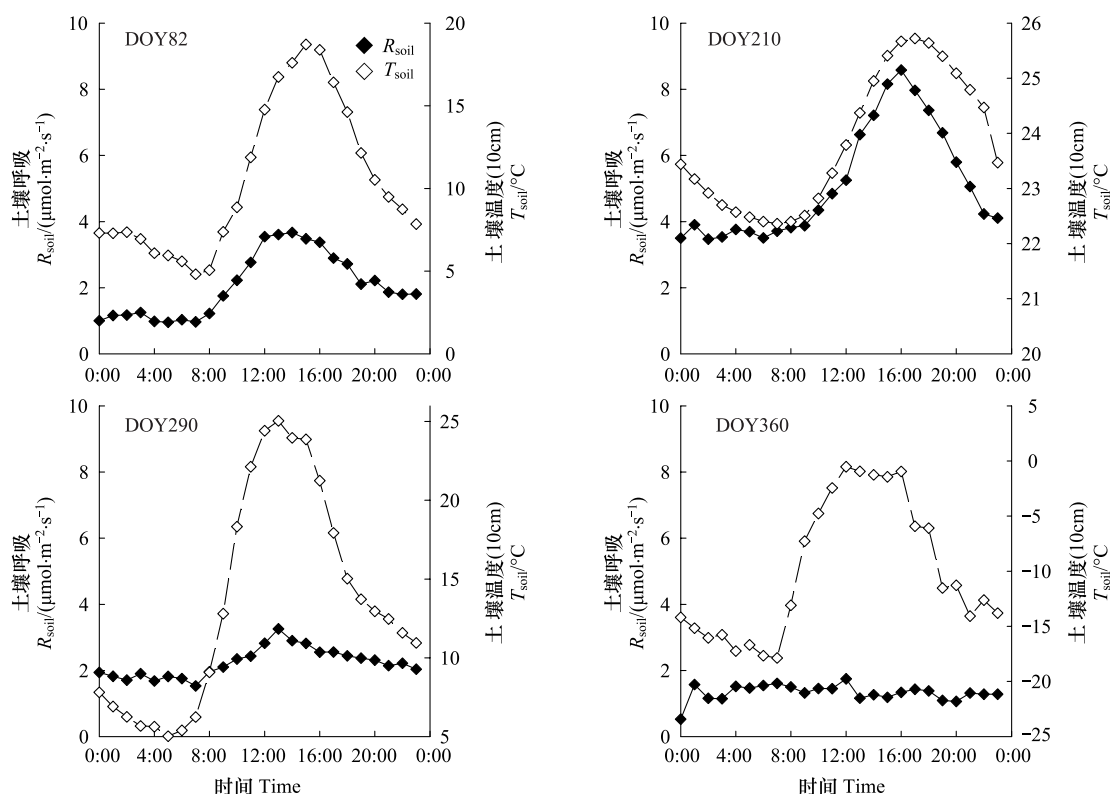


图2 土壤呼吸和土壤温度(10cm)的典型日变化

Fig.2 The diurnal variations of R_{soil} and T_{soil}

壤温度的变化幅度为 11.7—10.5℃, 年平均土壤湿度的变化幅度为 28.0%—19.2%, 年总降水量变化幅度为 568.3—495.9 mm。

土壤呼吸表现出明显的逐日变化和季节变化(图4)。土壤呼吸在冬季较低, 最小值大概为 $0.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 从冬季到7月下旬逐渐增加, 7月下旬达到最大值 ($17.92 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 土壤呼吸年际间变化较大(表2), 其变化幅度为 $815.72\text{—}980.12 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。土壤呼吸极大值出现在小麦收割后, 耕地导致了土壤呼吸的大量增加^[31]。

2.2 土壤呼吸与环境因子的关系

对土壤呼吸与环境因子的关系进行了回归分析(图5)。土壤温度、空气温度以及土壤湿度都对土壤呼吸有显著的影响 ($P < 0.0001$), 其中土壤温度对土壤呼吸的影响最大 ($r^2 = 0.40$), 土壤含水量与土壤呼吸之间有较弱的正相关关系 ($r^2 = 0.12$), 降水量与土壤呼吸之间的相关关系不显著。土壤温度和空气温度与土壤呼吸之间的关系也可以用指数关系来描述, 回归系数略高于线性回归。

多元逐步回归分析结果表明, 用土壤湿度和土壤温度可以很好的拟合土壤呼吸。逐步回归分析得到的最优拟合方程为: $R_{soil} = 1.761 + 0.119T_{soil} - 1.30SWC$, $R^2 = 0.48$ 。用通径分析对土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸的影响进行了分析, 土壤温度对土壤呼吸的通径系数为 0.73, SWC 对土壤呼吸通径系数为 0.07, 表明土壤温度对土壤呼吸的影响要大于土壤湿度的影响。尽管逐步回归模型可以很好的模拟土壤呼吸, 但仍然有很 52% 的土壤呼吸的变异是由于其他因素引起的(图6)。

2.3 土壤呼吸年际变化成因分析

土壤呼吸年际间变化较大, 其变化幅度为 $815.72\text{—}980.12 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2005—2006 年土壤呼吸最低 ($815.72 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 2007—2008 年土壤呼吸最高 ($980.12 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

逐步回归分析中, 土壤湿度和土壤水分都显著影响土壤呼吸。用 HOS 模型对 T_{soil} 和 SWC 对土壤呼吸年

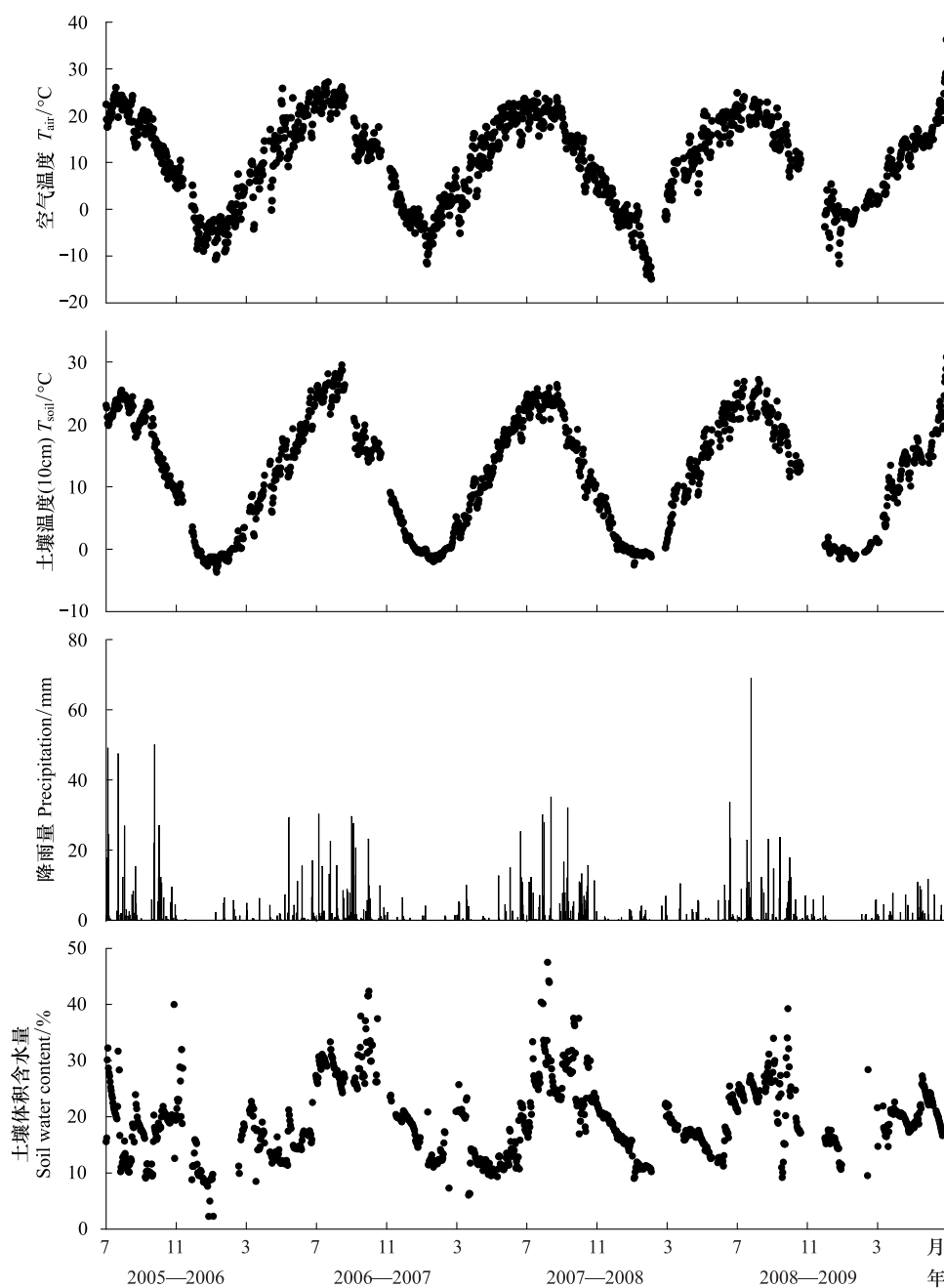


图3 环境因子的季节变化

Fig.3 Seasonal variations in climatic variables

际变化的影响进行分析。结果表明, T_{soil} 和 $T_{\text{soil}} \times \text{year}$ 显著影响土壤呼吸, 而 SWC 和 $\text{SWC} \times \text{year}$ 与土壤呼吸的关系不显著, 最终 HOS 模型中, T_{soil} 和 $T_{\text{soil}} \times \text{year}$ 两个变量进入了模型(表3)。表明 T_{soil} 对土壤呼吸的影响存在显著的年际间差异, FC 存在。用 4a 同一斜率的 $T_{\text{soil}} - R_{\text{soil}}$ 直线关系模拟的土壤呼吸的模拟结果和每年不同斜率 $T_{\text{soil}} - R_{\text{soil}}$ 直线关系模拟的土壤呼吸相比较发现, 每年不同斜率模拟提高了模拟效果, R^2 从 0.44 增加到 0.56 (图5)。平方和的分解结果表明, SS_f 、 SS_{ic} 、 SS_{sc} 和 SS_e 对土壤呼吸变异的贡献分别为 10.6%、4.5%、58.4%、和 26.5%。

3 讨论

在日尺度上, 土壤呼吸主要受温度变化的调控。分析发现, 用指数关系可以很好的描述土壤呼吸与土壤温度日变化的关系。以 2008 年 7 月份为例(图7, 每小时的土壤呼吸和土壤温度为 2008 年 7 月所有晴天该小

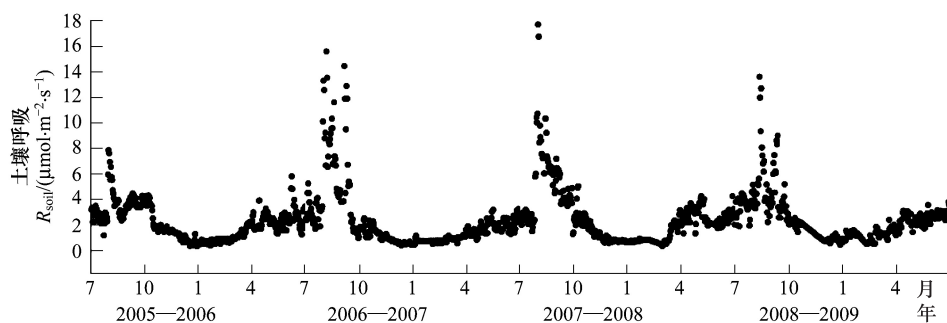


图4 土壤呼吸的季节变化

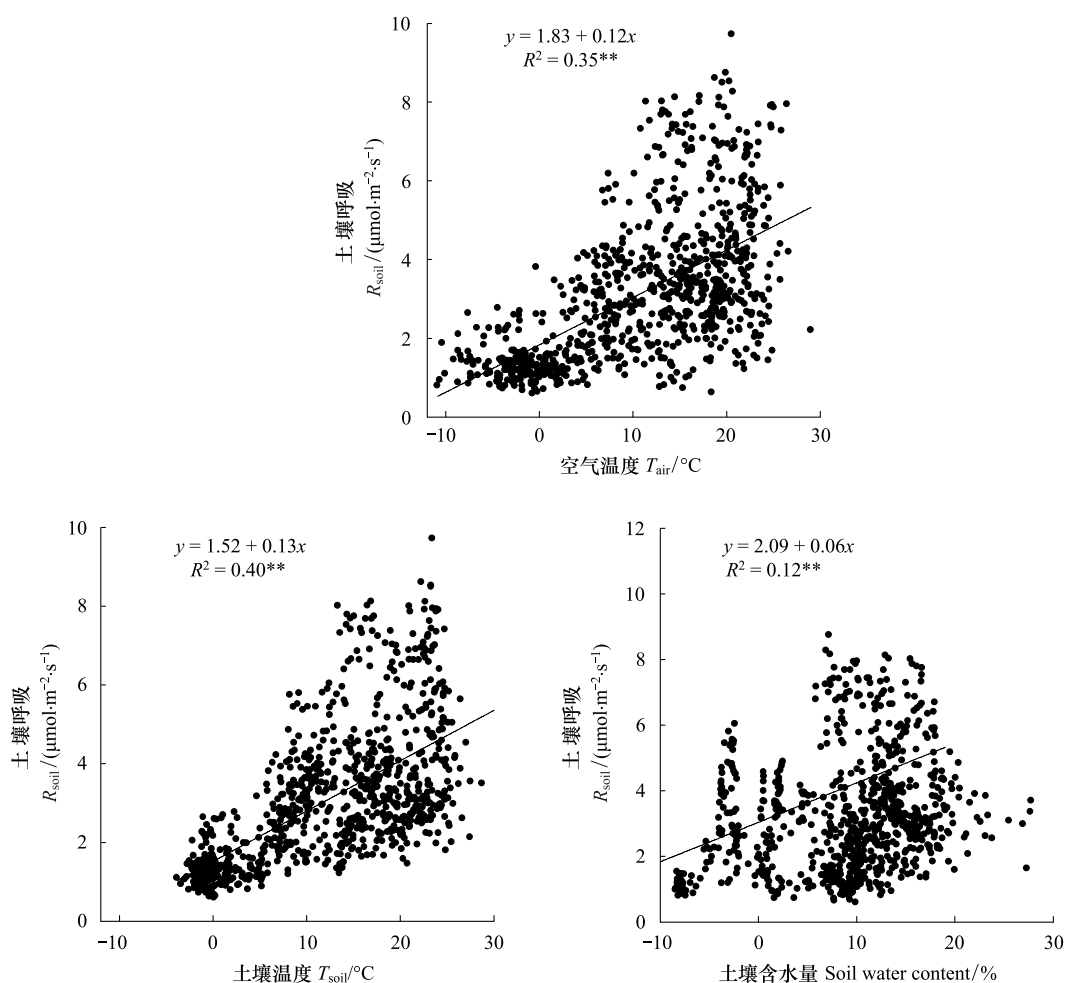
Fig.4 Seasonal variation of soil respiration(R_{soil})

图5 土壤呼吸与空气温度、土壤温度和土壤含水量的关系

Fig.5 Simple relationships between soil respiration (R_{soil}) and air temperature (T_{air}), soil temperature (T_{soil}) and soil water content

时值的平均值),用指数关系回归土壤温度和土壤呼吸,其 R^2 为0.84,但同一土壤温度下,上午土壤呼吸要高于下午(图7)。

韩广轩等指出,环境因子(水分、温度等)、作物生物学特性和农业管理活动是造成中国农田生态系统土壤呼吸作用时间变异的主要因素^[32]。土壤温度和土壤水分是土壤呼吸季节变化的最主要环境因子,但不同的生态系统中,研究结果有所不同。许多研究中,土壤呼吸的季节变化都是用土壤温度的变化来解释^[11-13],也有一些土壤呼吸季节变化是用土壤温度和土壤水分的共同变化来解释的^[14-19]。在热带森林中,土

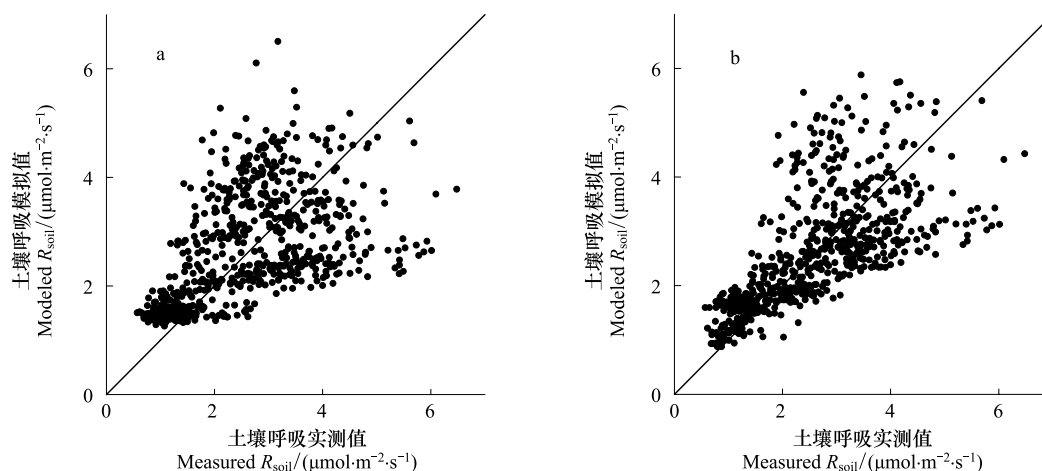


图 6 土壤呼吸的实测值与模拟值比较

Fig.6 Comparisons of model estimated by the multiple regression model

表 3 土壤呼吸的 HOS 模型的 ANOVA 结果

Table 3 An ANOVA of a homogeneity-of-slopes model of soil respiration (R_{soil})

变异源 Source	df	SS	MS	F	Sig.
斜率同质性模型 HOS Model	4	1137.223	284.306	203.715	0.000
年×土壤呼吸 year× T_{soil}	3	375.359	125.120	89.653	0.000
土壤呼吸 T_{soil}	1	825.000	825.000	591.142	0.000
误差 Error	786	1096.945	1.396		
总和 Total	791	9462.931			

模型的 $R^2 = 0.509$, 调整后的 $R^2 = 0.507$

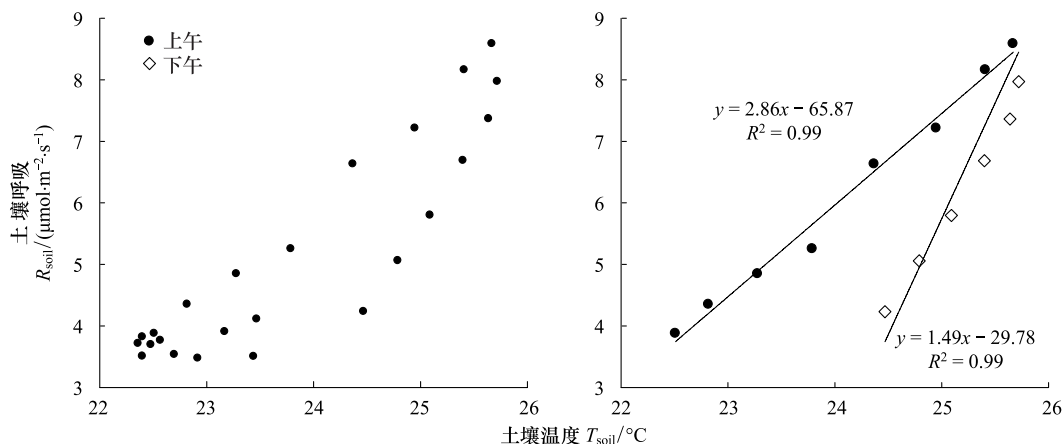


图 7 一天内土壤温度和土壤呼吸小时值的关系

Fig.7 Relationships between hourly soil respiration and soil temperature and the relationships that before and after peak point was described with different slopes

壤水分对土壤呼吸的季节变化的影响比土壤温度更大^[2,33]。本研究中,土壤温度的变化范围较大(33℃),土壤温度和土壤水分的季节变化是土壤呼吸季节变化的最重要原因,与土壤呼吸呈显著的正相关关系。土壤呼吸和土壤水分的关系通常用直线关系来描述^[24,26,34],本研究中,土壤水分和土壤呼吸的关系较弱。降水规律、年总降水量以及土壤结构等的差异可能是导致这种不同结果的原因^[33]。在土壤含水量较高或土壤粘度较大的地区,土壤水分和土壤呼吸之间可能是单峰的关系,在土壤水分低于限制值时以及土壤排水性好的地

区,因为厌氧抑制的情况极少可能发生,土壤呼吸随着土壤水分的增加而增加,土壤含水量与土壤水分之间可能会是指数或者直线关系^[33,35]。但当土壤水分含量高于限制值时,由于土壤处于厌氧条件而抑制了土壤呼吸^[23,25]。本研究区土壤含水量较低,因此采用直线关系来描述土壤呼吸和土壤含水量之间的关系。本研究中,土壤温度对土壤呼吸的影响要大于土壤水分,通径分析的结果表明,土壤温度对土壤呼吸的通径系数为 0.73,SWC 对土壤呼吸通径系数 0.06。指数关系对土壤呼吸和土壤温度的关系的描述要优于线性关系。

土壤呼吸年际变化是普遍存在的^[35],影响土壤呼吸年际变化的主要因素是环境因子。不同生态系统土壤呼吸年际变化的影响因子不同,Gaumont-Guay 等的研究结果表明,干旱对土壤呼吸年际变化的贡献大于土壤温度对土壤呼吸年际变化的贡献^[26]。本研究结果有所不同,在本研究中土壤温度是引起土壤呼吸年变量的最重要因素。环境因子对土壤呼吸的影响包括直接影响和间接影响。间接影响是指环境因子通过影响生物生态过程而对土壤呼吸的调控,即功能变化,比如,温度变化引起土壤微生物群落和微生物活性的变化^[36,37],进而影响到土壤呼吸的变化。功能变化的存在,使得每一年气候因子与土壤呼吸之间的关系有了很大的差异。很多研究发现了这一现象^[27]。Chen 的研究表明,土壤呼吸的对温度的敏感性年际间差异显著^[38]。HOS 模型为对土壤呼吸的年际变化的成因分析提供了一个有效的方法。本研究用 HOS 模型对土壤呼吸的年际变化成因进行分析发现,土壤含水量并不是引起本研究土壤呼吸年际变化的重要因子,功能变化、土壤温度季节变化、土壤温度年际变化以及随机误差分别可以解释年际变化的 10.6%、58.4%、4.5%、26.5%,功能变化的对土壤呼吸年际变化的影响要大于土壤温度的年际变化的影响,因此,在准确预测气候变化下土壤呼吸的变化,仅仅考虑到气候因子的变化是不够的,还要考虑到功能变化对土壤呼吸的影响。

4 结论

本研究通过对黄土高原小麦田土壤呼吸的长期观测,研究了土壤呼吸的季节变化和年变化及其影响因素。结果表明,土壤呼吸表现出显著的季节变化和年际变化。土壤呼吸的季节变化主要受土壤温度和土壤水分的调控,土壤温度和土壤含水量均与土壤呼吸呈正相关关系,土壤温度对土壤呼吸的影响要大于土壤含水量。控制土壤呼吸的年际变化的环境因子是土壤温度。土壤温度与土壤呼吸的关系年际间变化显著。环境因子年际变化对土壤呼吸的年际变化的间接影响要大于其直接影响。因此,在对未来气候变化下土壤呼吸进行预测时,我们应充分考虑到环境因子对土壤呼吸的直接影响,同时也必须考虑到环境因子通过影响生物和生态过程而对土壤呼吸的间接影响,不能通过短期的土壤呼吸与环境因子建立的模型对未来的土壤呼吸进行直接预测。本研究表明,未来对土壤呼吸的过程模型中要对土壤呼吸进行长期的预测时,为提高模型的准确性,必须在模型中充分考虑到功能变化的影响。

致谢:感谢中国科学院长武农业生态试验站和北京市城市生态试验站在本研究的试验过程中给予的支持与帮助。

References:

- [1] Houghton J T, Ding Y J, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change: 2001// Climate Change: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [2] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351 (6324): 304-306.
- [3] Bolin B, Degens E T. The global biogeochemical carbon cycle. *Geophysical Research Letters*, 2001, 8: 555-558.
- [4] Granier A, Ceschia E, Damesin C, Dufrene E, Epron D, Gross P, Lebaube S, Le-Dantec V, Le-Goff N, Lemoine D, Lucot E, Ottorini J M, Pontailler J Y, Saugier B. The carbon balance of a young beech forest. *Functional Ecology*, 2000, 14(3): 312-325.
- [5] Janssens I A, Lankreijer H, Metteucci G, Kowalski A S, Buchmann N, Epron D, Pilegaard K, Kutsch W, Longdoz B, Grunwald T, Montagnani L, Dore S, Rebmann C, Moors E J, Grelle A, Rannik Ü, Morgenstern K, Oltchev S, Clement R, Guðmundsson J, Minerbi S, Berbigier P, Ibrom A, Moncrieff J, Aubinet M, Bernhofer C, Jensen N O, Vesala T, Granier A, Schulze E D, Lindroth A, Dolman A J, Jarvis P G, Ceulemans R, Valentini R. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269-278.

- [6] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 117(5): 469-476.
- [7] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [8] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, 1997, 43(4): 449-528.
- [9] Anderson J M. Carbon dioxide evolution from two temperate, deciduous woodland soils. *The Journal of Applied Ecology*, 1973, 10(2): 361-375.
- [10] Edwards N T, Sollins P. Continuous measurement of carbon dioxide evolution from partitioned forest floor components. *Ecology*, 1975, 54(2): 406-412.
- [11] Longdoz B, Yernaux M, Aubinet M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, 2000, 6(8): 907-917.
- [12] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393(6682): 249-252.
- [13] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6): 753-760.
- [14] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, McKeown R, Ojima D S, Painter T H, Parton W J, Townsend A R. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(3): 279-293.
- [15] Trumbore S E, Chadwick O, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, 272(5260): 393-396.
- [16] VEMAPM Members. Vegetation/ecosystem modeling and analysis project: Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 407-437.
- [17] Grace J, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, 404(6780): 819-820.
- [18] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 2000, 404(6780): 858-861.
- [19] Garret H E, Cox G S. Carbon dioxide evolution from the floor of an oak-hickory forest. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37(4): 641-644.
- [20] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 115-146.
- [21] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 127-141.
- [22] Davidson E 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. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [23] Epron D, Farque L, Lucot É, Badot P M. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Annals of Forest Science*, 1999, 56(3): 221-226.
- [24] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO₂ efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada Mountains. *Plant and Soil*, 2001, 237(1): 15-23.
- [25] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, De Parri I, Jarvis P G, Valentini R. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology*, 2002, 8(9): 851-866.
- [26] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, Barr A G, Morgenstern K, Jassal R S, Nesic Z. Influence of temperature and drought on seasonal and interannual variations of soil, bole and ecosystem respiration in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 203-219.
- [27] Mo W H, Lee M S, Uchida M, Inatomi M, Saigusa N, Mariko S, Koizumi H. Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134(1/4): 81-94.
- [28] Hui D F, Luo Y Q, Katul G. Partitioning interannual variability in net ecosystem exchange between climatic variability and functional change. *Tree Physiology*, 2003, 23(7): 433-442.
- [29] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, Song W Z, Liu W Z, Ouyang Z Y. Multi-channel automated chamber system for continuously monitoring CO₂ exchange between agro-ecosystem or soil and the atmosphere. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1273-1282.
- [30] Drewitt G B, Black T A, Nesic Z, Humphreys E R, Jork E M, Swanson R, Ethier G J, Griffis T, Morgenstern K. Measuring forest floor CO₂ fluxes in a Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 110(4): 299-317.
- [31] Zhang H X, Zhou X P, Lu F, Pang J Z, Feng Z W, Liu W Z, Ouyang Z Y, Wang X K. Seasonal dynamics of soil CO₂ efflux in a conventional tilled wheat field of the Loess Plateau, China. *Ecology Research*, 2011, 26(4): 735-743.
- [32] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3):

719-733.

- [33] Kosugi Y, Mitani T, Itoh M, Noguchi S, Tani M, Matsuo N, Takanashi S, Ohkubo S, Rahim N A. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(1/2): 35-47.
- [34] Holt J A, Hodgen M J, Lamb D. Soil respiration in the seasonally dry tropics near townsville, north-Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, 1990, 28(5): 737-745.
- [35] Davidson E A, Verchot L V, Cattânio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [36] Andrews R T, Bromley P J, Pfister M E. Successful embolization of collaterals from the ovarian artery during uterine artery embolization for fibroids: a case report. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 2000, 11(5): 607-610.
- [37] Janssens I A, Pilegaard K I M. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911-918.
- [38] Chen B Y, Liu S R, Ge J P, Chu J X. Annual and seasonal variations of Q_{10} soil respiration in the sub-alpine forests of the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1735-1742.

参考文献:

- [6] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469-476.
- [29] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 宋文质, 刘文兆, 欧阳志云. 用于测定陆地生态系统与大气间 CO_2 交换通量的多通道全自动通量箱系统. *生态学报*, 2007, 27(4): 1273-1282.
- [32] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 719-733.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zebrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 王德利

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元