

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化磷酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

# 太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性

严俊霞, 郝忠, 荆雪锴, 李洪建\*

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

**摘要:** 太原晋祠地区曾经是著名的稻米之乡, 随着晋祠泉的断流, 区内土地利用从之前的以水稻田为主转变为以玉米和果园为主。因此, 研究土地利用变化后土壤呼吸对于准确估算区域碳循环具有一定意义。基于此目的, 本研究以原来为稻田、现为果园利用方式的样地为对象, 对其土壤呼吸进行了 7 a (2006 ~ 2012 年)、每月 1 ~ 3 次的定位观测, 分析了土壤呼吸的年际、季节变化及其与环境因子年际、季节变化的关系。结果表明, 土壤呼吸与土壤温度的季节变化与天数的关系可以用 3 参数高斯方程模型进行拟合。土壤呼吸的季节变化与土壤温度的季节变化关系为极显著的指数关系, 但其与土壤水分季节变化的关系不显著。土壤呼吸速率年平均值为  $(5.32 \pm 3.31) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ; 碳通量年平均值为  $1690.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 在  $1294.0 \sim 2006.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  之间变化, 年际均值差异不显著。土壤呼吸的温度敏感性指数 ( $Q_{10}$ ) 值的年际变化以 5、10 和 15 cm 温度测定深度计算分别在 1.54 ~ 2.20、1.68 ~ 2.48 和 1.82 ~ 2.46 之间; 土壤温度 10℃ 对应的土壤呼吸 ( $R_{10}$ ) 值的年际变化在 2.37 ~ 2.81、2.43 ~ 3.13 和 2.59 ~ 3.47  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  之间;  $Q_{10}$  和  $R_{10}$  值均随土壤温度测定深度增加而增加。 $Q_{10}$  的年际变化与 10 cm 深度的土壤温度 ( $T_{10}$ ) 的年际变化关系极显著 ( $P = 0.016$ ), 与其它因子的关系不显著; 在拟合方程中增加土壤水分因子不能提高对  $Q_{10}$  年际变化的预测精度, 说明在本样地水分对  $Q_{10}$  的影响较小。 $R_{10}$  值的年际变化与环境因子的年际变化关系不显著。与土壤呼吸与土壤温度的单因素模型相比, 土壤温度和土壤水分的双变量指数模型可以提高预测土壤呼吸季节变化的准确性。研究结果可以为本地区及同类地区的土壤呼吸估算提供一定参考。

**关键词:** 土地利用; 土壤呼吸; 环境因子; 年际变化; 太原晋祠地区

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3625-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.09.046

## Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jinci Region of Taiyuan City

YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, LI Hong-jian\*

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Jinci area of Taiyuan city is a former hometown of rice, and with the cutoff of the Jinci spring the land use in the area changed fundamentally from original paddy rice to corn or orchard use. So it is very important to investigate soil respiration after land use change and to analyze the relationship between soil respiration ( $R_s$ ) and soil temperature ( $T_s$ ) and soil water content (SWC), and to estimate soil carbon dioxide efflux in the region. For this purpose, we measured  $R_s$  for seven years (2006 to 2012) with an interval of 1 to 3 times per month from March to December in a field originally for rice but now Chinese jujube, and analyzed seasonal, annual variations of  $R_s$  and relationships between  $R_s$  and both  $T_s$  and SWC. The results showed that the seasonal variations of  $R_s$  against day number of the year could be significantly fitted with a three-parameter Gaussian equation while there was no significant correlation between  $T_s$  and SWC. Significant exponential relationship between  $R_s$  and  $T_s$  over the season was found, but not with SWC. Interannual average estimation of soil efflux between March and December from the soil was  $(5.32 \pm 3.31) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , and was equal to  $1690.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  from the same period ranging from 1294 to 2006  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ . No significant difference in annual efflux was found between the years. The sensitivity of  $R_s$  to  $T_s$ ,  $Q_{10}$  value, ranged from 1.54-2.20, 1.68-2.48 and 1.82-2.46, respectively, for the  $T_s$  measurement at 5, 10 and 15 cm depths. The  $R_s$  at 10℃,  $R_{10}$ , ranged from 2.37 to 2.81, 2.43 to 3.13 and 2.59 to 3.47  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , respectively, for the  $T_s$  measurement at 5, 10 and 15 cm depths. Both the  $Q_{10}$  and  $R_{10}$  increased with increasing  $T_s$  measurement depth. In comparison with the fitted one-variable of temperature model, the two-variable model combining both the  $T_s$  and SWC together could be well used to predict  $R_s$  over the season. Our research results can bear important implications for the study of  $\text{CO}_2$  efflux in the region and similar regions.

**Key words:** landuse; soil respiration; environmental factors; interannual variation; Jinci area of Taiyuan

土壤是陆地生态系统最大的碳库, 其含碳量是大气 2 倍<sup>[1]</sup>, 每年从土壤中释放的碳是年化石燃料燃烧碳排放量的 10 倍以上, 在全球碳循环研究中起着关键作用<sup>[2]</sup>。土壤呼吸是受土地利用、管理措施和生物化学及环境条件影响的一种地球化学过

收稿日期: 2016-01-11; 修订日期: 2016-04-08

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2015115); 山西省基础研究项目(2014011032-1); 国家自然科学基金项目(41130528)

作者简介: 严俊霞(1976~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为生态系统碳循环, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: hongli@sxu.edu.cn

程<sup>[3]</sup>. 量化陆地生态系统土壤二氧化碳量的大小、时空变化特点以及影响因子对土壤呼吸的影响是预测将来陆地生态系统的行为、功能变化以及对了解其对气候变化反馈的基础. 土壤呼吸对土壤温度、土壤水分以及其他环境因子,如植被和根系生物量、土壤有机质质量<sup>[4]</sup>、凋落物和土壤质地<sup>[5]</sup>等因子的响应不同.

由于影响土壤呼吸的因子的时空变化,土壤呼吸表现为较高的时间、空间变化特征,使得准确估算土壤呼吸通量变得困难<sup>[6-8]</sup>. 总体上讲,温度和水分是影响土壤呼吸变化的最主要的因素,但是它们在不同的地区、不同的植被类型下的作用不同. 即使在相同的植被条件下,由于植被盖度、生物量和土壤质地的不同,土壤呼吸也可能不同. 在半干旱地区,土壤温度和水分的相互作用控制土壤呼吸的时间变化<sup>[9-12]</sup>. 同时,在干旱、半干旱地区,土壤呼吸的时空变化较大,因为底物资源、环境条件和有机物的分布常常呈现为斑块状<sup>[13]</sup>. 在半干旱生态系统中,植被引起的表面特征、生物特征的变化对土壤呼吸动态、异质性具有很大的影响,然而,到目前为止,对这种变化的认识还非常有限.

太原晋祠地区曾是山西省最大的水稻生产基地. 然而,近半个世纪以来,随着水资源利用的逐年增加和区内地下水的大量开发,晋祠泉流量衰减,导致稻田面积逐年缩小,至1994年,泉水彻底断流,稻田的水源供应停止<sup>[14]</sup>. 随之带来的土地利用方式也发生了变化:由稻田为主逐渐转变为以玉米和经济林为主的种植模式. 种植模式改变以后,碳循环特点也必然发生变化,但是有关研究目前还相对较

少,特别是在北方半干旱地区,类似情况较多. 本研究对稻田变为果园之后的土壤呼吸特点及其与环境因子的关系进行了7a的野外观测,分析了土壤呼吸的季节和年际变化以及与环境因子之间的关系.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验样地

太原晋祠地区的土地利用传统上一直以水稻地为主. 1994年难老泉断流之后,稻田面积逐年减少. 土壤呼吸测定从2005年开始时,试验区周边约10 hm<sup>2</sup>范围内,除少量水稻外,大部分为玉米和果园. 试验样地为一枣树果园,种植于2003年,密度800 株·hm<sup>-2</sup>,之前为水稻地. 土壤为水稻土,全氮0.29%,全碳6.92%,碳氮比23.7. 土壤容重1.37 g·cm<sup>-3</sup>,田间持水量28.68% ± 3.03% (质量分数).

### 1.2 土壤呼吸及其环境因子的测定

#### 1.2.1 土壤呼吸测定

在约1 hm<sup>2</sup>的枣树样地内选择一个30 m × 30 m的代表性区域作为研究区域. 土壤呼吸用LI-6400便携式光合作用系统(LI-COR, Environmental Division, Lincoln, NE, USA)连接09标准气室测定. 土壤呼吸季节测定从2006年3月至2012年12月测定(表1; 1~2月没有测定),每月测定1~3次,年测定次数从2011年的12次到2006年的24次(表1). 具体测定方法见文献[12]. 测定土壤呼吸时每个PVC环测定1次,3个循环,记录3个数据,测定时样地提前放置4~6个PVC环,埋深约2.5 cm,位于树木株距和行距的中央. 所有PVC环测定值的平均值作为当次测定的土壤呼吸值<sup>[12]</sup>.

表1 土壤呼吸以及环境因子每月测定次数

Table 1 Number of the measurements for soil respiration and environmental factors in each year

| 年份   | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 合计  |
|------|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| 2006 | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2   | 1   | 2   | 24  |
| 2007 | 2  | 2  | 2  | 3  | 2  | 3  | 2  | 1   | 2   | 2   | 21  |
| 2008 | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 1   | 1   | 1   | 16  |
| 2009 | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2   | 1   | 1   | 17  |
| 2010 | 1  | 1  | 3  | 2  | 3  | 2  | 2  | 1   | 2   | 1   | 18  |
| 2011 | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1   | 1   | 1   | 12  |
| 2012 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 1   | 1   | 1   | 17  |
| 合计   | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2   | 1   | 2   | 125 |

#### 1.2.2 环境因子测定

在测定土壤呼吸的同时,用LI-6400系统自带的土壤温度探针同步测定PVC环附近10 cm深度的土壤温度,作为测定环下土壤的温度,与土壤呼吸

同时由仪器自动记录. 测定完成后,用温度探针在相同位置继续测定5、15 cm深度的土壤温度,人工记录. 3个不同温度用于分析土壤呼吸与不同深度温度之间的关系. 在测定土壤呼吸的同时,用土钻

法和 TDR 法分别测定土壤水分. 田间持水量和土壤容重用环刀法测定, 取样深度 0 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm, 各深度均为 3 次重复. 样地土壤的全碳、全氮用 vario MACRO cube 元素分析仪(德国)测定.

### 1.3 数据处理及统计分析方法

用每次所测定的所有土壤呼吸 PVC 环实测值的平均值代表当天测定的土壤呼吸值; 月土壤呼吸值取每月各次的平均值为分析值; 土壤呼吸年平均值用月平均值的算术平均值.

土壤呼吸 ( $R_s$ ) 和土壤温度 ( $T_s$ ) 的季节变化与天数 ( $d$ , 1 ~ 365 d) 之间的关系用 3 参数高斯方程 ( $R_s$  或  $T_s = ae^{-0.5((d-x)/b)^2}$ ; 式中  $a$ 、 $b$ 、 $x$  为拟合参数) 拟合; 简单方差分析用于分析测定年之间的土壤呼吸、土壤温度和土壤水分的均值差异, 用 Duncan 法进行验后多重比较, 差异检验概率取 0.05 水平. 用指数方程 ( $R_s = \alpha e^{\beta T}$ ; 式中  $R_s$  为模拟土壤呼吸,  $T$  为实测土壤温度;  $\alpha$ 、 $\beta$  为拟合参数) 分析土壤呼吸与土壤温度的关系模型;  $Q_{10}$ 、 $R_{10}$  值是描述生态系统土壤呼吸及其建模中广泛应用的 2 个参数.  $Q_{10}$  是土壤呼吸的温度敏感性, 它是在某一温度下 ( $T^\circ\text{C}$ ) 的土壤呼吸值和低于该温度  $10^\circ\text{C}$  ( $T - 10^\circ\text{C}$ ) 时的土壤呼吸比值;  $R_{10}$  是土壤呼吸  $10^\circ\text{C}$  时的土壤呼吸值, 常常应用于比较不同生态系统土壤呼吸的差异和模型中. 用  $Q_{10}$  函数 ( $Q_{10} = e^{10\beta}$ ; 式中  $\beta$  为指数方程中  $\beta$  值) 计算土壤呼吸的温度敏感性指数; 用简单线性方程 ( $R_s = a + bW_s$ ; 式中  $a$ 、 $b$  为拟合参数) 分析土壤呼吸和土壤水分的关系. 用土壤温度和水分变量的简单乘积作为自变量、土壤呼吸作为因变量拟合土壤呼吸与土壤温度和水分的关系.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸与土壤温度、水分的季节变化

各测定年土壤呼吸和土壤温度的季节变化表现出明显的季节变化规律: 早春低、夏季最高、秋季开始下降, 冬季最低. 各测定年的季节变化规律表现为明显的“钟”型(图 1). 虽然年际间变化幅度不同, 但二者的变化趋势相同. 不考虑其他因素的情况下, 用 3 参数高斯模型可以简单描述土壤呼吸与天数的关系(表 2). 可以看出, 在单个测定年, 土壤呼吸的拟合方程显著性从显著 (2008 年,  $P = 0.0466$ ) 到绝大多数年份的极显著 ( $P < 0.0001$ ); 当把 7 个测定年的数据整合在一起进行分析时, 他们的关系为极显著 ( $P < 0.0001$ ); 拟合结果说明大多数情况下用简单的高斯方程可以预测土壤呼吸的季节变化. 与土壤呼吸的高斯方程相比, 土壤温度与天数的关系更为密切, 它们之间的相关性均为极显著. 与土壤呼吸和土壤温度的变化规律不同, 各测定年土壤水分的变化没有明显的规律, 它们的季节变化主要受降水量的大小与分布情况影响. 从表 2 还可以看出, 所有测定年份预测的土壤呼吸的最大值在 209 d (7 月 29 日) 到 232 d (8 月 20 日) 之间, 最大值出现的时间变化幅度较长; 土壤温度的最大值从 180 d (6 月 29 日) 至 194 d (7 月 13 日), 最大值出现的时间相对较为集中. 土壤呼吸的最大值出现的时间滞后于土壤温度最大值出现时间. 用 7 a 的 5 cm、15 cm 深度的土壤温度的高斯方程拟合结果同样表明土壤温度与天数具有很好的相关性, 只是土壤温度的最大值 ( $29.8^\circ\text{C}$  和  $25.4^\circ\text{C}$ ) 和出现时间 (184 d 和 192 d) 不同.

表 2 土壤呼吸、土壤温度与天数的高斯模型拟合结果

Table 2 Parameters of the Gaussian equation between soil respiration ( $R_s$ ) and soil temperature ( $T_s$ ) with day of the year

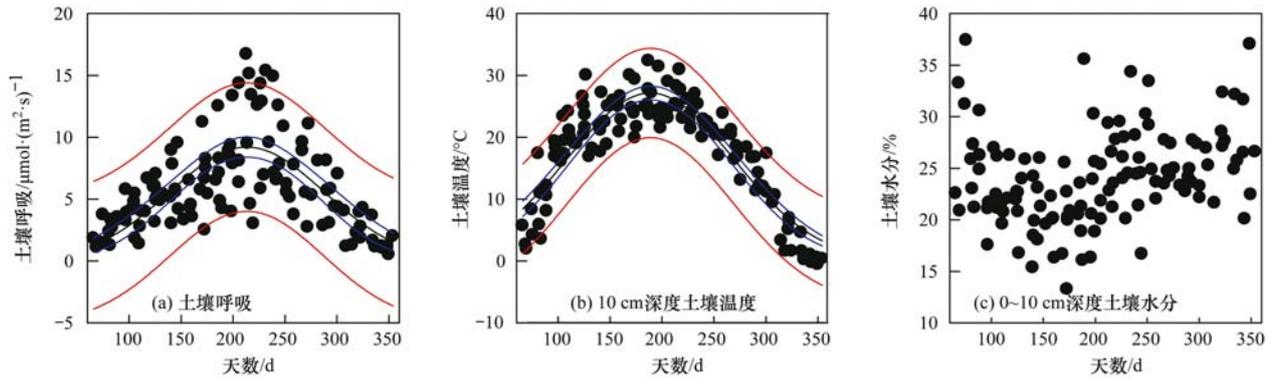
| 年份          | $n$ | 土壤呼吸的高斯模型参数 |       |        |               | 土壤温度的高斯模型参数 <sup>1)</sup> |       |        |               |
|-------------|-----|-------------|-------|--------|---------------|---------------------------|-------|--------|---------------|
|             |     | $a$         | $b$   | $x$    | $R^2(P)^2)$   | $a$                       | $b$   | $x$    | $R^2(P)^2)$   |
| 2006        | 24  | 9.82        | 66.42 | 212.80 | 0.54(0.0003)  | 26.06                     | 76.88 | 193.22 | 0.82(<0.0001) |
| 2007        | 21  | 13.65       | 57.45 | 219.42 | 0.78(<0.0001) | 26.76                     | 80.10 | 188.47 | 0.88(<0.0001) |
| 2008        | 16  | 7.91        | 96.37 | 209.98 | 0.38(0.0466)  | 28.13                     | 78.05 | 193.59 | 0.88(<0.0001) |
| 2009        | 17  | 8.00        | 71.52 | 231.85 | 0.83(0.0003)  | 29.00                     | 88.29 | 182.36 | 0.89(<0.0001) |
| 2010        | 18  | 9.01        | 78.15 | 208.99 | 0.61(0.0009)  | 30.33                     | 78.20 | 186.83 | 0.95(<0.0001) |
| 2011        | 12  | 5.96        | 94.58 | 208.21 | 0.61(0.0143)  | 25.58                     | 85.43 | 180.15 | 0.81(0.0005)  |
| 2012        | 17  | 9.57        | 67.77 | 210.28 | 0.52(0.0062)  | 24.95                     | 76.41 | 191.53 | 0.92(<0.0001) |
| 2006 ~ 2012 | 125 | 9.21        | 74.38 | 213.34 | 0.51(<0.0001) | 27.17                     | 80.40 | 188.76 | 0.83(<0.0001) |

1) 拟合结果为 10 cm 深度温度与天数( $d$ ) 的 3 参数高斯关系方程的拟合参数; 5、15 cm 深度的拟合结果没有显示; 所有拟合方程均为极显著 ( $P < 0.001$ ); 2) 括号中的值为显著水平

### 2.2 土壤呼吸的年内、年际变化

7 a 测定期间 3 ~ 12 月土壤呼吸各月的平均值

(平均值  $\pm$  标准差) 分别为 ( $2.43 \pm 0.79$ )、( $3.89 \pm 1.33$ )、( $5.57 \pm 1.35$ )、( $7.03 \pm 2.49$ )、( $8.10 \pm$



(a)、(b)中黑实线为高斯方程的预测值,蓝实线为预测值的95%的置信区间,红实线为实测值的95%的置信区间;

2006~2012年各测定年和全部数据的土壤呼吸和土壤温度的高斯方程拟合参数见表2

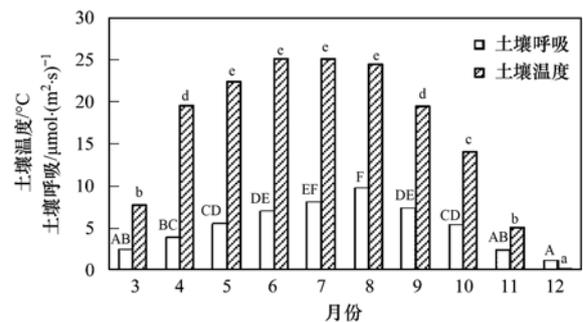
图1 土壤呼吸、10 cm 深度土壤温度和0~10 cm 深度土壤水分随天数的季节变化散点图

Fig. 1 Seasonal variation of soil respiration, soil temperature at 10 cm depth and soil water content over 0-10 cm depth against the day number of the year

3.26)、(9.90 ± 3.86)、(7.34 ± 1.61)、(5.52 ± 1.88)、(2.33 ± 0.85)、(1.14 ± 0.41) μmol·(m²·s)⁻¹; 土壤呼吸具有明显的季节变化,春季较小,8月最大,12月最小。测定期间3~12月的总平均值为(5.32 ± 3.31) μmol·(m²·s)⁻¹。均值检验表明,土壤呼吸平均值年际差异不显著(P > 0.05),月均值之间的差异总体显著,但各月之间均值差异程度不同(图2)。8月的土壤呼吸显著大于其余月份,而土壤温度5~8月差异不显著,与其他各月的差异显著。

用各个测定年土壤呼吸的月平均值乘以对应月的天数,可以得出枣树地的土壤呼吸月通量值(表3)。土壤呼吸的月通量最大值出现在6~8月,大多数出现在8月。7个测定年3~12月土壤呼吸通量值在1294.0~2006.0 g·m⁻²之间,最小值出现在

2011年为1294.0 g·m⁻²,最大值为2007年为2006.0 g·m⁻²,7 a总平均值为1690.2 g·m⁻²。



大写字母表示土壤呼吸的比较结果,小写字母表示10 cm 深度的温度比较结果,相同字母在0.05显著水平上无差异

图2 土壤呼吸和土壤温度的月均值差异检验结果

Fig. 2 Test results of the monthly average values of soil respiration and soil temperature over seven measuring years

表3 测定年土壤呼吸月通量值<sup>1)</sup>/g·(m²·month)⁻¹

Table 3 Calculated CO<sub>2</sub> efflux from March to December by monthly-mean R<sub>s</sub> in different years/g·(m²·month)⁻¹

| 测定年份                    | 3月    | 4月    | 5月    | 6月    | 7月    | 8月    | 9月    | 10月   | 11月   | 12月  | 合计/g·m <sup>-2</sup> |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|----------------------|
| 2006                    | 67.8  | 122.6 | 250.7 | 152.5 | 415.1 | 441.2 | 221.2 | 114.8 | 39.6  | 26.3 | 1851.8               |
| 2007                    | 70.6  | 132.9 | 195.5 | 256.3 | 214.9 | 505.4 | 298.3 | 186.9 | 122.4 | 22.8 | 2006.0               |
| 2008                    | 116.1 | 146.5 | 145.4 | 348.3 | 259.1 | 167.1 | 253.3 | 260.5 | 56.9  | 37.4 | 1790.6               |
| 2009                    | 66.9  | 72.2  | 130.8 | 233.9 | 172.2 | 278.2 | 225.2 | 242.8 | 70.6  | 37.4 | 1530.2               |
| 2010                    | 105.5 | 56.7  | 212.4 | 227.4 | 253.5 | 316.4 | 268.8 | 98.2  | 74.9  | 63.7 | 1677.5               |
| 2011                    | 40.2  | 148.2 | 142.7 | 207.0 | 127.1 | 185.2 | 165.6 | 155.5 | 85.6  | 36.9 | 1294.0               |
| 2012                    | 79.0  | 167.8 | 175.8 | 105.2 | 380.9 | 335.0 | 165.6 | 182.8 | 56.9  | 32.4 | 1681.4               |
| 2006~2012 <sup>1)</sup> | 78.0  | 121.0 | 179.1 | 218.6 | 260.4 | 318.3 | 228.3 | 177.4 | 72.4  | 36.7 | 1690.2               |

1)为7 a平均值

### 2.3 土壤呼吸与环境因子的关系

#### 2.3.1 土壤呼吸与土壤温度的关系

分别用各月的土壤呼吸平均值为因变量,5、10

和15 cm 深度土壤温度为自变量,用指数函数拟合他们之间的关系,结果表明(表4),土壤温度和不同深度的土壤温度之间的关系均为显著或极显著,表

表 4 土壤呼吸与不同深度土壤温度的关系拟合方程

Table 4 Fitted correlation equations of soil respiration and soil temperature at different depth

| 年份 <sup>1)</sup> | 深度/cm | 拟合方程                    | $R^2$ <sup>2)</sup> | $Q_{10}$ | $R_{10}/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ |
|------------------|-------|-------------------------|---------------------|----------|-----------------------------------------------------------|
| 2006             | 5     | $R_s = 1.275e^{0.068x}$ | 0.797               | 1.97     | 2.52                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.125e^{0.082x}$ | 0.818               | 2.27     | 2.55                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.075e^{0.090x}$ | 0.805               | 2.46     | 2.64                                                      |
| 2007             | 5     | $R_s = 1.277e^{0.079x}$ | 0.797               | 2.20     | 2.81                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.259e^{0.091x}$ | 0.808               | 2.48     | 3.13                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.439e^{0.084x}$ | 0.755               | 2.32     | 3.33                                                      |
| 2008             | 5     | $R_s = 1.509e^{0.057x}$ | 0.789               | 1.77     | 2.67                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.622e^{0.062x}$ | 0.744               | 1.86     | 3.02                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.775e^{0.067x}$ | 0.686               | 1.95     | 3.47                                                      |
| 2009             | 5     | $R_s = 1.452e^{0.049x}$ | 0.503               | 1.63     | 2.37                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.528e^{0.052x}$ | 0.606               | 1.68     | 2.57                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.469e^{0.060x}$ | 0.677               | 1.82     | 2.68                                                      |
| 2010             | 5     | $R_s = 1.849e^{0.043x}$ | 0.517               | 1.54     | 2.84                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.708e^{0.052x}$ | 0.632               | 1.68     | 2.87                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.696e^{0.060x}$ | 0.714               | 1.82     | 3.09                                                      |
| 2011             | 5     | $R_s = 1.408e^{0.053x}$ | 0.664               | 1.70     | 2.39                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.353e^{0.060x}$ | 0.734               | 1.82     | 2.47                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.340e^{0.066x}$ | 0.799               | 1.93     | 2.59                                                      |
| 2012             | 5     | $R_s = 1.252e^{0.075x}$ | 0.742               | 2.12     | 2.65                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.325e^{0.079x}$ | 0.730               | 2.20     | 2.92                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.393e^{0.081x}$ | 0.722               | 2.25     | 3.13                                                      |
| 2006 ~ 2012      | 5     | $R_s = 1.438e^{0.059x}$ | 0.654               | 1.80     | 2.59                                                      |
|                  | 10    | $R_s = 1.437e^{0.066x}$ | 0.675               | 1.93     | 2.78                                                      |
|                  | 15    | $R_s = 1.447e^{0.072x}$ | 0.700               | 2.05     | 2.97                                                      |

1) 单个测定年份  $n = 10$ ; 2006 ~ 2012 年  $n = 63$ ; 2) 自由度为 9、变量个数为 1 时显著性检验  $R^2$  值在 0.01、0.05 显著水平下的临界值分别为 0.54 和 0.36; 自由度为 62、变量个数为 1 时显著性检验  $R^2$  值在 0.01、0.05 显著水平下临界值分别为 0.36 和 0.07; 方程在显著或极显著范围内

明土壤呼吸主要受土壤温度的影响。

### 2.3.2 土壤呼吸的 $Q_{10}$ 和 $R_{10}$ 值

根据拟合的土壤呼吸与土壤温度关系的指数方程的参数计算的  $Q_{10}$ 、 $R_{10}$  值见表 4。用单一年份的测定数据计算的不同深度的土壤呼吸  $Q_{10}$  值分别在 1.54 ~ 2.20 (5 cm 深度)、1.68 ~ 2.48 (10 cm 深度) 和 1.82 ~ 2.46 (15 cm 深度) 之间, 平均值分别为 1.85、2.00 和 2.10; 把 7a 的数据整合一起计算的  $Q_{10}$  值分别为 1.80、1.93 和 2.05。同时发现, 随土壤温度测定深度的增加  $Q_{10}$  值增加。Tukey HSD 均值检验表明, 不同深度之间的  $Q_{10}$  值差异不显著 ( $P = 0.26$ )。同样的分析表明, 用单一年份的测定数据计算的不同深度的土壤呼吸  $R_{10}$  值分别在 2.37 ~ 2.81  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  (5 cm 深度)、2.43 ~ 3.13  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  (10 cm 深度) 和 2.59 ~ 3.47  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  (15 cm 深度) 之间, 平均值分别为 2.61、2.79 和 2.99  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ; 把 2006 ~ 2012 年的数据整合一起计算的  $R_{10}$  值分别为 2.59、2.78 和 2.97  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。随土壤温度测定深

度的增加,  $R_{10}$  值增加。Tukey HSD 均值检验表明, 不同深度之间的  $R_{10}$  值差异不显著 ( $P = 0.057$ ), 但是 5 cm 深度的  $R_{10}$  平均值与 15 cm 深度的  $R_{10}$  的平均值差异显著 ( $P < 0.05$ )。

用 7 个测定年各年数据计算的  $Q_{10}$ 、 $R_{10}$  值与对应年份 10 cm 深度的土壤温度平均值 ( $T_{10}$ )、土壤水分 (年平均  $\text{SWC}_{\text{ann}}$ ; 3 ~ 12 月各月平均值,  $\text{SWC}_{\text{Mar}}, \text{SWC}_{\text{Apr}}, \dots, \text{SWC}_{\text{Dec}}$ ) 值分别进行多元回归拟合分析, 结果表明,  $Q_{10}$  与  $T_{10}$  的关系极显著 ( $Q_{10} = 4.412 - 0.149 T_{10}$ ;  $P = 0.016$ ); 当把水分作为自变量加入进行二元方程拟合时,  $Q_{10}$  与  $T_{10}$  及 7 月的土壤水分极显著 ( $Q_{10} = 4.711 - 0.141 T_{10} - 0.019 \text{SWC}_{\text{July}}$ ;  $P = 0.03$ ), 其次为 4 月 ( $Q_{10} = 5.167 - 0.159 T_{10} - 0.027 \text{SWC}_{\text{Apr}}$ ;  $P = 0.048$ ), 其余拟合方程均不显著。但  $R_{10}$  与这些因子的关系均不显著。说明本区的  $Q_{10}$  年际变化主要受土壤温度影响, 而  $R_{10}$  受环境因子的影响较小。

### 2.3.3 土壤呼吸与水分的关系

测定期间土壤水分的月平均值大多在 20% ~

30% 之间 (图 1), 大多数值介于田间持水量 ( $28.68\% \pm 3.03\%$ ) 之内, 有部分值大于田间持水量, 但没有值低于田间持水量的 1/3 (即  $9.59\% \pm 1.01\%$ ) 以下. 此外大于田间持水量的土壤水分大多出现于 3 月或 10 ~ 12 月, 此时的土壤呼吸均较低, 因此土壤水分对土壤呼吸基本不存在土壤干旱或水分过高引起的呼吸抑制作用. 用单个测定年或 7 个测定年土壤呼吸数据与水分数据的单因素拟合方程结果表明, 二者之间的关系均不显著. 进一步分析表明, 生长季 4 ~ 9 月的土壤呼吸与土壤水分呈正相关, 土壤呼吸与土壤水分的关系除 2007 年显著 ( $P=0.026$ )、2008 年接近显著 ( $P=0.058$ ) 外, 其他年份不显著; 年土壤呼吸平均值与年降雨量的关系亦不显著.

### 2.3.4 土壤呼吸与温度和水分的复合关系

测定期间土壤呼吸与土壤温度和水分的复合关系分析表明 (表 5), 土壤呼吸与温度、水分乘积为

表 5 不同年份土壤呼吸与 10 cm 深度的土壤温度和水分的复合方程<sup>1)</sup>

Table 5 Regression equations on soil respiration against soil temperature and soil water content in different years

| 年份   | 拟合方程                     | $R^2$  | 年份          | 拟合方程                     | $R^2$  |
|------|--------------------------|--------|-------------|--------------------------|--------|
| 2006 | $R_s = 1.071e^{0.003TW}$ | 0.917* | 2010        | $R_s = 1.416e^{0.002TW}$ | 0.785* |
| 2007 | $R_s = 1.151e^{0.004TW}$ | 0.876* | 2011        | $R_s = 1.348e^{0.002TW}$ | 0.698  |
| 2008 | $R_s = 1.466e^{0.002TW}$ | 0.810* | 2012        | $R_s = 1.075e^{0.003TW}$ | 0.873* |
| 2009 | $R_s = 1.472e^{0.002TW}$ | 0.673* | 2006 ~ 2012 | $R_s = 1.341e^{0.003TW}$ | 0.730* |

1) 拟合方程的  $R^2$  值  $> df=9, P=0.01$  时对应的  $R^2$  值 (0.54), 所有方程均为极显著; 标注星号 (\*) 表示  $R^2$  值大于呼吸与温度的单一因素的拟合方程的  $R^2$  值 (表 4)

## 3 讨论

### 3.1 土壤呼吸及其季节变化

有研究表明, 在大多数温带地区, 土壤呼吸及其环境因子均具有明显的季节变化特点<sup>[15-17]</sup>. 整个测定期内其土壤呼吸的季节变化表现为春季较低、夏季最高、秋季下降、冬季最低的特点, 与在太原盆地东西山地区不同生态系统的研究结果相一致<sup>[12, 18]</sup>. 用高斯 3 参数方程, 仅仅根据天数, 在不考虑影响土壤呼吸的环境因子的情况下, 可以比较准确地模拟土壤呼吸的季节变化, 为预测土壤呼吸的季节变化提供了一个简单、可靠的方法. 研究中根据高斯模型预测的土壤呼吸最大值出现在 8 ~ 9 月中旬 (209 ~ 232 d), 滞后于土壤温度的最大值出现时间 (7 ~ 8 月) 约一个月 (180 ~ 194 d), 这一现象可能与土壤水分季节变化有一定关系, 因为本区大多数年份真正的雨季出现在 7 ~ 8 月, 同时气温的最高值也出现在 7 ~ 8 月, 此时的雨热同期是导致土壤

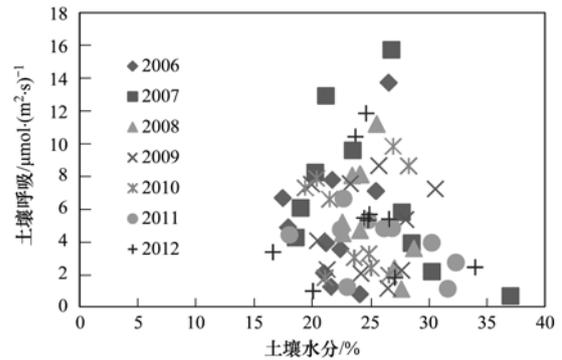


图 3 7 a 土壤呼吸与土壤水分的关系散点图

Fig. 3 Scatter plot of soil respiration against soil water content for seven measuring years

呼吸最大值出现的主要原因之一. 研究地的土壤呼吸年平均值为 ( $5.32 \pm 3.31$ )  $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 大于大多数温带地区的土壤呼吸研究结果<sup>[17, 19]</sup>, 也大于本地区盆地外围山区林地、灌木 11 个样地的土壤呼吸平均值<sup>[12]</sup>. 同样, 根据土壤呼吸速率计算的年土壤呼吸通量值也大于大多数研究结果<sup>[16, 17, 20, 21]</sup>. Bond-Lamberty 等<sup>[22]</sup> 对全球呼吸数据的分析表明, 温带地区的年平均值为 ( $745 \pm 421$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  [ $1 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1} = 375 \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]. 研究地土壤呼吸碳通量高于在太原盆地内农田生态系统每周 1 次持续 1 a 的测定结果<sup>[12]</sup>. 本研究地土壤呼吸大的原因可能与本区地下水位相对较高, 土壤水分充足, 对土壤呼吸的限制较小以及土壤温度、土壤有机碳含量较高有关<sup>[23]</sup>. 此外由于土壤呼吸最低的 1 ~ 2 月未进行观测以及测定频率较低也是其原因之一. 再者本研究土壤呼吸测定时间在午间进行, 此时的测定值比 24 h 平均值高 10% ~ 20%<sup>[12]</sup>.

### 3.2 土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的关系

本研究中土壤呼吸与土壤温度的关系极显著, 绝大多数年份的土壤呼吸变化可以用土壤温度的季节变化得到解释, 这与绝大多数的研究结论相一致. 测定期试验地土壤水分高值大多低于田间持水量、低值大于田间持水量的 1/3 (9.59%) 或 1/2 以上 (14.34%), 基本不存在对土壤呼吸的抑制, 这可能是土壤温度能很好地解释土壤呼吸季节变化的主要原因之一, 因为在土壤没有水分干旱限制条件下, 土壤呼吸主要受土壤温度影响<sup>[24, 25]</sup>. 土壤水分对土壤呼吸的影响存在上、下阈值, 水分对土壤呼吸的影响在下限低于阈值、上限高于阈值才起作用, 但是影响土壤呼吸的阈值因土壤质地、表示方式不同而异, 如水势、重量含水量、体积含水量等. Rey 等<sup>[26]</sup>、Qi 等<sup>[27]</sup> 把土壤水分的 20% 作为下限阈值; Dilustro 等<sup>[28]</sup> 把土壤水势 1 500 kPa 对应的土壤水分值作为下限阈值; Gaumont-Guay 等<sup>[24]</sup> 用田间持水量和萎焉含水量 (土壤水势 -2 000 kPa 对应的土壤水分) 作为上限和下限阈值. 在本研究区域西部山区的研究表明, 田间持水量和田间持水量的 1/3 可以作为土壤呼吸受到抑制的上、下阈值. 剔除阈值范围之外的土壤呼吸测定数据可以提高土壤温度对呼吸的预测精度<sup>[12]</sup>. 本研究样地枣树位于太原盆地靠近浅层地下水的排泄区域, 地下水埋深较浅, 干旱对土壤水分的影响较小, 土壤水分对呼吸的抑制作用不明显. 此外, 大多数土壤水分超过田间持水量的数据出现在早春和秋冬季节, 此期间的土壤呼吸主要由温度控制, 这可能也是土壤水分对呼吸影响较小的主要原因之一. 因此不进行剔除即可很好地用指数方程预测土壤呼吸的季节变化, 这也是土壤呼吸与环境因子关系在不同样地影响因子不同的主要差异所在<sup>[12]</sup>. 土壤呼吸年与年降水量关系不显著, 表明土壤呼吸不仅受降雨量的大小影响, 而且与降雨量的季节分配差异有关, 需要通过更长期的野外测定结果进行分析.

已有研究表明, 土壤呼吸与温度和水分复合关系拟合可以提高土壤呼吸预测的准确程度<sup>[16, 24, 29, 30]</sup>. 7 a 测定的土壤水分季节变化与土壤呼吸的季节变化之间的关系均不显著, 表明在本区土壤水分对呼吸的影响相对较小, 但是并不能完全忽略土壤水分对土壤呼吸的影响, 因为把土壤温度和水分乘积作为一个新变量与土壤呼吸进行关系拟合, 其拟合方程的  $R^2$  值 (表 5) 有 6 a 大于土壤呼吸与温度的单一因素方程的  $R^2$  值 (表 4); 用 7 a 的

所有测定数据的分析结果亦如此, 说明土壤温度和水分共同作用于土壤呼吸<sup>[6, 29, 30]</sup>. 土壤呼吸与温度和水分复合关系方程为指数型, 而不是直线型, 与在本样地西部山区的结果有一定差异<sup>[12]</sup>, 表明呼吸与温度和水分关系的复杂性<sup>[27]</sup>. 与本研究结果相一致, 土壤呼吸与温度和水分复合关系方程已有许多报道. Jia 等<sup>[31]</sup> 研究表明利用整个生长期的数据预测土壤呼吸时, 两变量方程优于单变量方程; 其他的研究者有相同的报道<sup>[6, 16, 17, 24, 27, 32, 33]</sup>. 本研究中尽管土壤呼吸与温度和水分复合关系方程拟合很好, 但是确定 2 个环境因子各自的独立作用仍需进行进一步分析<sup>[12]</sup>, 因为在野外条件下测定的土壤呼吸是许多因子的综合作用, 它们对土壤呼吸的作用很难区分<sup>[16, 27]</sup>.

### 3.3 土壤呼吸的温度敏感性

用 7 a 全部数据计算的 5、10 和 15 cm 深度土壤温度对应的土壤呼吸温度敏感性  $Q_{10}$  值分别为 1.80、1.93 和 2.05, 小于在盆地周边山区的  $Q_{10}$  值<sup>[12]</sup>, 也小于 Raich 等<sup>[34]</sup> 对文献综述分析得到的全球尺度土壤呼吸的温度敏感性值 2.4. 土壤温度的测定深度影响土壤温度敏感性, 因为相同土壤呼吸的情况下, 随测定深度增加, 土壤温度的变化幅度减小, 从而使  $Q_{10}$  值增加. 用 2、5、10、15、20 和 50 cm 深度的土壤温度与土壤呼吸拟合, Khomik 等<sup>[35]</sup> 发现  $Q_{10}$  值在 3.6~12 之间, 10 cm 深度的拟合方程具有最大  $R^2$  值. Borken 等<sup>[36]</sup> 同样报道当土壤温度测定深度从 0 增加到 10 cm 深度时,  $Q_{10}$  从 1.95 增加到了 3.5. 他们的研究均发现土壤温度敏感性的土壤温度最佳测定深度在 5~10 cm 之间, 因为土壤呼吸主要来源于这一深度范围. 本研究结果表明, 不同年份土壤呼吸和 3 个测定深度拟合方程的最大  $R^2$  值不同, 5、10 和 15 cm 深度拟合方程的最大的  $R^2$  值分别出现 2、2 和 3 次, 7 a 的全部数据拟合方程的最大  $R^2$  值为 15 cm 深度. 因此笔者认为在该区用 5、10 或 15 cm 深度的土壤温度均可以很好地预测土壤呼吸. 此外, 当进行  $Q_{10}$  比较时, 首先应当保证土壤温度的观测深度相同, 否则可能出现错误<sup>[27]</sup>.

当土壤温度测定深度为 5、10 和 15 cm 时,  $R_{10}$  值分别介于 2.37~2.81、2.43~3.13 和 2.59~3.47  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  之间, 同样表现出随土壤温度测定深度的增加,  $R_{10}$  值增大的趋势. 把 2006~2012 年的数据整合一起计算的  $R_{10}$  值分别为 2.59、2.78 和 2.97  $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ , 与大多数研究结果一致.

如, Yuste 等<sup>[30]</sup>报道的  $R_{10}$  值在  $1.06 \sim 2.15 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  之间; 通过对一个温带针叶林的研究, Vincent 等<sup>[19]</sup>得到的  $R_{10}$  值在  $2.30 \sim 3.60 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  之间; Soegaard 等<sup>[37]</sup>在丹麦农田的研究其  $R_{10}$  值为  $2.4 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ .

土壤温度和土壤水分共同影响  $Q_{10}$ 、 $R_{10}$  值<sup>[32]</sup>.  $Q_{10}$ 、 $R_{10}$  值一般随土壤水分升高而增加, 随土壤温度升高而减小<sup>[36, 38]</sup>. 本研究中  $Q_{10}$  与土壤 10 cm 深度的土壤温度年平均值极显著 ( $P=0.016$ ), 但加入水分因子分析时,  $Q_{10}$  与 10 cm 深度土壤温度平均值及 7 月(或 4 月)的水分关系极显著, 但相关系数减小 ( $P$  为 0.003 和 0.048), 说明在本样地土壤水分不是影响  $Q_{10}$  值变化的主要因素, 可能与样地的土壤水分不是影响土壤呼吸的最主要因子有关, 因为水分不仅影响土壤呼吸而且影响  $R_{10}$  和  $Q_{10}$  值<sup>[32]</sup>.

#### 4 结论

(1) 7 个测定年 3~12 月的土壤呼吸值为  $(5.32 \pm 3.31) \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ , 土壤呼吸年通量值为  $1\ 690.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . 用高斯 3 参数方程可以预测土壤呼吸的季节变化, 不需要考虑环境因子的影响, 简单易行. 土壤呼吸的年际变化不显著. 土壤呼吸季节变化与 5、10、15 cm 深度的温度的季节变化用指数关系拟合关系显著; 但是土壤呼吸季节变化与土壤水分的季节变化关系不显著.

(2) 根据土壤呼吸与 5、10 和 15 cm 深度土壤温度的指数拟合参数计算的  $Q_{10}$  值年际变化分别在  $1.54 \sim 2.20$ 、 $1.68 \sim 2.48$  和  $1.82 \sim 2.46$  之间, 平均值为 1.85、2.00 和 2.10;  $Q_{10}$  值随土壤温度测定深度增加; 5、10 和 15 cm 深度土壤温度对应的  $R_{10}$  值的年际变化在  $2.37 \sim 2.81$ 、 $2.43 \sim 3.13$  和  $2.59 \sim 3.47 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  之间, 平均值为 2.61、2.79 和  $2.99 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ;  $R_{10}$  值同样随深度增加而增加.  $Q_{10}$  的年际变化与 10 cm 深度的土壤温度  $T_{10}$  的年际变化关系极显著, 与其他因子关系不显著.

(3) 尽管土壤呼吸与土壤水分的关系不显著, 但是用包含土壤温度和土壤水分的双变量指数方程拟合土壤呼吸的季节变化, 相应的关系方程的决定系数有一定程度的增加, 说明土壤水分对土壤呼吸也存在一定程度的影响. 本研究结果可以为本地区及同类地区的土壤呼吸估算提供参考.

#### 参考文献:

[1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle [J]. *Global Change Biology*, 1995, **1**(1): 77-91.

- [2] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(8): 800-812.
- [3] Frank A B, Liebig M A, Tanaka D L. Management effects on soil  $\text{CO}_2$  efflux in northern semiarid grassland and cropland [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, **89**(1): 78-85.
- [4] Jia B R, Zhou G S. Integrated diurnal soil respiration model during growing season of a typical temperate steppe: effects of temperature, soil water content and biomass production [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(4): 681-686.
- [5] Balogh J, Pintér K, Fóti S, *et al.* Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and  $\text{CO}_2$  uptake in dry grasslands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(5): 1006-1013.
- [6] Xu M, Qi Y. Soil-surface  $\text{CO}_2$  efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(6): 667-677.
- [7] Law B E, Kelliher F M, Baldocchi D D, *et al.* Spatial and temporal variation in respiration in a young ponderosa pine forest during a summer drought [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **110**(1): 27-43.
- [8] Stoyan H, De-Polli H, Böhm S, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale [J]. *Plant and Soil*, 2000, **222**(1-2): 203-214.
- [9] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 53-69.
- [10] Shi W Y, Tateno R, Zhang J G, *et al.* Response of soil respiration to precipitation during the dry season in two typical forest stands in the forest-grassland transition zone of the Loess Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(7): 854-863.
- [11] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, *et al.* Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, **74**(10): 1200-1211.
- [12] 李洪建. 不同生态系统土壤呼吸与环境因子的关系研究 [D]. 太原: 山西大学, 2008.
- [13] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil  $\text{CO}_2$  efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**(3): 199-209.
- [14] 黄皓莉. 晋祠泉断流与地下水资源保护关系 [J]. *中国煤田地质*, 2003, **15**(2): 26-28.
- [15] Saiz G, Green C, Butterbach-Bahl K, *et al.* Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands [J]. *Plant and Soil*, 2006, **287**(1-2): 161-176.
- [16] 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 [J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(2): 217-227.
- [17] Kang S, Doh S, Lee D, *et al.* Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea [J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(10): 1427-1437.
- [18] Zeng X H, Zhang W J, Shen H T, *et al.* Soil respiration response in different vegetation types at Mount Taihang, China [J]. *Catena*, 2014, **116**: 78-85.

- [19] Vincent G, Shahriari A R, Lucot E, *et al.* Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(9): 2527-2535.
- [20] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(11-12): 1625-1635.
- [21] Wu J B, Guan D X, Wang M, *et al.* Year-round soil and ecosystem respiration in a temperate broad-leaved Korean Pine forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **223**(1-3): 35-44.
- [22] Bond-Lamberty B, Thomson A. A global database of soil respiration data[J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(6): 1915-1926.
- [23] Chen S T, Huang Y, Zou J W, *et al.* Modeling interannual variability of global soil respiration from climate and soil properties[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(4): 590-605.
- [24] Gaumont-Guay D, Black T A, Griffis T J, *et al.* Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1-4): 220-235.
- [25] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, **8**(3): 315-323.
- [26] Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, *et al.* Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy[J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(9): 851-866.
- [27] Qi Y, Xu M. Separating the effects of moisture and temperature on soil CO<sub>2</sub> efflux in a coniferous forest in the Sierra Nevada mountains[J]. *Plant and Soil*, 2001, **237**(1): 15-23.
- [28] Dilustro J J, Collins B, Duncan L, *et al.* Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **204**(1): 87-97.
- [29] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, *et al.* Controls on soil respiration in semiarid soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(6): 945-951.
- [30] Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, *et al.* Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest [J]. *Tree Physiology*, 2003, **23**(18): 1263-1270.
- [31] Jia B, Zhou G, Wang Y, *et al.* Effects of temperature and soil water-content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, **67**(1): 60-76.
- [32] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of  $Q_{10}$  determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(3): 687-696.
- [33] Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* Soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation[J]. *Plant and Soil*, 1998, **205**(2): 135-146.
- [34] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B*, 1992, **44**(2): 81-99.
- [35] Khomik M, Arain M A, McCaughey J H. Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**(1-4): 244-256.
- [36] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, *et al.* Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests [J]. *Global Change Biology*, 2002, **8**(12): 1205-1216.
- [37] Soegaard H, Jensen N O, Boegh E, *et al.* Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **114**(3-4): 153-173.
- [38] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in  $Q_{10}$  of soil respiration in a beech forest[J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(6): 911-918.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....                                                                                   | FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)            |
| Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....                                                   | WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)           |
| Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....                          | LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)         |
| Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....                                                            | WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)                 |
| Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....                                                                  | XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)               |
| Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....                                                                                  | LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)                 |
| Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....                                    | WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)             |
| Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....                                           | WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)                    |
| Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....                                                   | LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)                                     |
| Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....                                                                 | JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)                                   |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....                     | GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)              |
| Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....                                       | CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)           |
| Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....                                                 | ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)   |
| Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....                                             | ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)         |
| Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....    | ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)       |
| Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....                                  | LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)        |
| Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....                                                                              | LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)             |
| Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC ..... | HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)   |
| Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....                                                                          | ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)            |
| Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....                                            | AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)            |
| Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....                        | WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)        |
| Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....                                     | LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)          |
| Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....                                                  | XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)                |
| Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....                       | WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)                             |
| Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....                                                                  | ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)               |
| Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....                                                               | YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)            |
| Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....                                | WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)          |
| Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....                                                                     | LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)                  |
| Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....                                                                               | JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)          |
| Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells .....                                                     | SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)         |
| Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrhydrite .....                                                                                | CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498) |
| Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....                                                                          | MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)           |
| Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....                                             | LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)       |
| Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....                                                                        | HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)                      |
| Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....                                           | WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)                           |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China ..... | DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)              |
| Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....                                                                    | JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)       |
| Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....                                                                                               | GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)          |
| Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....                                       | YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)             |
| Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....                                                    | ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)                |
| Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....                                                     | ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)              |
| Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....     | ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)                                   |
| Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....                                                    | SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)                |
| Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....                    | HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)           |
| Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....                                    | DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)              |
| Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....                                        | YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)           |
| Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....                                                                | WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)      |
| Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....                                     | XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)              |
| Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....                                                                       | LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)                           |
| Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....                                                                 | LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)               |
| Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....                                                                          | LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)                         |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                    |                  |    |                                                                                                                                                                                                                       |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                              | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                           |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                      | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                           |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                              | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                        |
| 主 编     | 赵进才                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                          |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                            | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                          |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                            | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                        |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                               | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                             |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                            | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                       |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易集团有限公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                        | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                    |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行