

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的研究 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu²⁺ 研究 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C 连续标记法 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H₂S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响

王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部农业信息技术重点实验室, 呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081)

摘要: 放牧是影响草地生态系统碳循环过程的重要人类活动因素, 定量研究放牧对土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 的影响, 对于准确评估草地碳收支和碳平衡至关重要. 本研究依托呼伦贝尔草甸草原放牧梯度试验平台, 利用动态密闭气室法 (Li 6400-09) 测量草地不同放牧梯度下的土壤呼吸作用. 结果表明, 不同放牧梯度下土壤呼吸具有明显的季节变化, 且主要受温度因子主导, 7 月土壤呼吸速率达最大; 2011 年生长季 5 ~ 9 月不同放牧强度的平均土壤呼吸速率大小顺序为: G1 (0.23 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) > G0 (未放牧) > G2 (0.34 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) > G3 (0.46 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) > G4 (0.69 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) > G5 (0.92 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$). 与不放牧相比, 重度放牧 (0.92 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) 条件下 Q_{10} 值减少了约 10%, 而轻度放牧 (0.23 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) 条件下 Q_{10} 值略有升高. 总体上, 土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 与放牧强度显著负相关 ($r = 0.944$, $P < 0.05$), 放牧不同程度地降低了土壤呼吸的温度敏感性. 不同放牧梯度下 Q_{10} 值与地上、地下生物量、土壤有机碳和土壤含水量之间存在显著的正相关线性回归关系, 可以解释不同放牧梯度下 Q_{10} 值 71.0% ~ 85.2% 的变异性. 放牧条件下 Q_{10} 值发生变化本质上是生物因素和环境因子共同作用的结果.

关键词: 放牧强度; 草甸草原; 土壤呼吸; 温度; Q_{10}

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1909-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.05.039

Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe

WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, YAN Yu-chun, XIN Xiao-ping

(Hulunber Grassland Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Agri-Informatics, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Grazing is one of the major human activities which lead to disturbance on grassland ecosystem. Quantifying the effect of grazing on the temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}) is essential for accurate assessment of carbon budget in grassland ecosystem. This study was conducted on the grazing gradients experiment platform in Hulunber meadow steppe. Soil respiration was measured by a dynamic closed chamber method (equipped with Li 6400-09, Lincoln, NE, USA) during the growing season in 2011. The results showed that soil respiration had significant seasonal variation and the maximum occurred in July, which was mainly dominated by temperature. The order of average soil respiration during the period from May to September in different treatments was G1 > G0 > G2 > G3 > G4 > G5. Comparing with non-grazing treatment, Q_{10} under heavy grazing conditions (0.92 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) was reduced by about 10%, and was increased a little under light grazing conditions (0.23 $\text{Au}\cdot\text{hm}^{-2}$). There was a significant negative correlation between Q_{10} and grazing intensities ($r = 0.944$, $P < 0.05$). Grazing could decrease the temperature sensitivity of soil respiration to different degrees. The Q_{10} under different grazing gradients had positive linear regression relationships with aboveground biomass, belowground biomass, soil organic carbon and soil moisture. They could explain 71.0% - 85.2% variations of Q_{10} . It was suggested that the variation of Q_{10} was mainly determined by the change of biotic and environmental factors due to grazing.

Key words: grazing intensity; meadow steppe; soil respiration; temperature; Q_{10}

土壤呼吸是陆地生态系统土壤碳库向大气释放 CO_2 的主要途径, 约占全球碳交换量的 25%, 是全球碳循环过程的重要环节^[1,2]. 温度是土壤呼吸作用的主导影响因子之一^[3,4], 土壤呼吸对温度变化的响应程度用温度敏感性系数 Q_{10} 表示, 即温度每升高 10℃ 土壤呼吸增加的倍数. 在利用生态模型模拟大尺度碳循环时, Q_{10} 常被看作为一个常数, 如 Century 模型、TEM 模型等^[5,6]. 事实上, Q_{10} 值并不是个固定值, 不仅在时间和空间上存在着差异, 而且在不同地理位置和不同生态系统类型之间也存在很

大变率^[7,8], 对 Q_{10} 不同的赋值会直接影响到模型输出结果的可靠性^[3]. 因此, 精确量化 Q_{10} 值对利用生态模型进行碳循环和碳平衡研究具有重要意义.

放牧作为草地利用的主要方式之一, 是影响草

收稿日期: 2013-09-21; 修订日期: 2013-11-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB833502); 国家自然科学基金项目 (41101216); 国际科技合作项目 (2012DFA31290); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201003061, 201003019); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD13B07)

作者简介: 王旭 (1978 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为草地碳循环, E-mail: wangxu01@caas.cn

* 通讯联系人, E-mail: xinxp@sina.com

地生态系统碳循环过程的重要人类活动因素. 放牧家畜主要通过采食、践踏等方式,对草地微环境、生物量、凋落物和土壤养分等造成显著影响^[9~11],进而对草地土壤呼吸过程产生重要影响. 不少研究表明^[12~14],放牧显著降低土壤呼吸强度和温度敏感性,但仍缺乏放牧对土壤呼吸的温度敏感性影响的定量化研究,放牧仍然是草原碳收支评估的不确定因素之一^[15]. 本研究拟以呼伦贝尔草甸草原不同放牧梯度观测试验为基础,分析不同放牧强度下土壤呼吸温度敏感性及其影响因子,以期对定量研究放牧对 Q_{10} 的影响提供重要参考.

1 材料与方 法

1.1 研究区与样地概况

本研究依托呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站进行,试验站位于内蒙古自治区呼伦贝尔市海拉尔区谢尔塔拉镇,地理位置 N 49°19', E 120°03',海拔约 628 m. 该区域地处大兴安岭西麓平缓丘陵地带,属于温带半干旱大陆性气候,年均气温 -5 ~ 0℃,昼夜温差和年温较差大,最冷月(1月)平均气温在 -18 ~ -30℃ 之间,最热月(7月)平均气温在 16 ~ 21℃ 之间,大于 10℃ 积温 1 780 ~ 1 820℃,无霜期 85 ~ 155 d; 年降水量 250 ~ 350 mm 左右,且多集中在 6 ~ 9 月,占全年降水的 75%. 代表性植被类型为温带草甸草原,主要物种有羊草 (*Leymus chinensis*)、贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*)、日荫菅 (*Carex pediformis*)、蓬子菜 (*Galium verum*)、狭叶柴胡 (*Bupleurum scorzonifolium*)、线叶菊 (*Filifolium sibiricum*) 等,土壤类型主要为黑钙土或暗栗钙土.

本研究设置在放牧试验样地,距站区约 5 km,占地面积 90 hm²,于 2009 年围封开展放牧试验,围封前为自由放牧状态,主要放牧家畜品种为三河牛. 放牧试验设置 6 个水平的放牧梯度处理,包括对照 G0 (无放牧)、载畜率 G1 (0.23 Au·hm⁻²)、G2 (0.34 Au·hm⁻²)、G3 (0.46 Au·hm⁻²)、G4 (0.69 Au·hm⁻²) 和 G5 (0.92 Au·hm⁻²),其中以 500 kg 肉牛为一个标准家畜牛单位 (Au). 按照当地实际载畜量 0.46 Au·hm⁻² 划分,G1 为轻度放牧,G2、G3 为中度放牧,G4、G5 为重度放牧. 每个梯度设置 3 个重复,共 18 个小区,每个小区面积 5 hm². 每年 6 月初开始放牧,10 月初终止放牧,为期约 120 d.

1.2 研究方法

2011 年 5 ~ 9 月,利用动态密闭气室 CO₂ 红外

线分析法 (IRGA) 测量土壤呼吸,间隔 10 d 测量 1 次. 观测仪器为 Li 6400 及 Li 6400-09 气室 (Lincoln, NE, USA),测量一般在上午 09:00 ~ 11:00 之间进行. 提前 24 h 在每个试验小区内随机放置 4 个 PVC 土壤环 (直径 10 cm),间隔约 50 m,PVC 环下沿插入土壤 2 ~ 3 cm,去除环内地上绿色植物体,尽量减少土壤扰动.

土壤温度用仪器自带热电偶温度探头进行测量,测量深度为 5 cm; 土壤含水量利用烘干法,在 105℃ 温度下烘至恒重,取样深度为 0 ~ 10 cm. 生长旺季的 8 月初,在小区内随机选取 5 个 1 m × 1 m 大小样方,分别采集地上绿色植物部分和植物根系,65℃ 下烘干称重,即为地上生物量和地下生物量,其中地下根系取样深度为 0 ~ 60 cm (占根系总量 80% ~ 90%)^[16]. 同时,取深度 0 ~ 10 cm 土壤样品进行实验室理化分析,土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加加热法; 土壤全氮采用半微量凯氏定氮法.

1.3 数据分析

利用 Lloyd 等^[17] 的模型描述土壤呼吸与温度的关系 [式(1)],以及 Q_{10} 计算方法 [式(2)]:

$$R_s = ae^{bt} \quad (1)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中, R_s (soil respiration) 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$]; T (temperature) 为土壤温度 (°C); a 为 0℃ 时的土壤呼吸速率; b 为温度响应系数; Q_{10} 为土壤呼吸温度敏感性. 本研究中数学统计用软件 SPSS 13.0 进行分析,图表用 EXCEL 软件完成.

2 结果与分析

2.1 不同放牧梯度下土壤呼吸速率

图 1 可以看出,不同放牧梯度下土壤呼吸存在明显的季节变化特征,从生长季初期 5 月开始,土壤呼吸速率随着温度的升高而增加,7 月土壤呼吸速率达最大,之后逐步降低,9 月土壤呼吸速率为生长季最小. 总体上,生长季 5 ~ 9 月土壤呼吸与温度变化趋势一致,尤其与表层 5 cm 土壤温度显著相关 (表 1),这说明不同放牧梯度下土壤呼吸的季节变化主要受温度因子主导.

另外,生长季不同放牧梯度之间土壤呼吸强度存在差异,其中轻度放牧 G1 处理平均土壤呼吸速率最大 [$3.62 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$],其次为对照 G0 处理 [$3.23 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$],然后依次为处理 G2 [$2.97 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], G3 [$2.74 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], G4 [$2.48 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$],重度

表 1 不同放牧梯度下土壤呼吸与气温 (T_a)、5 cm 土壤温度 (T_s) 的相关系数 (R)
Table 1 Correlation coefficients (R) between soil respiration and air temperature (T_a), soil temperature at 5 cm depth (T_s) under different grazing intensities

项目	G0	G1	G2	G3	G4	G5
$R-T_a$	0.341	0.442	0.371	0.315	0.279	0.266
$R-T_s$	0.547*	0.644*	0.618*	0.587*	0.534*	0.497*
n	14	14	14	14	14	14

1) $R-T_a$ 、 $R-T_s$ 分别表示土壤呼吸与气温、土壤温度的相关系数, * 代表显著水平为 $P < 0.05$

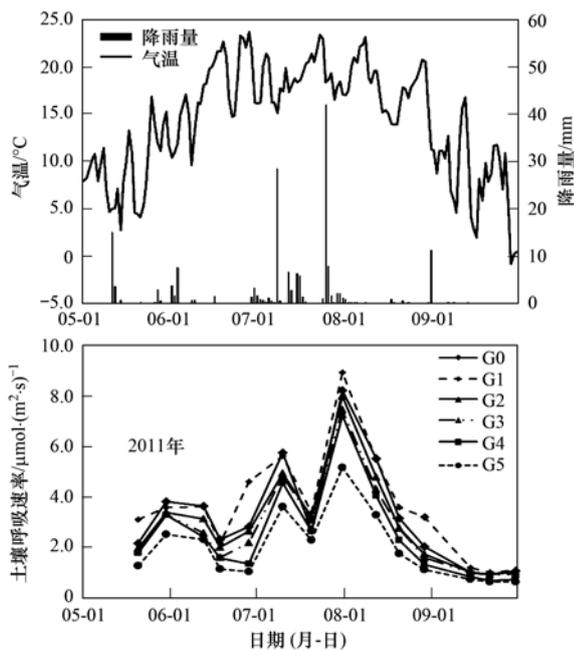


图 1 不同放牧梯度土壤呼吸速率季节变化
Fig. 1 Seasonal variation of soil respiration under different grazing intensities

放牧 G5 处理值最小为 $1.97 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 方差分析结果表明, 仅 G1 和 G5 处理土壤呼吸速率存在显著差异 ($P < 0.05$), 其他处理之间差异不显著.

2.2 不同放牧梯度下土壤呼吸的温度敏感性 (Q_{10})

利用 Lloyd 等^[17]的指数关系模型: $R_s = ae^{bT}$, T 为 5 cm 土壤温度, 计算不同放牧梯度下的 Q_{10} 值 (如表 2), 可以看出, 除轻度放牧处理 (G1) 下 Q_{10} 值 (2.41) 略高于对照 G0 (不放牧) 处理 ($Q_{10} = 2.36$) 外, 其他放牧梯度下的 Q_{10} 值均有不同程度降低, 其中, 重度放牧 (G5) 条件下 Q_{10} 降至 2.14, 减少约 10%. 相关分析结果表明: 不同放牧强度与土壤呼吸的温度敏感性呈显著负相关关系 ($r = 0.944$, $P < 0.05$). 总体上, 放牧减小了土壤呼吸的温度敏感性, 即随着放牧强度增加, Q_{10} 值逐渐减小.

2.3 Q_{10} 与生物和非生物因子的关系

图 2 表明, 不同放牧梯度下土壤呼吸的温度敏感性 (Q_{10}) 与地上生物量、地下生物量、土壤有机碳含量和土壤含水量之间具有显著的正相关线性回归关系 ($P < 0.05$), R^2 值分别为 0.785、0.852、

表 2 不同放牧梯度下土壤呼吸的指数模型参数及 Q_{10} 值¹⁾

Table 2 Parameters for the exponential model of soil respiration and Q_{10} values under different grazing intensities

放牧强度	$R_s = ae^{bT}$		R^2	P	n	Q_{10}
	a	b				
G0	0.692	0.086	0.437	0.010	14	2.36
G1	0.733	0.088	0.504	0.004	14	2.41
G2	0.637	0.083	0.463	0.007	14	2.29
G3	0.634	0.081	0.414	0.013	14	2.25
G4	0.532	0.079	0.354	0.025	14	2.20
G5	0.463	0.076	0.357	0.024	14	2.14

1) G0、G1、G2、G3、G4 和 G5 分别代表放牧强度为不放牧、0.23、0.34、0.46、0.69、0.92 $\text{Au} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理

0.710 和 0.844; 与土壤全氮含量之间相关关系不显著 ($P > 0.05$). 利用上述单因子线性回归关系, 可以解释不同放牧梯度下 Q_{10} 值 71.0% ~ 85.2% 的变异性.

3 讨论

3.1 不同放牧强度对土壤呼吸作用的影响

一般研究认为, 土壤呼吸随着放牧强度增加而降低^[18]. 而本研究中, 除轻度放牧处理 G1 ($0.23 \text{ Au} \cdot \text{hm}^{-2}$) 土壤呼吸速率大于 G0 未放牧对照处理外, 其他处理土壤呼吸与放牧强度的关系仍遵循这一规律, 这一特征与杨阳等^[19]在内蒙古 3 种不同类型草原以及李玉强等^[20]在科尔沁沙质草地的研究结果相似, 即轻度放牧条件下土壤呼吸强度反而升

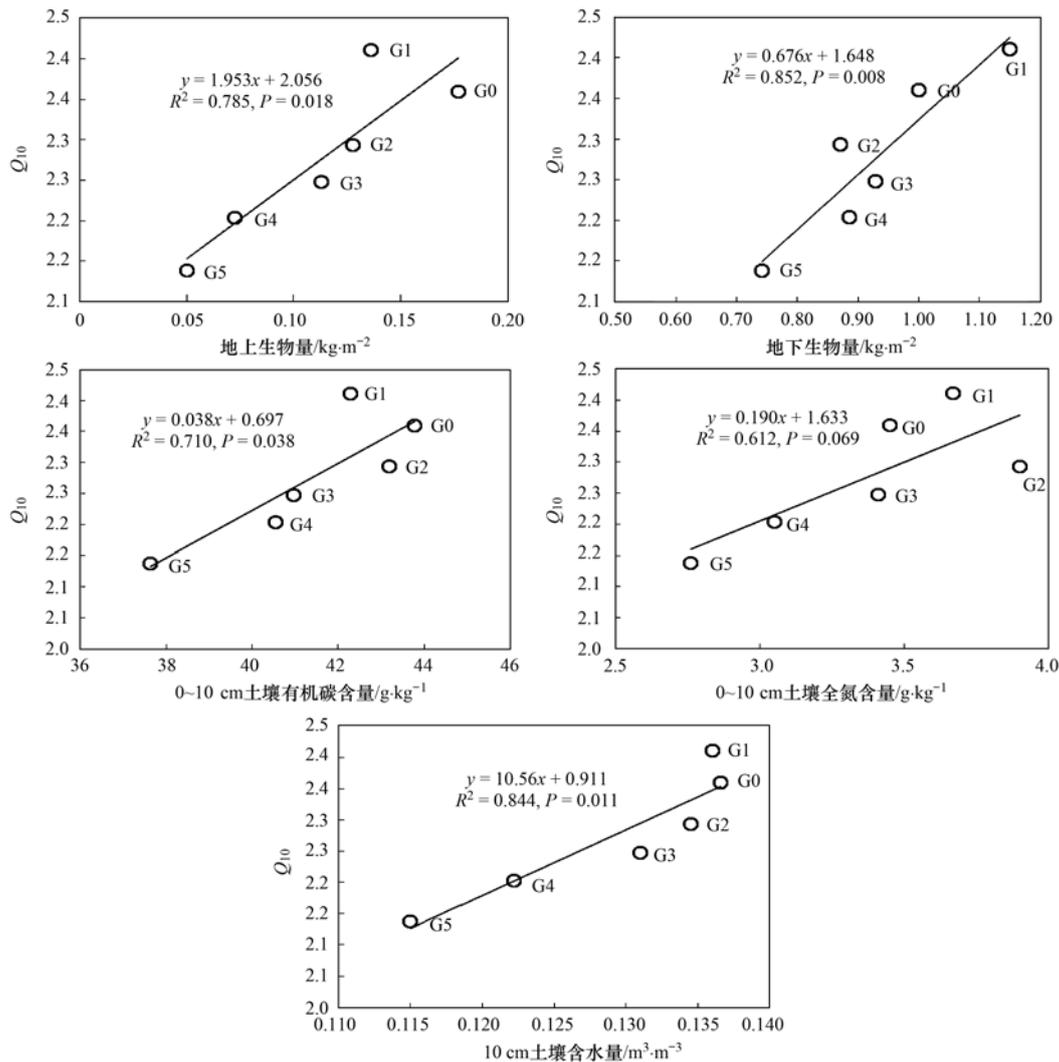


图 2 Q_{10} 与地上生物量、地下生物量、土壤有机碳、全氮和土壤含水量的关系

Fig. 2 Relationships between Q_{10} and aboveground biomass, belowground biomass, soil organic carbon content, soil total N content and soil water content

高。其原因在于轻度放牧情况下,草地地下生物量变化不明显,甚至有增加现象^[20],如本试验中(图2),轻度放牧 G1 处理下的地下生物量($1.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)反而大于不放牧 G0 处理($1.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$);另外采食动物适度的啃食和践踏作用,一方面可能刺激了根系活动能力,改善植被-土壤微环境,促进凋落物分解^[14];另一方面,践踏作用破坏了土壤的表层结构,加速土壤孔隙二氧化碳的释放;上述原因综合作用导致了轻度放牧情况下出现土壤呼吸反而增强的现象。但随着放牧强度继续增加到一定阈值后,地上、地下生物量和凋落物输入量大幅减少,土壤有机质含量降低,土壤环境条件发生改变,导致土壤呼吸强度持续减少。从本研究结果来看,当放牧强度大于 $0.23 \text{ Au} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤呼吸速率开始趋

于降低,可以认为 $0.23 \text{ Au} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸由升转降的放牧强度阈值。

3.2 不同放牧强度对土壤呼吸温度敏感性的影响

土壤呼吸的主要组分包括自养呼吸(根呼吸)和异养呼吸(微生物呼吸),而这二者对温度变化反应比较敏感,直接影响土壤呼吸的温度敏感性^[21,22],过度放牧最直接的后果是导致地上生物量和根系量大幅减少,自养呼吸强度下降,其对温度变化的敏感性降低;而地上生物量和凋落物量减少,进一步抑制了土壤有机碳输入,呼吸底物供应减少,因而土壤微生物数量和活性降低,同样削弱了异养呼吸的温度敏感性,最终导致土壤呼吸的温度敏感性降低^[18]。本研究结果也表明,除轻度放牧 G1 外, Q_{10} 值一般随着放牧强度增加而减小,且与地上、地

下生物量和土壤有机碳含量等因子密切正相关(图 2),也就是说放牧导致的地上、地下生物量减少和有机质输入降低是草地土壤呼吸 Q_{10} 值降低的主要原因。对于轻度放牧 G1 处理 ($0.23 \text{ Au}\cdot\text{hm}^{-2}$) 而言,尽管地上生物量略有减少,但与对照处理相比,地下生物量反而略有增加(图 2),这在短期内可能提高了根系自养呼吸的温度敏感性,所以 Q_{10} 值略有升高。

另外,环境因子对 Q_{10} 值也有重要影响,放牧导致植被覆盖和凋落物减少,造成表层土壤温度升高,土壤含水量下降^[14],而温度和水分不仅影响植物根系、土壤微生物数量和活性,而且还调控着底物的供应状况^[22]。温度对呼吸底物有效性、呼吸酶与底物的亲和力,以及最大反应速度等有直接影响;而水分则影响呼吸基质扩散能力,干旱限制了土壤呼吸底物和胞外酶的扩散,抑制微生物数量和活性,导致土壤异养呼吸温度敏感程度下降^[18]。研究认为, Q_{10} 值与土壤含水量之间具有正相关关系^[23~25],这与本研究结论一致(图 2),放牧强度增加导致土壤含水量减少, Q_{10} 值随之降低。因此,放牧条件下土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 发生改变是生物因素和环境因子共同作用的结果。

本研究以呼伦贝尔草甸草原肉牛放牧梯度试验为例,利用生物量、土壤有机碳和土壤含水量的单因子线性回归模型可以解释不同放牧梯度下 Q_{10} 值 71.0% ~ 85.2% 的变异性,尽管这些经验模型在可靠性验证方面缺乏普适性,但这为量化研究和估算草地生态系统不同放牧强度下土壤呼吸及其温度敏感性提供了重要参考。由于本研究结果在放牧试验进行 3 a 后进行观测的基础上得到的,随着放牧试验年限增加,不同放牧梯度之间的差异性会逐渐增大,放牧对土壤呼吸及其温度敏感性的影响仍需作进一步研究。

4 结论

(1) 不同放牧梯度下土壤呼吸速率存在差异,大小顺序依次为: $G1 > G0 > G2 > G3 > G4 > G5$,其中轻度放牧 G1 大于对照不放牧处理 G0,这与其地下生物量增加有关,可以认为 $0.23 \text{ Au}\cdot\text{hm}^{-2}$ 是呼伦贝尔草甸草原随放牧强度增加,土壤呼吸由升转降的阈值。

(2) Q_{10} 值一般随放牧强度增加而降低,它与地上生物量、地下生物量、土壤有机碳和土壤含水量之间具有线性正相关关系,利用单因子线性回归方

程可以解释 Q_{10} 值 71.0% ~ 85.2% 的变异性。放牧条件下土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值发生变化是生物因素和环境因子共同作用的结果。

参考文献:

- [1] Bouwman A F, Germon J C. Special issue: Soils and climate change: introduction [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**: 219.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Pangle R E, Seiler J. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO_2 efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(S1): 85-96.
- [5] Schimel D, Melillo J, Tian H Q, et al. Contribution of increasing CO_2 and climate to carbon storage by ecosystems in the United States [J]. *Science*, 2000, **287**(5460): 2004-2006.
- [6] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**(S1): 1-15.
- [7] Reichstein M, Bednorz F, Broll G, et al. Temperature dependence of carbon mineralisation: conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(7): 947-958.
- [8] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, et al. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(2): 161-169.
- [9] 高英志, 韩兴国, 汪诗平. 放牧对草原土壤的影响 [J]. *生态学报*, 2004, **24**(4): 790-797.
- [10] Yan R R, Xin X P, Wei Z J, et al. Influences of various grazing systems on community biomass of a desert grassland in Inner Mongolia, China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2012, **4**(4): 303-309.
- [11] 王明君, 赵萌莉, 崔国文, 等. 放牧对草甸草原植被和土壤的影响 [J]. *草地学报*, 2010, **18**(6): 758-762.
- [12] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO_2 efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(4): 761-775.
- [13] 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.
- [14] 邓钰, 柳小妮, 闫瑞瑞, 等. 呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸及其影响因子对不同放牧强度的响应 [J]. *草业学报*, 2013, **22**(2): 22-29.

- [15] 马涛,董云社,齐玉春,等. 放牧对内蒙古羊草群落土壤呼吸的影响[J]. 地理研究, 2009, **28**(4): 1040-1046.
- [16] 李怡,韩国栋. 放牧强度对内蒙古大针茅典型草原地下生物量及其垂直分布的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, **32**(2): 89-92.
- [17] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Functional Ecology*, 1994, **8**(3): 315-323.
- [18] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, *et al.* Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, **36**(2): 237-243.
- [19] 杨阳,韩国栋,李元恒,等. 内蒙古不同草原类型土壤呼吸对放牧强度及水热因子的响应[J]. 草业学报, 2012, **21**(6): 8-14.
- [20] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤呼吸、碳平衡与碳储量[J]. 草业学报, 2006, **15**(5): 25-31.
- [21] 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.
- [22] Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} [J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(2): 154-164.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行