

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

**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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 ..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)

利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 ..... 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)

南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 ..... 朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)

北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 ..... 苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)

重庆市主城区 PM<sub>2.5</sub>时空分布特征 ..... 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)

大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 ..... 庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)

深圳市大气中全氟化合物的残留特征 ..... 何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)

北京上甸子站大气 CO<sub>2</sub> 及 δ<sup>13</sup>C(CO<sub>2</sub>) 本底变化 ..... 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 ..... 刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)

城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 ..... 刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 ..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)

西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 ..... 王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)

PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 ..... 刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 ..... 张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)

曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 ..... 薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)

江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 ..... 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 ..... 刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)

我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 ..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 ..... 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)

太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 ..... 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 ..... 程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 ..... 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)

重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 ..... 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 ..... 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)

伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 ..... 韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 ..... 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 ..... 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 ..... 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)

锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 ..... 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)

电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 ..... 王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)

水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 ..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)

多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 ..... 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)

污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析 ..... 牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)

高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 ..... 李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 ..... 吴鹏, 张诗颖, 宋吟吟, 徐乐中, 沈耀良 (1472)

反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 ..... 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)

低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 ..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 ..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)

短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 ..... 谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 ..... 崔海, 张亚红 (1507)

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 ..... 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)

小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 ..... 刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)

鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 ..... 王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)

水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 ..... 罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)

高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 ..... 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)

基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 ..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)

养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 ..... 金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 ..... 王兰君, 王金凤, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)

新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应 ..... 林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 ..... 李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇锋, 彭驰, 韩存亮 (1584)

《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

# 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子

崔海<sup>1,2</sup>, 张亚红<sup>1\*</sup>

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 银川能源学院生物工程系, 银川 750105)

**摘要:** 围封禁牧措施可以改善退化草地生态环境, 是我国退化草地植被恢复的主要措施. 为探讨干旱区荒漠草原不同围封禁牧年限的土壤呼吸作用特征及影响因子, 在生长季连续观测围封禁牧 11 a、7 a、放牧不封育(CK)荒漠草原土壤呼吸速率及环境因子, 结果表明: ①在日、季尺度上, 封育 11 a、7 a 和 CK 荒漠草原土壤呼吸速率均具有明显的单峰曲线变化规律, 在日尺度上, 最大、最小值分别出现在 12:00~16:00 和 00:00~06:00; 在季节变化尺度上, 最大值出现在降水较多温度适宜的 8 月, 土壤呼吸均值表现为 11 a [ $0.143 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > 7 a [ $0.138 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > CK [ $0.106 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]. ②封育与未封育荒漠草原的土壤呼吸速率与空气、土壤温度均呈极显著的指数关系 ( $P < 0.001$ ), 相关性大小为: 地表温度 ( $R^2: 0.408 \sim 0.413$ ) > 空气温度 ( $R^2: 0.355 \sim 0.376$ ) > 5~20 cm 土壤温度 ( $R^2: 0.263 \sim 0.394$ ); 温度敏感性系数  $Q_{10}$  随着土层的加深逐渐变大, 不同封育年限  $Q_{10}$  表现为 11 a (2.728) > 7 a (2.436) > CK (2.086). ③封育 11 a、7 a 和 CK 荒漠草原土壤呼吸速率与空气湿度、土壤含水量一元二次模型达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 与空气二氧化碳呈极显著线性负相关 ( $P < 0.01$ ), 与风速呈显著线性正相关 ( $P < 0.05$ ), 与光照强度呈极显著线性正相关 ( $P < 0.01$ ). ④干旱区荒漠草原土壤呼吸作用随着围封禁牧年限的增加而增加, 温度敏感性系数亦随之增加, 0~20 cm 土壤温度和水分是其土壤呼吸的主要影响因子.

**关键词:** 土壤呼吸; 封育年限; 日季变化; 荒漠草原; 影响因子

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1507-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.2016.04.041

## Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe

CUI Hai<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-hong<sup>1\*</sup>

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Department of Biological Engineering, Yinchuan Energy Institute, Yinchuan 750105, China)

**Abstract:** The fenced measures could improve the ecological environment of degraded grassland, it's a main measure for restoration of degraded grassland vegetation in China. Soil respiration ( $R_s$ ) is an important component of an ecosystem's carbon cycle and the main pathway for carbon moving from the ecosystem to the atmosphere. In order to explore soil respiration characteristics and influencing factors of the different fenced years in arid desert grassland, we continuously observed  $R_s$  rate and environmental factors in the growing season of fenced enclosure 11 a, 7 a and no fenced (CK) desert steppe in Ningxia. The results showed that: ① Both the diurnal and seasonal variations of  $R_s$  rate showed a single asymmetric peak changing in fenced enclosure of 11 years, 7 years, CK desert steppe. On the daily scale, the maximum and minimum values of  $R_s$  rate were found in the periods of 12:00-16:00 and 00:00-06:00, respectively. On the seasonal variation scale, the maximum value of  $R_s$  rate occurred in August with suitable precipitation and temperature conditions. And the  $R_s$  rate of the growing season of different fenced enclosure years was in the order of 11 a [ $0.143 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > 7 a [ $0.138 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > CK [ $0.106 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]. ② According to statistical analysis, it indicated that  $R_s$  rate had a significant exponential positive relationship with air and soil temperature in fenced enclosure of 11 years, 7 years, CK desert steppe ( $P < 0.01$ ). The order of the correlation of  $R_s$  rate and temperature was shown as soil surface temperature ( $R^2: 0.408-0.413$ ) > air temperature ( $R^2: 0.355-0.376$ ) > 5-20 cm soil temperature ( $R^2: 0.263-0.394$ ). The temperature sensitivity coefficient  $Q_{10}$  increased gradually with the soil depth, and  $Q_{10}$  of different fenced enclosure years was showed as 11 a (2.728) > 7 a (2.436) > CK (2.086). ③ A significant quadratic function model ( $P < 0.05$ ) was observed for the relationship between  $R_s$  rate and relative air humidity, soil moisture content of fenced enclosure 11 a, 7 a and CK desert steppe in the whole growing season.  $R_s$  rate had a significant linear negative correlation with air carbon dioxide concentration ( $P < 0.01$ ), a linear positive correlation with the wind speed ( $P < 0.05$ ), and a significant weak linear positive correlation with light intensity ( $P < 0.01$ ). ④ It showed that  $R_s$  increased with increasing fenced enclosure years in arid desert steppe, and temperature sensitivity coefficient  $Q_{10}$  also increased with increasing fenced enclosure years. To sum up, 0-20cm soil temperature and moisture were the main influencing factors of soil respiration of arid

收稿日期: 2015-10-22; 修订日期: 2015-12-09

基金项目: 宁夏大学博士培优计划项目(2015)

作者简介: 崔海(1980~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为草地生态环境变化, E-mail: cuihai54321@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhyhcau@sina.com

desert steppe. This study has important implications to understand the role that different fenced enclosure years play in carbon emission. Such information will lay a foundation for assessing carbon source or carbon sequestration of different fenced enclosure years in desert steppe. Therefore, our research results have important function for better managing grassland in desert steppe in Ningxia and other arid and semiarid areas of North China.

**Key words:** soil respiration rate; different fenced enclosure years; diurnal and seasonal variations; desert steppe; influencing factors

土壤呼吸是大气 CO<sub>2</sub> 的重要来源之一,对全球尺度的碳循环调控至关重要<sup>[1]</sup>. 面积大、类型丰富的草地生态系统已成为陆地最重要的碳库之一<sup>[2]</sup>,全球草地总碳储量约占整个陆地生态系统的 12.7% (266.3 Pg) ~ 31% (761 Pg)<sup>[3,4]</sup>,草地生态系统在全球碳循环中起着关键作用<sup>[5]</sup>. 中国草原面积约占国土面积的 40%<sup>[6]</sup>,多位于生态脆弱地带,正面临着越来越严重的人为与自然因素的干扰. 国内外研究发现,长期过度放牧导致草地土壤有机碳减少<sup>[7]</sup>,抑制土壤呼吸<sup>[8]</sup>,放牧对土壤有机碳和氮产生负效应<sup>[9]</sup>. 禁牧围栏封育措施可以有效提高草地土壤固碳能力、促进土壤呼吸<sup>[10-13]</sup>;改善土壤理化性质、提高土壤微生物活性<sup>[14,15]</sup>和植被盖度<sup>[16]</sup>以及净初级生产力<sup>[17,18]</sup>;围封禁牧 20 年土壤有机质含量达到稳定<sup>[19]</sup>,围封 5 年荒漠草原植物群落盖度和密度达到最高<sup>[20]</sup>,群落物种多样性指数随围封年限的增加先降低后升高<sup>[21]</sup>. 但对小尺度范围的封育年限变化对草地土壤呼吸的影响研究较少. 宁夏回族自治区地处大陆西北,气候干旱,年降雨量少,荒漠草原是宁夏面积最大的天然草地类型,约占其总面积的 55%<sup>[22]</sup>. 2003 年全面实施禁牧围封,草地生态系统得到恢复. 本研究以不同禁牧封育年限的荒漠草原为研究对象,测定土壤呼吸速率日、季动态变化,分析其与土壤温、湿度等因子的关系,旨在揭示禁牧封育年限变化对草地土壤 CO<sub>2</sub> 排放的作用,以期为荒漠草原生态系统碳平衡估算和碳循环机制提供基础数据,为改善和恢复荒漠草原管理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县西北部的高沙窝镇,地处北纬 37°54′20.55″ ~ 37°58′55.62″,东

经 106°55′47.91″ ~ 107°01′16.68″,海拔 1 422 ~ 1 431 m. 盐池县北部年平均气温为 7.7℃,年日照时数为 2 867.9 h,无霜期 128 d. 盐池县多年降水量为 250 ~ 350 mm,西北部的高沙窝镇仅为 250 mm 左右,降水主要集中在夏秋两季,7 ~ 9 月的降水量占全年降水总量的 62%;该地区多年平均潜在蒸发量为 2 403.7 mm,土壤为风沙土.

试验设荒漠草原封育 11 a (2003 年禁牧封育, N37°55′, E106°59′)、7 a (2007 年禁牧封育, N37°57′, E107°00′) 和 CK (放牧不封育, N37°57′, E106°58′) 荒漠草原这 3 个处理,选取具有代表的均质样地实施观测 (其中 11 a、7 a 禁牧封育前也是放牧状态,草地生境和土壤立地条件与放牧草地基本一致). 封育 11 a 样地主要植被有短花针茅 (*Stipa breviflora*)、蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum* Keng)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*) 等. 封育 7 a 样地的主要植被有短花针茅 (*Stipa breviflora*)、猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*) 等. 未封育 CK 样地的主要植被有猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、老瓜头 (*Cynanchum komarovii*)、短花针茅 (*Stipa breviflora*)、骆驼蓬 (*Peganum harmala* L.) 等草本植物,各处理土壤特性见表 1.

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 观测仪器

土壤呼吸速率采用美国 PP Systems 公司生产的 EGM ~ 4 便携式环境监测仪测定土壤呼吸,每个处理样地各布置 5 个固定样点,样点呈“M”型分布<sup>[23]</sup>,测定时间从当日 20:00 至翌日 20:00,测定时间步长为 2 h,5 个重复,每 15 d 观测一次,观测时间为 2014 年 5 ~ 10 月;在测定土壤呼吸作用的同时,以 ZDR ~ 41 温湿度记录仪测定土壤 5、10、15、20

表 1 不同封育年限荒漠草原土壤特性 (0 ~ 20 cm)

Table 1 Soil characteristics of different recovery stages of desert steppe (0-20 cm)

项目	全氮 /g·kg <sup>-1</sup>	全磷 /g·kg <sup>-1</sup>	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>	速效磷 /mg·kg <sup>-1</sup>	速效钾 /mg·kg <sup>-1</sup>	碱解氮 /mg·kg <sup>-1</sup>	脲酶 /mg·g <sup>-1</sup>	蔗糖酶 /mg·g <sup>-1</sup>	碱性磷酸酶 /mg·g <sup>-1</sup>	过氧化氢酶 /mg·(g·min) <sup>-1</sup>	容重 /g·cm <sup>-3</sup>
11 a	0.63	0.22	5.52	2.59	112.99	17.90	1.23	1.92	0.42	0.18	1.46
7 a	0.58	0.22	5.02	3.06	114.05	15.86	1.15	2.65	0.43	0.18	1.55
CK	0.53	0.24	5.08	2.99	114.31	18.52	1.22	2.71	0.47	0.20	1.51

cm 这 4 个土层的温度, ZDR ~ 20 温湿度记录仪测定 1.5 m 处空气温度、空气相对湿度, 温湿度记录仪 10 min 自采数据一次. 采用烘干法测定 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 15、15 ~ 20 cm 深度的土壤含水量, CEM DT ~ 1301 照度计测定 1.5 m 处光照强度, TES ~ 1307 非色散式红外线二氧化碳测试器测定 1.5 m 处空气 CO<sub>2</sub> 浓度, 16025 便携式风杯风速仪测定 1.5 m 处风速, 地表温度计测定地表温度, 雨量筒测定降雨量.

### 1.2.2 计算方法

将土壤呼吸速率每小时 5 个重复观测的数据平均得到小时的平均值, 将每小时 3 个重复样观测的环境因子平均得到小时平均值, 每小时平均值用于土壤呼吸速率及其环境要素的日变化, 日均值进行平均得月平均值.

土壤呼吸速率和温度间的关系采用指数模型<sup>[24]</sup>来拟合:

$$R_s = ae^{bT}$$

式中,  $R_s$  为平均土壤呼吸速率 [以 CO<sub>2</sub> 计,  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ],  $T$  为平均温度 (°C),  $a$  为 0°C 时土壤呼吸速率 [以 CO<sub>2</sub> 计,  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ],  $b$  为温度反应系数.

土壤呼吸速率与湿度关系采用线性模型和一元二次模型<sup>[25]</sup>来拟合.

线性模型为:

$$R_s = dW + c$$

式中,  $R_s$  为土壤呼吸速率 [以 CO<sub>2</sub> 计,  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ],  $W$  为湿度 (%),  $c$  为截距,  $d$  为水分反应系数.

一元二次模型为:

$$R_s = W^2 + W + c$$

式中,  $R_s$  为土壤呼吸速率 [以 CO<sub>2</sub> 计,  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ],  $W$  为湿度 (%),  $c$  为截距.

$Q_{10}$  代表土壤呼吸的温度敏感性, 是指温度升 10°C 时土壤呼吸速率变化的倍数, 可通过  $Q_{10} = e^{10b}$  来确定<sup>[26, 27]</sup>,  $b$  为温度反应系数.

### 1.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件对数据进行回归分析和 Two-way、One-way ANOVA 方差分析, 并用 LSD 法进行多重比较, 动态曲线采用 Microsoft Excel 2003 绘制.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日变化

荒漠草原不同封育年限下土壤呼吸速率具有较

为明显的单峰曲线日变化规律, 最大值出现在 12:00 ~ 16:00, 最小值出现在 00:00 ~ 06:00; 且日变化曲线存在差异, 整体表现为封育 > 未封育, 其中 6 ~ 8 月表现为封育 11 a > 7 a > CK, 日变化幅度大小因封育年限不同而异 (图 1). 以封育 11 a 样地 8 月土壤呼吸日变幅最大 [0.054 ~ 0.442  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ], 10 月 CK 样地土壤呼吸速率日变幅最小 [0.007 ~ 0.067  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ]. 土壤呼吸速率日变化 5 月和 10 月较 6 ~ 9 月呼吸变化速率平缓, 表明干旱区不同季节不同封育年限土壤呼吸速率日变化存在差异.

### 2.2 不同封育年限土壤呼吸及环境因子季节变化动态

以土壤呼吸为因变量, 不同禁牧封育年限和月份为自变量进行双因素方差分析, 不同禁牧封育年限之间和不同月份之间土壤呼吸均存在显著差异, 封育草原土壤呼吸高于未封育草原. 随着封育年限的增加, CK、封育 7 a 和 11 a 土壤呼吸呈逐步增加的趋势, 4 ~ 10 月生长期平均土壤呼吸速率为 11 a [0.143  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ] > 7 a [0.138  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ] > CK [0.106  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ] (图 2). 土壤呼吸速率季节变幅为封育 11 a 的最大 [0.001 ~ 0.442  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ], 封育 7 a 居中 [0.002 ~ 0.412  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ], CK 最小 [0.000 ~ 0.310  $g \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ ].

由于 0 ~ 5 cm 土层较 5 ~ 10、10 ~ 15、15 ~ 20 cm 土层的土壤温度和含水量日变幅大, 图 2 以 0 ~ 5 cm 土层的土壤温度和湿度进行分析. 封育 11 a、7 a 和 CK 样地空气温度、土壤 5 cm 温度无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 土壤 5 cm 温度高于同期大气温度 (图 2), 这可能是由于该地区位于干旱区且地表浅层土壤类型是沙质土引起的. 封育 11 a、7 a 和 CK 样地土壤含水量处于一个较低的水平, 其中 7 ~ 9 月 0 ~ 5 cm 土壤含水量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而 5 月、6 月、10 月 0 ~ 5 cm 土壤含水量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 这可能是由于研究区降水主要集中在 7 ~ 9 月, 直接影响荒漠草原土壤含水量的缘故.

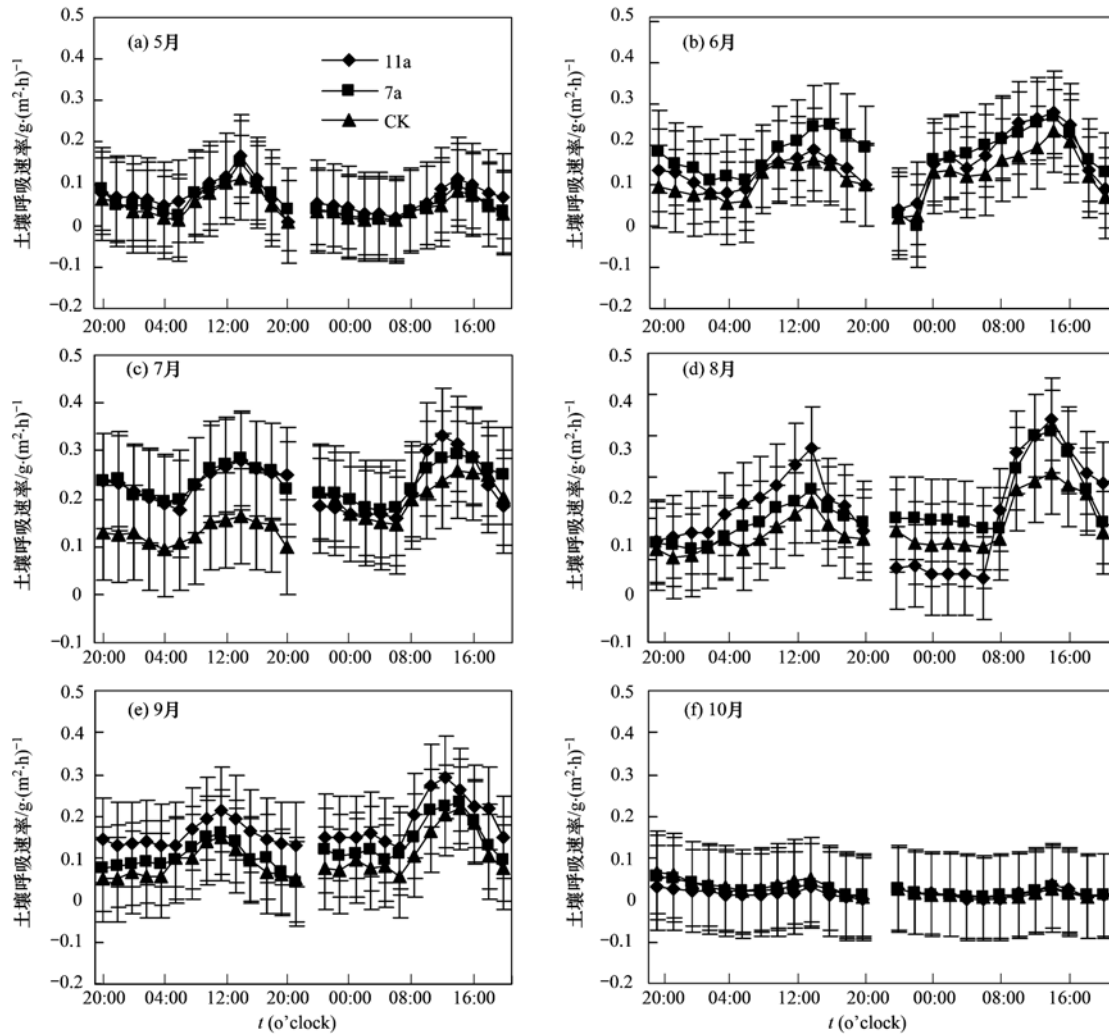
### 2.3 不同封育年限土壤呼吸与环境因子之间的相关性分析

#### 2.3.1 不同封育年限土壤呼吸速率与土壤温度和大气温度的回归分析

基于整个生长季的日变化观测数据分析 (回归分析下同), 由表 2 可知, 封育 11 a、7 a 和 CK 荒漠

草原土壤呼吸速率对土壤温度和大气温度的响应均表现为极显著的指数相关 ( $P < 0.01$ ), 即土壤呼吸速率随着土壤温度和大气温度的增加而增加. 封育 11 a 和 7 a 样地土壤呼吸速率随着土层变深相关性逐渐变强, CK 样地土壤呼吸速率与 5、20 cm 土壤温度相关性大于 10 cm、15 cm 土壤温度, 这与放牧

动物的踩踏地表和采食植物行为对表层土壤的土壤呼吸作用产生的影响有关. 封育 11 a、7 a 和 CK 的温度敏感性系数  $Q_{10}$  均随着土层的加深逐渐变大 (表 2), 且  $Q_{10}$  表现为 11 a (2.728) > 7 a (2.436) > CK (2.086), 说明围栏封育措施有效增加了荒漠草原的温度敏感性系数.



从 a 到 f 依次表示 5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、10 月

图 1 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸不同月份日变化动态

Fig. 1 Diurnal variation dynamics of soil respiration for desert steppe with different closure years in different months

表 2 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸速率与温度间的回归模型及  $Q_{10}$  值 ( $P < 0.01$ )

Table 2 Regression model between soil respiration rate and temperature, and $Q_{10}$ values of desert steppe with different closure years ( $P < 0.01$ )						
项目 <sup>1)</sup>	11 a		7 a		CK	
$T_a$	$R_s = 0.017e^{0.091 T}$	$R^2 = 0.376, Q_{10} = 2.48$	$R_s = 0.021e^{0.082 T}$	$R^2 = 0.405, Q_{10} = 2.27$	$R_s = 0.019e^{0.073 T}$	$R^2 = 0.355, Q_{10} = 2.08$
$T_s$	$R_s = 0.023e^{0.071 T}$	$R^2 = 0.413, Q_{10} = 2.03$	$R_s = 0.030e^{0.060 T}$	$R^2 = 0.425, Q_{10} = 1.82$	$R_s = 0.029e^{0.052 T}$	$R^2 = 0.408, Q_{10} = 1.68$
$T_5$	$R_s = 0.016e^{0.085 T}$	$R^2 = 0.310, Q_{10} = 2.34$	$R_s = 0.019e^{0.078 T}$	$R^2 = 0.335, Q_{10} = 2.18$	$R_s = 0.021e^{0.062 T}$	$R^2 = 0.280, Q_{10} = 1.86$
$T_{10}$	$R_s = 0.012e^{0.100 T}$	$R^2 = 0.311, Q_{10} = 2.72$	$R_s = 0.017e^{0.086 T}$	$R^2 = 0.357, Q_{10} = 2.36$	$R_s = 0.018e^{0.070 T}$	$R^2 = 0.271, Q_{10} = 2.01$
$T_{15}$	$R_s = 0.010e^{0.112 T}$	$R^2 = 0.319, Q_{10} = 3.06$	$R_s = 0.015e^{0.098 T}$	$R^2 = 0.367, Q_{10} = 2.66$	$R_s = 0.015e^{0.082 T}$	$R^2 = 0.263, Q_{10} = 2.27$
$T_{20}$	$R_s = 0.008e^{0.128 T}$	$R^2 = 0.345, Q_{10} = 3.49$	$R_s = 0.010e^{0.115 T}$	$R^2 = 0.394, Q_{10} = 3.16$	$R_s = 0.012e^{0.096 T}$	$R^2 = 0.280, Q_{10} = 2.61$

1)  $T_a$ : 空气温度;  $T_s$ : 土壤表面温度;  $T_5$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{15}$ 、 $T_{20}$ : 5、10、15、20 cm 土壤温度

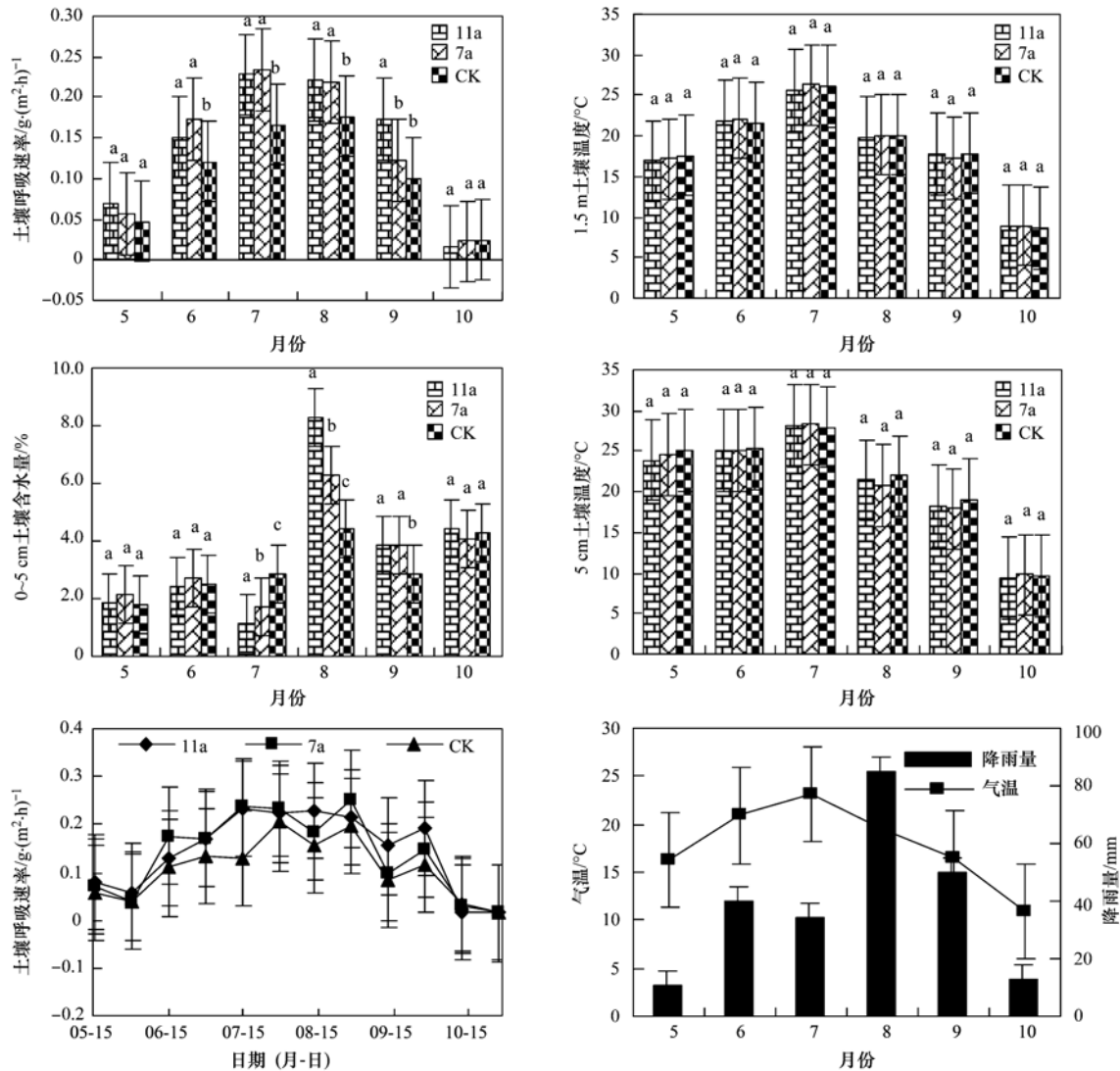


图2 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸和环境因子的季节变化动态比较( $P < 0.05$ )

Fig. 2 Seasonal variation dynamics of soil respiration and the environmental factors of desert steppe with different closure years ( $P < 0.05$ )

### 2.3.2 不同封育年限土壤呼吸速率与空气相对湿度、土壤含水量的回归分析

干旱半干旱地区,土壤湿度的直接来源于降水量的多少,表层土壤含水量变化较深层土壤变化大,并与土壤呼吸速率的关系较为密切.将封育11 a、7 a和CK荒漠草原土壤呼吸与空气相对湿度、不同深度土壤含水量实测数据采用线性、一元二次方程进行回归分析,结果表明一元二次方程拟合效果较好(表3),整个生长季封育11 a、7 a和CK荒漠草原土壤呼吸速与空气湿度、土壤含水量一元二次模型达到显著水平( $P < 0.05$ ,表3).这说明干旱区宁夏荒漠草原土壤呼吸速率与空气湿度和土壤湿度存在阈值效应,低于阈值时增加湿度对土壤呼吸有限制作用,高于阈值时增加湿度对呼吸有促进作用.

### 2.3.3 不同封育年限土壤呼吸速率与空气 $\text{CO}_2$ 浓度、风速、光照的回归分析

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸与空气 $\text{CO}_2$ 浓度、风速、光照的相关性表现一致,封育11 a、7 a和CK荒漠草原土壤呼吸速率与空气二氧化碳呈极显著线性负相关关系( $P < 0.01$ ),与风速呈显著线性正相关关系( $P < 0.05$ ),与光照强度呈极显著线性正相关关系( $P < 0.01$ ,表4).

## 3 讨论

### 3.1 不同封育年限土壤呼吸的日、季动态变化

有研究表明荒漠草原土壤呼吸最大和最小值出现在10:00~16:00和03:00~05:00<sup>[28]</sup>、13:00~17:00和02:00~04:00<sup>[29]</sup>、14:00~16:00和06:00左右<sup>[30]</sup>,本研究中封育11 a、7 a、CK荒漠草原土

表 3 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸速率与土壤水分、空气相对湿度回归模型

Table 3 Regression model between soil respiration rate and soil moisture, relative air humidity of desert steppe with different closure years

项目 <sup>1)</sup>	11 a	7 a	CK
RH <sub>a</sub>	$R_s = 0.001X + 0.173$ $R^2 = 0.040$ , $P = 0.012$ $R_s = -2.376 \times 10^{-5}X^2 + 0.002X + 0.125$ $R^2 = 0.080$ , $P = 0.002$	$R_s = 0.001X + 0.170$ $R^2 = 0.049$ , $P = 0.005$ $R_s = -1.611 \times 10^{-5}X^2 + 0.001X + 0.139$ $R^2 = 0.076$ , $P = 0.002$	$R_s = 0.001X + 0.124$ $R^2 = 0.027$ , $P = 0.040$ $R_s = -1.468 \times 10^{-5}X^2 + 0.001X + 0.095$ $R^2 = 0.057$ , $P = 0.012$
W <sub>5</sub>	$R_s = 0.003X + 0.130$ $R^2 = 0.011$ , $P = 0.199$ $R_s = 0.002X^2 - 0.025X + 0.189$ $R^2 = 0.068$ , $P = 0.005$	$R_s = 0.008X + 0.109$ $R^2 = 0.030$ , $P = 0.032$ $R_s = 0.009X^2 - 0.071X + 0.250$ $R^2 = 0.085$ , $P = 0.000$	$R_s = 0.014X + 0.062$ $R^2 = 0.074$ , $P = 0.001$ $R_s = 0.001X^2 - 0.019X + 0.055$ $R^2 = 0.081$ , $P = 0.002$
W <sub>10</sub>	$R_s = 0.004X + 0.124$ $R^2 = 0.012$ , $P = 0.175$ $R_s = 0.003X^2 - 0.030X + 0.209$ $R^2 = 0.060$ , $P = 0.005$	$R_s = 0.003X + 0.123$ $R^2 = 0.002$ , $P = 0.552$ $R_s = 0.012X^2 - 0.101X + 0.338$ $R^2 = 0.054$ , $P = 0.014$	$R_s = -0.003X + 0.117$ $R^2 = 0.002$ , $P = 0.597$ $R_s = 0.010X^2 - 0.086X + 0.059$ $R^2 = 0.052$ , $P = 0.012$
W <sub>15</sub>	$R_s = 0.001X + 0.136$ $R^2 = 0.001$ , $P = 0.712$ $R_s = 0.004X^2 - 0.044X + 0.249$ $R^2 = 0.076$ , $P = 0.002$	$R_s = -0.012X + 0.206$ $R^2 = 0.049$ , $P = 0.050$ $R_s = 0.002X^2 - 0.033X + 0.260$ $R^2 = 0.055$ , $P = 0.014$	$R_s = -0.20X + 0.208$ $R^2 = 0.238$ , $P = 0.000$ $R_s = 0.007X^2 - 0.091X + 0.364$ $R^2 = 0.354$ , $P = 0.000$
W <sub>20</sub>	$R_s = 0.001X + 0.149$ $R^2 = 0.001$ , $P = 0.700$ $R_s = 0.002X^2 - 0.036X + 0.256$ $R^2 = 0.087$ , $P = 0.001$	$R_s = -0.006X + 0.187$ $R^2 = 0.026$ , $P = 0.046$ $R_s = 0.004X^2 - 0.063X + 0.365$ $R^2 = 0.081$ , $P = 0.002$	$R_s = -0.010X + 0.182$ $R^2 = 0.157$ , $P = 0.000$ $R_s = 0.003X^2 - 0.054X + 0.319$ $R^2 = 0.269$ , $P = 0.000$

1) RH<sub>a</sub>:空气相对湿度; W<sub>5</sub>、W<sub>10</sub>、W<sub>15</sub>、W<sub>20</sub>: 0~5、5~10、10~15、15~20 cm 土壤含水量

表 4 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸速率与其它因子回归模型

Table 4 Regression model between soil respiration rate and other factors of desert steppe with different closure years

项目 <sup>1)</sup>	11 a	7 a	CK
CO <sub>2</sub>	$R_s = -0.001X + 0.446$ $R^2 = 0.126$ , $P = 0.000$	$R_s = -0.001X + 0.503$ $R^2 = 0.136$ , $P = 0.000$	$R_s = -0.001X + 0.400$ $R^2 = 0.136$ , $P = 0.000$
WS	$R_s = 0.011X + 0.121$ $R^2 = 0.042$ , $P = 0.010$	$R_s = 0.012X + 0.110$ $R^2 = 0.071$ , $P = 0.001$	$R_s = 0.006X + 0.092$ $R^2 = 0.035$ , $P = 0.020$
LI	$R_s = 1.293 \times 10^{-6}X + 0.108$ $R^2 = 0.232$ , $P = 0.000$	$R_s = 1.076 \times 10^{-6}X + 0.108$ $R^2 = 0.201$ , $P = 0.000$	$R_s = 8.930 \times 10^{-7}X + 0.081$ $R^2 = 0.226$ , $P = 0.000$

1) CO<sub>2</sub>:空气二氧化碳浓度; WS:风速; LI:光照强度

壤呼吸速率日变化最大值出现在 12:00~16:00, 最小值出现在 00:00~06:00, 与前人研究结果一致, 说明不同禁牧封育年限没有改变土壤呼吸日变化规律. 禁牧封育 2 年<sup>[31]</sup>和 20 年<sup>[32]</sup>的草地土壤呼吸作用最大值出现在生长旺盛时期的 6~7 月, 本试验中封育 11 a、7 a 和 CK 的土壤呼吸季节变化趋势与之基本一致, 宁夏荒漠草原在 2014 年 7 月温度最高降水较少, 而在 8 月生长量大且温度适宜降水较多, 此时土壤呼吸作用达到最大, 说明温度和湿度协同作用影响荒漠草原土壤呼吸作用. 土壤呼吸速率在生长季平均值为 11 a [ $0.143 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > 7 a [ $0.138 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > CK [ $0.106 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ], 封育 11 a、7 a 样地土壤呼吸作用大于 CK 未封育样地, 尤其是 6~8 月存在明显差异 ( $P < 0.05$ ), 这可能是随着禁牧封育年限的增加, 植被恢复及盖度和高度增加<sup>[33]</sup>、促进草地有机碳固定<sup>[34, 35]</sup>、增加土壤酶活性<sup>[36, 37]</sup>, 进而促进荒漠草原土壤呼吸作用随封育年限增加而增加.

### 3.2 土壤呼吸与温度的相关性

土壤呼吸作用在日季动态变化中主要受温度的影响<sup>[38]</sup>, 土壤温度、气温与土壤呼吸的相关性存在

一定的差异. 有研究表明空气温度可以解释土壤呼吸季节变化的 35%~65%<sup>[39]</sup>; 土壤 5 cm 温度是退化草地净交换系统季节变化的驱动因子<sup>[40]</sup>; 土壤温度与土壤呼吸呈指数相关, 是其日变化的主导因素<sup>[41]</sup>. 本研究中封育 11 a、7 a、CK 荒漠草原土壤呼吸速率与温度为指数正相关, 达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 其相关性大小为: 地表温度 ( $R^2$ ): 0.408~0.413) > 空气温度 ( $R^2$ : 0.355~0.376) > 5~20 cm 土壤温度 ( $R^2$ : 0.263~0.394). 温度敏感性系数  $Q_{10}$  则随着土层的加深逐渐变大, 且  $Q_{10}$  值表现为 11 a (2.728) > 7 a (2.436) > CK (2.086). 随着土层深度的增加, CO<sub>2</sub> 含量增加<sup>[42]</sup>、土壤温度更稳定<sup>[43]</sup>, 温度增加有利于 RuBP 羧化速率提高, 同时提高 RuBP 羧化酶再生能力及植物的光饱和速率, 并提高光和产物向下运转<sup>[44]</sup>, 使温度敏感性系数随土层深度增加而递增. 禁牧围封措施促进草地植被恢复, 显著提高地上、地下生物量<sup>[45]</sup>, 进而提高草地固碳能力, 随着封育年限增加, 草地植被盖度、高度及生物量的增加<sup>[20, 21]</sup>, 荒漠草原温度敏感性随之增加.

### 3.3 土壤呼吸与湿度的相关性

除温度之外, 湿度是影响土壤呼吸的另一个重



要因子. 有研究发现土壤水分对土壤呼吸作用的影响大于温度的影响<sup>[46]</sup>, 0~10 cm 土层含水量与土壤呼吸速率的季节动态存在显著的二次回归关系<sup>[28]</sup>, 20~30cm 土壤含水量是影响净生态系统二氧化碳交换日通量的最重要的环境因素<sup>[47]</sup>, 土壤含水量和土壤呼吸速率一元二次模型优于线性、指数模型<sup>[48]</sup>, 本研究中封育 11 a、7 a 和 CK 荒漠草原的土壤呼吸速率与空气、土壤湿度均呈显著一元二次方程相关关系( $P < 0.05$ ), 且优于线性相关, 这与内蒙古荒漠草原研究结果一致<sup>[28, 48]</sup>, 本研究一元二次模型说明荒漠草原土壤呼吸速率对于空气湿度和土壤湿度存在一个阈值, 低于阈值时增加湿度对土壤呼吸有限制作用, 高于阈值时增加湿度对呼吸有促进作用. 本研究中 2014 年 7 月的降雨量、土壤含水量、空气和土壤温度分别达为 34 mm、1.904%、26.03℃、28.15℃, 8 月的分别为 85 mm、6.571%、20.03℃、21.42℃, 由此可知 7 月空气和土壤温度均达到最高, 而降水较少, 8 月降雨和土壤含水量达到最高且温度适宜, 致使土壤呼吸在 8 月达到全年的最大值. 夏季高温在较低土壤含水量条件下, 微生物活性下降, 从而抑制土壤呼吸作用<sup>[49, 50]</sup>, 当土壤含水量成为胁迫因子时, 可能成为土壤呼吸的主要控制因子<sup>[51, 52]</sup>, 由此说明温度和水分的变化成为荒漠草原土壤呼吸作用的限制因子.

### 3.4 土壤呼吸与空气 CO<sub>2</sub> 浓度、风速、光照强度的相关性

有研究表明提高 CO<sub>2</sub> 浓度可以增加植物生长量<sup>[53]</sup>; 提高根系生物量, 促进生长季土壤呼吸增加<sup>[54]</sup>; 但也有发现提高 CO<sub>2</sub> 浓度使根际土壤中水溶性有机碳浓度下降<sup>[55]</sup>; 抑制土壤呼吸作用<sup>[56]</sup>. 光合作用能促进根系和根际微生物活动, 对土壤呼吸作用有促进作用<sup>[57]</sup>, 风速对土壤呼吸速率的作用受植被的高度和结构的影响<sup>[58]</sup>. 本研究中 11 a、7 a 和 CK 荒漠草原土壤呼吸速率与空气二氧化碳呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ), 与风速和光照呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ ), 这与前人研究结果<sup>[56]</sup>基本一致. 由于研究区地处干旱半干旱区, 年降雨量少, 蒸散作用强, 随着 CO<sub>2</sub> 浓度增加, 依据化学反应平衡原理, 呼吸作用的产物 CO<sub>2</sub> 受到抑制; CO<sub>2</sub> 浓度增加促进植物的光合作用<sup>[59]</sup>; 进而有利于含碳化合物向根系运输, 为地下生物活动提供能量<sup>[44]</sup>, 促进土壤酶活性<sup>[36]</sup>, 进而促进土壤呼吸.

## 4 结论

(1) 随着禁牧围封年限的增加, 土壤呼吸作用

呈逐步增加的趋势, 5~10 月生长季土壤呼吸速率均值为 11 a [ $0.143 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > 7 a [ $0.138 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > CK [ $0.106 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]. 土壤呼吸季节变幅大小为 11 a [ $0.001 \sim 0.442 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > 封育 7 a [ $0.002 \sim 0.412 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ] > CK [ $0.000 \sim 0.310 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ].

(2) 随着土层深度的增加温度敏感性系数逐渐增大; 随着围封禁牧年限的增加, 荒漠草原的温度敏感性随之增加, 即 11 a (2.728) > 7 a (2.436) > CK (2.086), 围封禁牧 11 a、7 a 对土壤呼吸的作用表现出优于放牧未封育.

(3) 不同封育年限荒漠草原土壤呼吸作用与温度呈显著指数相关( $P < 0.01$ ), 且相关性大小为: 地表温度 ( $R^2: 0.408 \sim 0.413$ ) > 空气温度 ( $R^2: 0.355 \sim 0.376$ ) > 5~20 cm 土壤温度 ( $R^2: 0.263 \sim 0.394$ ); 与湿度呈一元二次方程相关( $P < 0.05$ ), 与空气 CO<sub>2</sub> 浓度呈线性负相关( $P < 0.01$ ), 与风速、光照强度呈线性正相关( $P < 0.05$ ).

(4) 综上所述, 不同禁牧围封年限荒漠草原土壤呼吸作用主要受 0~20 cm 土壤温度和水分的影 响, 随着禁牧围封年限的增加, 土壤呼吸作用和温度敏感性系数随之增加.

### 参考文献:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.
- [2] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, *et al.* Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands[J]. *Nature*, 2002, **418**(6898): 623-626.
- [3] Prentice I C. Biome modelling and the carbon cycle[A]. In: Heiman M (ed.). *The Global Carbon Cycle* [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. 219-238.
- [4] Whittaker R H, Niering W A. Vegetation of the Santa Catalina mountains, Arizona: V. biomass, production, and diversity along the elevation gradient[J]. *Ecology*, 1975, **56**(4): 771-790.
- [5] Canadell J G, Mooney H A, Baldocchi D D, *et al.* Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: A multitechnique approach for improved understanding[J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(2): 115-130.
- [6] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 11-14.
- [7] 侯扶江, 李广, 常生华. 放牧草地健康管理的生理指标[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(8): 1049-1053.
- [8] 崔晓勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展[J]. *生态学报*, 2001, **21**(2): 315-325.
- [9] Han G D, Hao X Y, Zhao M L, *et al.* Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,

- 2008, **125**(1-4): 21-32.
- [10] Tan Z X, Lal R. Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, **111**(1-4): 140-152.
- [11] 郭然, 王效科, 逯非, 等. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 862-867.
- [12] 张英俊, 杨高文, 刘楠, 等. 草原碳汇管理对策[J]. *草业学报*, 2013, **22**(2): 290-299.
- [13] 石锋, 李玉娥, 高清竹, 等. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响[J]. *草业科学*, 2009, **26**(3): 9-15.
- [14] 曹成有, 邵建飞, 蒋德明, 等. 围栏封育对重度退化草地土壤养分和生物活性的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2011, **32**(3): 427-430.
- [15] 刘凤婵, 李红丽, 董智, 等. 封育对退化草原植被恢复及土壤理化性质影响的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2012, **10**(5): 116-122.
- [16] 欧阳青, 代微然, 任健, 等. 短期封育对滇西北亚高山草甸土壤呼吸速率的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, **30**(16): 7-11.
- [17] Zheng S X, Ren H Y, Li W H, *et al.* Scale-dependent effects of grazing on plant C:N:P stoichiometry and linkages to ecosystem functioning in the Inner Mongolia Grassland [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(12): e51710.
- [18] Liu M, Liu G H, Wu X, *et al.* Vegetation traits and soil properties in response to utilization patterns of grassland in Hulun Buir City, Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, **24**(4): 471-478.
- [19] Wu L, He N, Wang Y, *et al.* Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil after grazing exclusion in *Leymus chinensis* grasslands of Northern China [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(2): 663-668.
- [20] 王蕾, 许冬梅, 张晶晶. 围封年限对荒漠草原植物群落组成和结构的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2013, **2**(5): 5-7.
- [21] 王蕾, 许冬梅, 张晶晶. 封育对荒漠草原植物群落组成和物种多样性的影响[J]. *草业科学*, 2009, **29**(10): 1512-1516.
- [22] 许冬梅, 刘彩凤, 谢应忠, 等. 盐池县草地沙化演替过程中土壤理化特性的变化[J]. *水土保持研究*, 2009, **16**(4): 85-88.
- [23] 陈林, 李学斌, 刘秉儒, 等. 荒漠草原不同植物群落夏季土壤呼吸特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, **26**(11): 178-183.
- [24] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, **413**(6856): 622-625.
- [25] Wildung R E, Garland T R, Buschbom R L. The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, **7**(6): 373-378.
- [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] 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.
- [28] 赵巴音那木拉, 红梅, 梁存柱, 等. 施肥对内蒙古短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(3): 687-694.
- [29] 珊丹, 韩国栋, 赵茉莉, 等. 控制性增温和施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23**(9): 106-112.
- [30] 王珍, 赵茉莉, 韩国栋, 等. 模拟增温及施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, **26**(9): 98-103.
- [31] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉, 等. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子[J]. *环境科学*, 2005, **26**(6): 1-7.
- [32] 李凌浩, 王其兵, 白永飞, 等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, **24**(6): 680-686.
- [33] Song W M, Chen S P, Wu B, *et al.* Vegetation cover and rain timing co-regulate the responses of soil CO<sub>2</sub> efflux to rain increase in an arid desert ecosystem [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **49**: 114-123.
- [34] Li Y J, Zhu Y, Zhao J N, *et al.* Effects of rest grazing on organic carbon storage in *Stipa grandis* steppe in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**(3): 624-634.
- [35] An H, Li G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semi-arid desert grassland, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, **7**(3): 341-349.
- [36] Xiong D, Li Y J, Xiong Y N, *et al.* Influence of boscalid on the activities of soil enzymes and soil respiration [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **61**: 1-5.
- [37] Aragón R, Sardans J, Peñuelas J. Soil enzymes associated with carbon and nitrogen cycling in invaded and native secondary forests of northwestern Argentina [J]. *Plant and Soil*, 2014, **384**(1-2): 169-183.
- [38] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, *et al.* Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2007, **291**(1-2): 15-26.
- [39] 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.
- [40] Du Q, Liu H Z. Seven years of carbon dioxide exchange over a degraded grassland and a cropland with maize ecosystems in a semiarid area of China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **173**: 1-12.
- [41] Zhou X B, Zhang Y M. Seasonal pattern of soil respiration and gradual changing effects of nitrogen addition in a soil of the Gurbantunggut Desert, northwestern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **85**: 187-194.

- [42] 王超, 杨智杰, 陈光水, 等. 土壤垂直剖面的 CO<sub>2</sub> 通量研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, **5**(4): 85-92.
- [43] 涂钢, 刘辉志, 董文杰. 东北半干旱区退化草地土壤温度的日、季变化特征[J]. 高原气象, 2008, **27**(4): 741-748.
- [44] Niu S L, Li Z X, Xia J Y, *et al.* Climatic warming changes plant photosynthesis and its temperature dependence in a temperate steppe of northern China[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, **63**(1-3): 91-101.
- [45] Li Q, Zhou D W, Jin Y H, *et al.* Effects of fencing on vegetation and soil restoration in a degraded alkaline grassland in northeast China[J]. Journal of Arid Land, 2014, **6**(4): 478-487.
- [46] 王凤玉, 周广胜, 贾丙瑞, 等. 水热因子对退化草原羊草恢复演替群落土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(5): 644-649.
- [47] Wang Z, Wang Y H. Carbon flux dynamics and its environmental controlling factors in a desert steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(1): 49-54.
- [48] 李寅龙, 红梅, 白文明, 等. 水、氮控制对短花针茅草原土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(6): 1727-1733.
- [49] Edwards N T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, **39**(2): 361-365.
- [50] Liu W X, Zhang Z, Wan S Q. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland[J]. Global Change Biology, 2008, **15**(1): 184-195.
- [51] 李明峰, 董云社, 齐玉春, 等. 锡林河流域羊草群落春季 CO<sub>2</sub> 排放日变化特征分析[J]. 中国草地, 2003, **25**(3): 9-14.
- [52] 师广旭, 耿浩林, 王云龙, 等. 克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原土壤呼吸及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, **28**(7): 3408-3416.
- [53] Rodriguez J H, Klumpp A, Högy P, *et al.* Physiological response at different plant development stages in glycine max exposed to elevated CO<sub>2</sub> concentrations and fly ash-amended soils[J]. Agricultural Research, 2015, **4**(2): 160-170.
- [54] Lagomarsino A, Lukac M, Godbold D L, *et al.* Drivers of increased soil respiration in a poplar coppice exposed to elevated CO<sub>2</sub>[J]. Plant and Soil, 2013, **362**(1-2): 93-106.
- [55] Fang H J, Cheng S L, Lin E D, *et al.* Elevated atmospheric carbon dioxide concentration stimulates soil microbial activity and impacts water extractable organic carbon in an agricultural soil[J]. Biogeochemistry, 2015, **122**(2-3): 253-267.
- [56] 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[J]. 生态学报, 1997, **17**(5): 469-476.
- [57] Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale[J]. Global Change Biology, 2005, **11**(8): 1298-1304.
- [58] 马文瑛, 赵传燕, 彭守璋, 等. 黑河天涝池五种植被类型土壤呼吸速率动态特征及其影响因子[J]. 生态学报, 2015, **35**(17): 5654-5665.
- [59] 欧阳芬, 郑国伟, 李唯奇. CO<sub>2</sub> 浓度升高和不同氮源对紫茎泽兰生长及光合特性的影响[J]. 植物分类与资源学报, 2014, **36**(5): 611-621.

## CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013 .....	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer .....	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing .....	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing .....	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Chongqing Urban Areas .....	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles .....	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen .....	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO <sub>2</sub> and δ <sup>13</sup> C(CO <sub>2</sub> ) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China .....	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period .....	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water .....	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing .....	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China .....	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS .....	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island .....	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility .....	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan .....	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province .....	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City .....	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China .....	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang .....	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan .....	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City .....	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments .....	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing .....	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China .....	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea natallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay .....	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu .....	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae .....	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus .....	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water .....	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process .....	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide .....	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing .....	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants .....	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor .....	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron .....	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter .....	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source .....	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System .....	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes .....	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin .....	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution .....	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors .....	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains .....	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis .....	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock .....	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic .....	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles .....	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration .....	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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  
欧阳自远 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4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 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	中国国际图书贸易总公司 (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