

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响 ..... 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)  
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019 ~ 2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 ..... 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)  
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 ..... 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)  
2015 ~ 2020 年中国城市 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染时空演变特征 ..... 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)  
2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染时空特征分析 ..... 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)  
2000 ~ 2020 年中国典型经济区 PM<sub>2.5</sub> 时空变化及其与植被景观格局的关系 ..... 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)  
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 ..... 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)  
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 ..... 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)  
西安冬季 PM<sub>2.5</sub> 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 ..... 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)  
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 ..... 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)  
伊犁河谷核心区春季 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析 ..... 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)  
基于高空间分辨率的郑州市城镇居民 PM<sub>2.5</sub> 暴露浓度与健康风险变化评估 ..... 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)  
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 ..... 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)  
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)  
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析 ..... 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)  
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势 ..... 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)  
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析 ..... 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)  
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O<sub>3</sub> 生成特征 ..... 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)  
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 ..... 李少林, 王齐齐 (1985)  
北京市减排协同控制情景模拟和效应评估 ..... 俞珊, 张双, 张增杰, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)  
基于不同排放清单的长三角人为 CO<sub>2</sub> 排放模拟 ..... 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)  
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 ..... 卓海华, 姜保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)  
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 ..... 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)  
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 ..... 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘辉, 张亚宁 (2040)  
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 ..... 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)  
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 ..... 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)  
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 ..... 张静, 胡愈忻, 胡圣, 黄杰 (2072)  
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 ..... 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)  
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素 ..... 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)  
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 ..... 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)  
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 ..... 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)  
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (*Sinularia microclavata*) 共附生细菌群落结构和功能的影响 ..... 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)  
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 ..... 严棋 (2136)  
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 ..... 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)  
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 ..... 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)  
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 ..... 辛勃, 单超, 吕路 (2168)  
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 ..... 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)  
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 ..... 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)  
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 ..... 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)  
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 ..... 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)  
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 ..... 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)  
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 ..... 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)  
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测 ..... 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)  
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)  
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析 ..... 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)  
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 ..... 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)  
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 ..... 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)  
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 ..... 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)  
不同海拔鳧箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测 ..... 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏卢璐, 马飞 (2304)  
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 ..... 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)  
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 ..... 刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)  
磷渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 ..... 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)  
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 ..... 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹国帅 (2348)  
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 ..... 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)  
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 ..... 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)  
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 ..... 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)  
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 ..... 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)  
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 ..... 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)  
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

# 短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响

江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌\*

(兰州大学草地农业科技学院, 草地创新与草地农业生态系统国家重点实验室, 农业农村部草牧业创新重点实验室, 草地农业教育部工程研究中心, 兰州 730020)

**摘要:** 为探究短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸及其组分的影响, 于2019年6~8月采用随机区组设计, 设置氮添加[ $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , N]、磷添加[ $5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , P]、氮磷混施[ $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  N,  $5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  P, NP]、对照(CK)和完全对照(CK')这5个处理, 测定了土壤总呼吸速率及其组分。结果表明, 氮添加对土壤总呼吸和异养呼吸的降低速率均低于磷添加[ $-16.71\%$  vs. (相对照, 下同)  $-19.20\%$ ;  $-4.41\%$  vs.  $-13.05\%$ ], 但对自养呼吸的降低速率高于磷添加( $-25.03\%$  vs.  $-23.36\%$ ), 而氮磷混施则对土壤总呼吸速率无显著影响。土壤总呼吸速率及其组分与土壤温度均呈显著的指数相关, 其中氮添加降低了呼吸速率的温度敏感性( $Q_{10}$ :  $-5.64\% \sim 0.00\%$ ), 而磷添加增加了 $Q_{10}$  ( $3.38\% \sim 6.98\%$ ), 氮磷混施降低了自养呼吸速率但增加了异养呼吸速率的 $Q_{10}$  ( $16.86\%$ ), 从而降低了土壤总呼吸速率的 $Q_{10}$  ( $-2.63\% \sim -2.02\%$ )。土壤pH、土壤全氮和根系磷含量与自养呼吸速率均具有显著相关性( $P < 0.05$ ), 而与异养呼吸速率无显著相关, 且根系氮含量只与异养呼吸速率呈显著负相关( $P < 0.05$ )。总体上, 自养呼吸速率对氮添加更加敏感, 而异养呼吸速率对磷添加更加敏感, 氮或磷添加均显著降低了土壤总呼吸速率, 而氮磷混施并未显著影响土壤总呼吸速率, 此结果可为准确评估亚高山草地土壤碳排放提供科学依据。

**关键词:** 氮添加; 磷添加; 氮磷混施; 土壤总呼吸速率; 异养呼吸速率; 自养呼吸速率

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2283-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205177

## Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains

JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, ZHAO Chuan-yan, LI Wei-bin\*

(State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Education Engineering Research Center of Grassland Industry, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of short-term nitrogen and phosphorus addition on soil respiration and its components in a subalpine grassland located on the Qilian Mountains, a random block design of nitrogen [ $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , N], phosphorus [ $5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ , P], nitrogen and phosphorus addition [ $10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  N and  $5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$  P, NP], the control (CK), and complete control (CK') was conducted from June to August 2019, and total soil respiration and its component respiration rates were measured. The results showed that nitrogen addition reduced soil total respiration and heterotrophic respiration rates at a lower rate than P addition [ $-16.71\%$  vs.  $-19.20\%$ ;  $-4.41\%$  vs.  $-13.05\%$ ], but the rate of decrease in autotrophic respiration was higher than that of P addition ( $-25.03\%$  vs.  $-23.36\%$ ); N and P mixed application had no significant effect on soil total respiration rate. The total soil respiration rate and its components were significantly exponentially correlated with soil temperature, and the temperature sensitivity of soil respiration rate was decreased by nitrogen addition ( $Q_{10}$ :  $-5.64\% \sim 0.00\%$ ). P increased  $Q_{10}$  ( $3.38\% \sim 6.98\%$ ), and N and P reduced autotrophic respiration rate but increased heterotrophic respiration rate  $Q_{10}$  ( $16.86\%$ ) and decreased total soil respiration rate  $Q_{10}$  ( $-2.63\% \sim -2.02\%$ ). Soil pH, soil total nitrogen, and root phosphorus content were significantly correlated with autotrophic respiration rate ( $P < 0.05$ ) but not with heterotrophic respiration rate, and root nitrogen content was significantly negatively correlated with heterotrophic respiration rate ( $P < 0.05$ ). In general, autotrophic respiration rate was more sensitive to N addition, whereas heterotrophic respiration rate was more sensitive to P addition. Both N and P addition significantly reduced soil total respiration rate, whereas N and P mixture did not significantly affect soil total respiration rate. These results can provide a scientific basis for the accurate assessment of soil carbon emission in subalpine grassland.

**Key words:** N addition; P addition; N and P mixed application; total soil respiration rate; heterotrophic respiration rate; autotrophic respiration rate

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,其储量甚至高于植被和大气碳库的总和<sup>[1]</sup>,因此土壤碳库微小的变化就可对大气 $\text{CO}_2$ 浓度产生巨大影响<sup>[2]</sup>,改变全球变暖的进程。土壤呼吸是土壤碳库释放至大气的主要途径<sup>[3]</sup>,按组成可分为植物根系和根际微生物产生的自养呼吸以及凋落物和土壤有机质分解产生的异养呼吸<sup>[4,5]</sup>。我国草地面积约占国土面积的30.5%<sup>[6]</sup>,生态系统相对脆弱,极易受到人类活动和全球变化的影响。自工业革命以来,由于人工肥料的大量使用、各种燃烧过程中形成的活性氮以及

岩石风化和灰尘中产生的大气磷<sup>[7]</sup>,促使氮磷在陆地生态系统中的有效性急剧上升<sup>[8]</sup>,已对陆地生态系统产生了明显影响<sup>[9]</sup>。一般而言,土壤中富集的氮磷能够缓解植物根系的营养限制,促进植物光合作用<sup>[10]</sup>,改变植物对根系光合产物的分配比例及细

收稿日期: 2022-05-15; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 甘肃省青年科技基金项目(21JR7RA517); 中央高校优秀青年教师科研创新项目(lzujbky-2021-12)

作者简介: 江原(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤碳循环与全球变化, E-mail: jiangy21@lzu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: liweibin@lzu.edu.cn

根的生长速率<sup>[11,12]</sup>,进而影响根系自养呼吸.此外,氮磷富集能够改变土壤的酸缓冲力<sup>[13]</sup>,影响土壤微生物群落的组成和活性<sup>[14]</sup>,进而改变异养呼吸速率<sup>[15]</sup>.目前,我国关于氮磷添加对土壤呼吸及其组分的研究大多集中于青藏高原高寒草甸<sup>[16]</sup>、内蒙古草原<sup>[17]</sup>和黄土高原退耕草地<sup>[18]</sup>,且研究结果间并不统一.

氮磷添加对土壤总呼吸速率的影响包括正效应<sup>[18]</sup>、负效应<sup>[19]</sup>和没有影响<sup>[20]</sup>这3种作用方式,这种差异主要与生态系统类型、土壤中氮磷的本底有效性、施肥水平和试验持续时间有关<sup>[21]</sup>.尽管单施氮/磷对土壤呼吸速率影响的研究已经受到学术界的普遍关注,但氮与磷添加产生的协同作用也不应被忽视.一项全球范围的整合分析发现,随着大气氮沉降的增加,加剧了土壤磷素有效性对植物生物量的限制<sup>[22]</sup>,而氮磷混施可以改变单一氮添加对陆地生态系统的影响<sup>[23]</sup>.同样,额外的氮添加也会改变土壤呼吸速率对磷添加的响应趋势<sup>[18]</sup>.尤其是在高海拔氮、磷有限的草地生态系统中,已有研究表明氮磷混施显著降低了异养呼吸速率和土壤总呼吸速率<sup>[24]</sup>.此外,一项在青藏高原高寒草甸的研究发现氮磷混施提高了自养呼吸速率,但抑制了异养呼吸速率,使得土壤总呼吸速率无显著变化<sup>[20]</sup>.因此,为更好地探讨氮磷添加如何驱动土壤呼吸,有必要就特定的生态系统开展针对性的研究.

祁连山生态地位突出,是我国西北内陆重要的生态安全屏障<sup>[25]</sup>.该区典型的草地类型——亚高山草地在该区碳汇功能的发挥中具有重要作用.随着人类活动的加剧,该区大气氮沉降速率呈逐年递增的趋势,2010~2019年从 $3.19 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 增至 $16.15 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ <sup>[26,27]</sup>.对此,本文基于兰州大学祁连山草地生态系统野外科学观测研究站(寺大隆站)亚高山草地生态系统的氮磷添加试验平台,通过模拟大气氮磷沉降,研究短期氮磷沉降对亚高山草地土壤总呼吸速率及其组分的影响,以检验以下两个假设:①氮磷混施可显著减少异养呼吸速率但对自养呼吸速率无显著影响<sup>[16]</sup>,从而降低土壤总呼吸速率;②由于碳、氮、磷循环之间的强耦合<sup>[28]</sup>,氮添加和磷添加对土壤总呼吸速率会存在显著的交互作用.本研究结果有利于增进对氮磷沉降背景下草地温室气体发生机制的了解,旨在为实现碳中和目标提供理论支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中部黑河上游天涝池流域

( $38^{\circ}20' \sim 38^{\circ}30' \text{N}$ ,  $99^{\circ}44' \sim 99^{\circ}59' \text{E}$ ),海拔2 600~4 450 m,属于典型的大陆性高寒半湿润山地森林草原气候,年均温 $0.7^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量433 mm,且主要集中在6~9月,占全年降水量的84%<sup>[29]</sup>.本研究以海拔3 010 m的亚高山草地为研究对象,地势较为平坦,受外界人类活动的扰动较小,主要建群种有垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、葛缕子(*Carum carvi* Linn.)、赖草[*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.]和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina* L.)等,植被盖度接近100%<sup>[29,30,31]</sup>.土壤类型为亚高山草甸土,土壤0~10 cm土层处pH值6.64,土壤全氮 $\omega(\text{TN})$ 和全磷 $\omega(\text{TP})$ 分别为 $10.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

本研究是在兰州大学祁连山草地生态系统野外科学观测研究站(寺大隆站)亚高山草地生态系统的氮磷添加试验平台进行的,试验采用完全随机区组设计,设置了氮添加 $[10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}, \text{N}]$ 、磷添加 $[5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}, \text{P}]$ 、氮磷混施 $[10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1} \text{N}, 5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1} \text{P}, \text{NP}]$ 、对照(CK)和完全对照(CK')这5个处理.每个处理设置4个重复,每个重复为 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 小样方.所使用的氮肥为尿素( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ),磷肥为重过磷酸钙 $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ ,施肥处理于2018年年底开始,平均每两个月施肥一次:在生长季(5~10月),把称好的尿素及磷肥分别溶解在5 L水里,用喷雾器均匀地喷施到对应的试验小区内(对于CK处理,只喷施5 L水;而对于CK'处理,保持自然状态,不做任何处理);在非生长季(11月~次年4月),将称好的尿素或磷肥与等量经过焙烧的细砂混合,再均匀地撒入对应的试验小区内<sup>[30,32]</sup>.

2019年生长季前期,在每个试验小区内随机埋设4个PVC材质的土壤环(直径20 cm,高12 cm),露出地面2 cm左右.随机选择2个土壤环,对其不做任何处理,用于测定土壤总呼吸速率;对余下的2个土壤环,剪除植被使其地表无任何植物生长(土壤环内及周围30 cm),用于测定异养呼吸速率(断根法<sup>[5]</sup>).为避免对土壤的扰动,所有的剪除处理均需在土壤呼吸测定的前一天完成.土壤呼吸速率测定于2019年6月中旬开始,每周选择晴朗的天气,采用LI-8100土壤呼吸自动测量仪(LI-COR, Lincoln, USA)测定土壤呼吸速率2~3次,测量时间控制在08:30~12:30之间,其中单次测定所需的时间约为90 s.在测定土壤呼吸速率的同时,利用仪器附带的土壤热电偶探头(LI-8100-201, LI-COR,

Lincoln, USA) 和 TDR-300 (Spectrum Technologies, Plainfield, USA) 测定 5 cm 深的土壤温度和土壤含水量. 若当天遇到大降雨事件则停止测定, 且雨后 48 h 之后方可进行下一次测量<sup>[33]</sup>.

### 1.2.2 植物样品采集和处理

在 2019 年生长季后期(8 月底), 于每个试验小区随机选取一个 2 m × 0.5 m 的小样方(小样方距离边缘 50 cm 以上, 以避免边缘效应), 齐地刈割地上部分, 装入信封带回实验室, 置于烘箱烘干至恒重(65℃, 48 h), 称重并计算单位面积的地上生物量. 在刈割后的区域, 利用根钻( $d=5.5$  cm) 随机钻取 2 钻 0 ~ 10 cm 的土柱, 混合并挑出植物根系, 用清水冲洗干净, 在 80℃ 恒温箱中烘干至恒重, 称重并计算单位面积的地下生物量.

### 1.2.3 土壤样品采集和处理

在每个齐地刈割植被后的样方内, 利用土钻( $d=5$  cm) 收集样方内 0 ~ 10 cm 的土壤样品, 每个小区内随机选取 2 钻并混合, 其中一部分存于 4℃ 冰箱中以测量土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) 和土壤硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ ); 另一部分自然风干、磨细过 2 mm 孔径的筛以测定 pH、TN、TP 和土壤有机碳(SOC).

### 1.2.4 土壤与植物样品测定

土壤和根系 TN 用凯氏定氮法测定, 土壤和根系 TP 用硫酸消煮-流动注射分析法测定, 土壤 pH 用校正过的酸度计(PB-10, Sartorial, Germany) 测定(水土比 2.5:1), 土壤 SOC 用重铬酸钾氧化-外加热法测定, 土壤 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和土壤 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 采用氯化钾浸提-流动注射分析法测定.

### 1.3 数据处理

由于测定土壤异养呼吸速率的土壤环被剪去地表植被, 环内地表温度比未处理(未进行剪草处理)的变化更快. 为此, 本研究结合以往的研究成果<sup>[34]</sup>, 采用 Van't Hoff 模型拟合土壤呼吸速率、土壤温度和土壤水分含量之间的关系, 以消除对应异养呼吸和土壤总呼吸速率间的土壤温度差异, 公式如下:

$$\text{HR} = ae^{bT}W^c \quad (1)$$

式中, HR 为土壤异养呼吸速率,  $a$  为拟合参数,  $b$  和  $c$  分别为土壤温度敏感性参数和土壤水分敏感性参数,  $e$  为自然常数,  $T$  为 5 cm 深度的土壤温度,  $W$  为 5 cm 深度的土壤水分含量. 对于不同的处理, 根据获得的拟合参数  $a$ 、 $b$  和  $c$ , 将土壤总呼吸速率(SR)对应的土壤温度和土壤水分含量代入模型中, 即可获得异养呼吸速率校正值.

在校正后的数据基础上<sup>[5]</sup>, 计算自养呼吸速率值, 公式如下:

$$\text{AR} = \text{SR} - \text{HR} \quad (2)$$

式中, AR 为自养呼吸速率, SR 为土壤总呼吸速率.

为了消除各变量的不同维度, 计算了不同施肥处理样地土壤总呼吸速率及其组分的响应比<sup>[35]</sup>:

$$\text{RR} = V_{\text{in}}/V_{\text{CK}'} \quad (3)$$

式中, RR 为土壤总呼吸速率、自养呼吸速率和异养呼吸速率的响应比,  $V_{\text{in}}$  为 CK、N、P 和 N+P 这 4 种不同处理下的土壤总呼吸速率及其组分,  $V_{\text{CK}'}$  为完全对照(CK')下的土壤总呼吸速率及其组分.

土壤总呼吸速率、异养呼吸速率和自养呼吸速率与土壤温度的关系采用指数模型进行拟合<sup>[5]</sup>:

$$\text{RS} = ae^{bT} \quad (4)$$

式中, RS 为土壤总呼吸速率、自养呼吸速率或异养呼吸速率, 其他各参数解释详见式(1).

土壤温度敏感性系数<sup>[5]</sup>:

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (5)$$

式中, 各参数解释详见式(1).

### 1.4 统计分析

为减少数据中离群值对试验结果的影响, 数据分析之前, 运用单变量检测法对超出 1.5 倍四分位距(0.25 分位数和 0.75 分位数的差)的观测点进行移除(占原始数据的 4.44%). 对土壤温度、土壤水分含量、土壤总呼吸速率及其组分使用三因素方差分析检验生长月份、氮添加和磷添加对土壤总呼吸速率及其组分、土壤温度和土壤水分含量的影响. 对氮磷添加下, 环境因子、土壤理化指标、植被因子和土壤总呼吸速率及其组分的响应比进行差异显著性检验(LSD,  $\alpha=0.05$ ), 并用 Pearson 法分析土壤总呼吸速率及其组分与土壤温度、土壤 SOC、土壤 pH、土壤 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、土壤 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、植物地上及地下生物量、根系 TN 和根系 TP 的相关性. 使用主成分分析法(PCA)分析植被生产力、土壤理化性质、环境因子与土壤呼吸组分之间的相关性. 统计分析均基于 R 4.1.1 进行, 显著性水平设置为 0.05.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤温度和含水量

土壤月平均温度随着生长季呈现上升趋势, 变化范围为 8.88 ~ 13.51℃ [图 1(a)]; 土壤月平均水分含量随着生长季呈缓慢下降的趋势, 变化范围为 0.33 ~ 0.45 [图 1(b)]. 月份对土壤温度和水分含量均有显著影响( $P < 0.05$ ), 而氮和磷添加仅对土壤温度有显著的影响( $P < 0.05$ ) (图 1 和表 1).

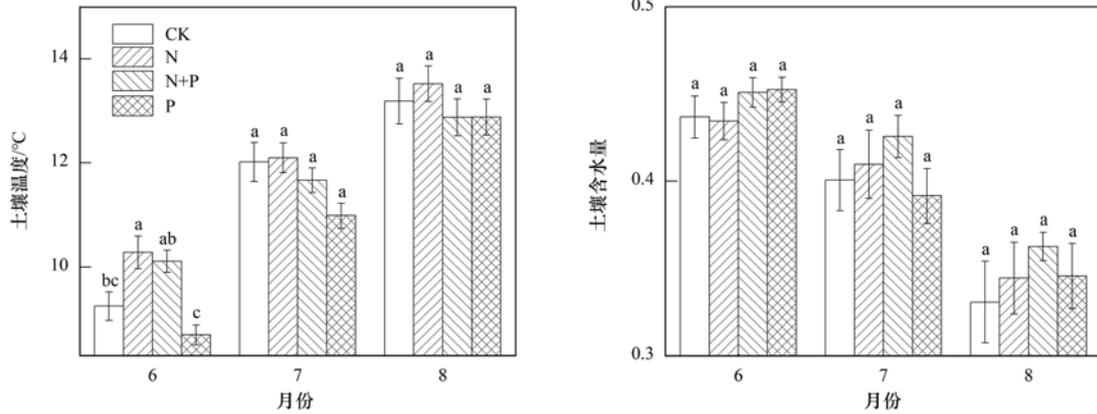
### 2.2 氮磷添加对土壤总呼吸速率及其组分的影响

土壤总呼吸及其组分的月变化明显, 除了氮和磷添加对土壤呼吸组分存在显著影响外, 月份、氮和磷添加对土壤呼吸组分的交互作用均不显著(表

1). 随着月份的递增(6~8月),施肥处理增加了土壤总呼吸及其组分的呼吸速率(图2),而对对照除增加异养呼吸速率外,对自养呼吸和土壤总呼吸速率及其响应比均表现为先促进后抑制(图2).氮添加和磷添加均抑制了自养和异养呼吸速率,故而降低了土壤总呼吸速率;而氮磷混施促进了异养呼吸速率,但抑制了自养呼吸速率,导致土壤总呼吸速率无

显著变化(图2).

生长季尺度上,由于氮添加显著抑制了自养呼吸速率,而磷添加显著抑制异养呼吸速率,使得氮添加和磷添加均显著降低了土壤总呼吸速率(图2).氮磷混施显著抑制了自养呼吸速率而促进了异养呼吸速率,导致土壤总呼吸速率不变(图2).



小写字母表示不同氮磷添加量处理间的差异显著性,相同字母表示无显著差异( $P > 0.05$ ),不同字母表示具有显著差异( $P < 0.05$ )

图1 氮磷添加样地土壤温度和土壤含水量月度变化特征

Fig. 1 Monthly variation characteristics of soil temperature and soil water content in nitrogen and phosphorus addition plots

表1 月份、氮和磷对土壤总呼吸速率及其组分、土壤温度和土壤水分含量的影响

Table 1 Effects of month, nitrogen, and phosphorus on soil respiration rate and its components, soil temperature, and soil water content

因素	F				
	总呼吸速率 (以 CO <sub>2</sub> 计)	异养呼吸速率 (以 CO <sub>2</sub> 计)	自养呼吸速率 (以 CO <sub>2</sub> 计)	土壤温度	水分含量
月份	35.26 ***	63.22 ***	24.44 ***	111.97 ***	37.96 ***
氮	0.39	53.50 ***	3.34	8.63 **	1.80
磷	6.46 *	0.69	6.40 *	8.05 **	1.55
月×氮	1.66	0.42	1.72	2.94	0.55
月×磷	1.99	1.59	2.66	0.49	0.27
氮×磷	8.26 **	90.21 ***	2.19	0.35	0.28
月×氮×磷	0.37	2.90	0.30	0.57	0.17

1)数值表示方差分析的统计量(F); \*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ , \*\*\*表示  $P < 0.001$

### 2.3 氮磷添加对土壤总呼吸速率 $Q_{10}$ 的影响

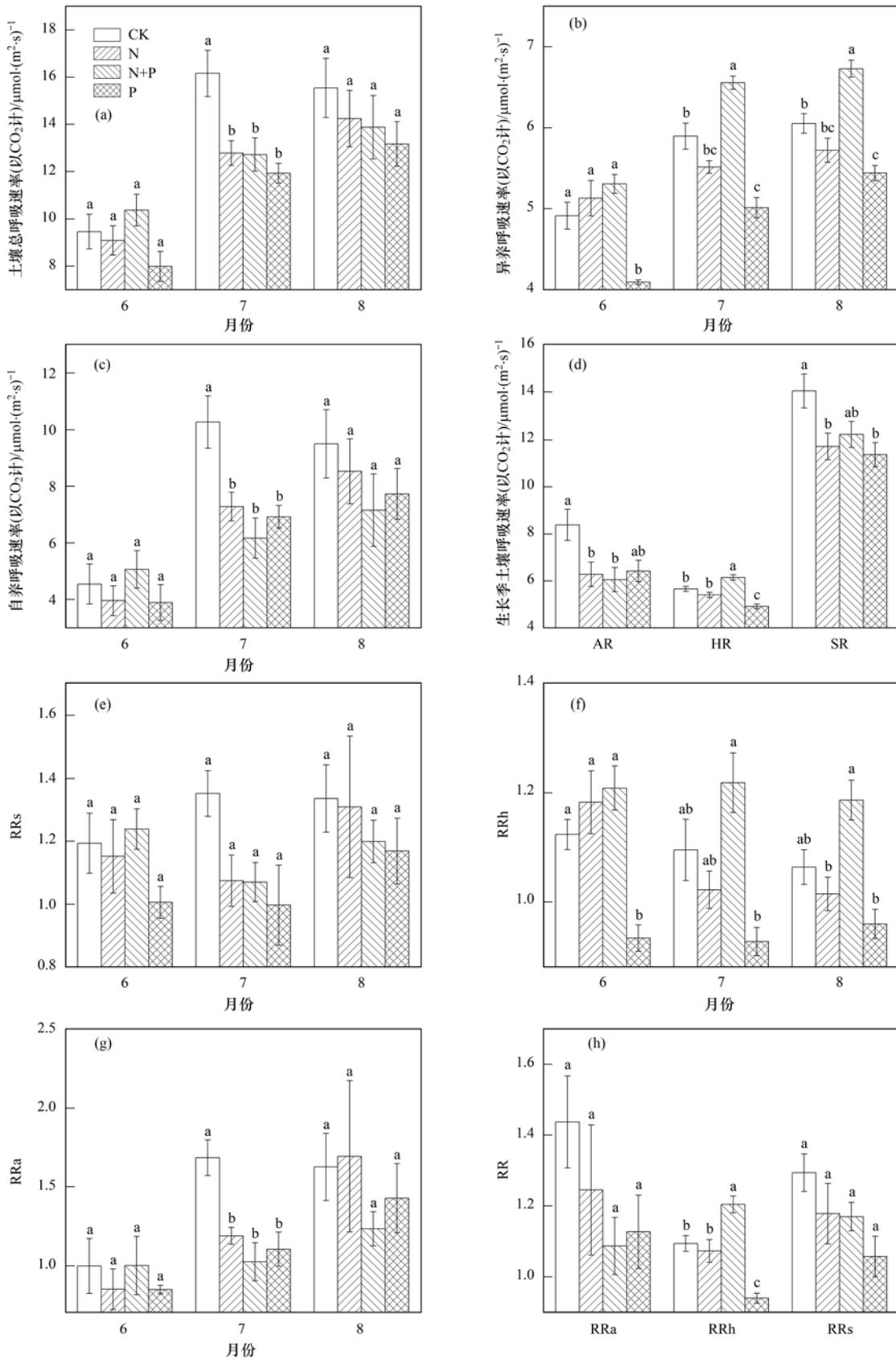
土壤总呼吸速率及其组分与土壤温度均呈显著的指数关系( $P < 0.05$ ,表2).磷添加提高了土壤呼吸速率(总呼吸及其组分)的  $Q_{10}$  (3.38%~6.98%),而氮添加减小了土壤呼吸速率的  $Q_{10}$

(-5.64%~0.00%);氮磷混施减小了自养呼吸与土壤总呼吸速率的  $Q_{10}$  (-2.63%~-2.02%),但增加了异养呼吸速率的  $Q_{10}$  (16.86%).此外,处理样地内自养呼吸速率的  $Q_{10}$ 均高于异养呼吸和土壤总呼吸速率的  $Q_{10}$ .

表2 氮磷添加样地土壤总呼吸及其组分的呼吸速率与土壤温度之间的指数拟合关系

Table 2 Exponential fitting relationship between total soil respiration and respiration rate of soil components and soil temperature in nitrogen and phosphorus addition plots

处理	总呼吸速率(以 CO <sub>2</sub> 计)				异养呼吸速率(以 CO <sub>2</sub> 计)				自养呼吸速率(以 CO <sub>2</sub> 计)			
	回归方程	R <sup>2</sup>	P	Q <sub>10</sub>	回归方程	R <sup>2</sup>	P	Q <sub>10</sub>	回归方程	R <sup>2</sup>	P	Q <sub>10</sub>
CK	$y = 4.401e^{0.098x}$	0.42	<0.001	2.66	$y = 2.985e^{0.054x}$	0.83	<0.001	1.72	$y = 1.923e^{0.124x}$	0.30	<0.001	3.46
P	$y = 3.649e^{0.101x}$	0.47	<0.001	2.75	$y = 2.489e^{0.061x}$	0.85	<0.001	1.84	$y = 1.484e^{0.130x}$	0.33	<0.001	3.67
N	$y = 3.909e^{0.092x}$	0.30	<0.001	2.51	$y = 2.944e^{0.051x}$	0.54	<0.001	1.67	$y = 1.425e^{0.124x}$	0.20	<0.01	3.46
N+P	$y = 4.066e^{0.095x}$	0.23	<0.001	2.59	$y = 2.720e^{0.070x}$	0.83	<0.001	2.01	$y = 1.469e^{0.122x}$	0.11	<0.05	3.39



AR 表示自养呼吸速率, HR 表示异养呼吸速率, SR 表示土壤总呼吸速率; RRs 表示土壤总呼吸速率响应比, RRh 表示异养呼吸速率响应比, RRa 表示自养呼吸速率响应比, RR 表示响应比; 小写字母表示不同氮磷添加量处理间的差异显著性, 相同字母表示无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 不同字母表示具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 下同

图 2 氮磷添加样地土壤总呼吸速率及其组分对氮磷添加响应的月度和生长季变化

Fig. 2 Monthly and growing season changes in soil total respiration rate and its components in response to nitrogen and phosphorus addition

## 2.4 氮磷添加对植物、土壤和环境因子的影响

与对照相比,处理样地内地上生物量、地下生物量、土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  均有不同程度增加,但差异不显著 ( $P > 0.05$ ),见图 3; 而处理与对

照样地内根系磷含量、土壤 pH、土壤 SOC、土壤 TN 和土壤 TP 差异均不显著 ( $P > 0.05$ ,图 3). 另外,磷添加样地内根系 TN [图 3(d)] 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于对照和其他处理.

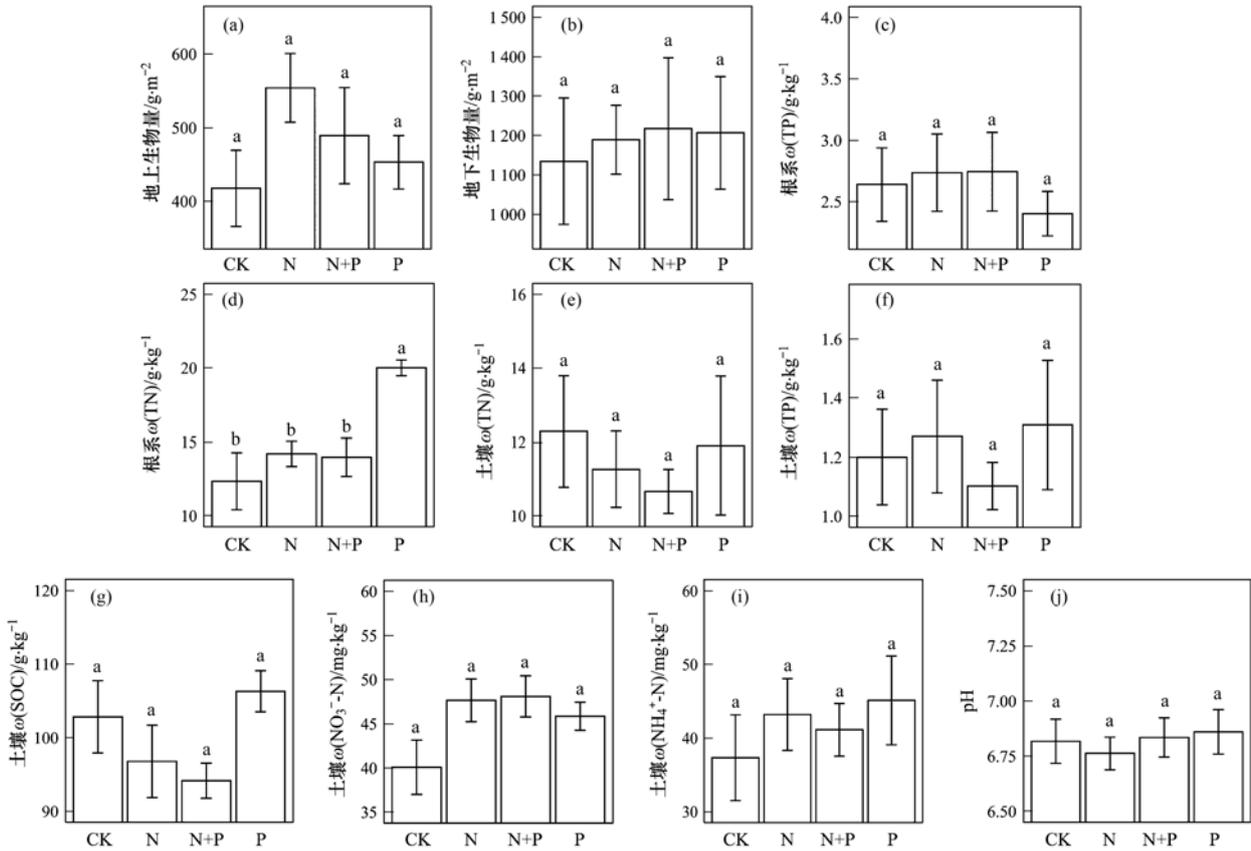


图 3 氮磷添加对植物、土壤和环境因子的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen and phosphorus addition on plant, soil, and environmental factors

## 2.5 植物、土壤和环境因子与土壤呼吸组分的相关性分析

土壤 pH 值的增加显著 ( $P < 0.05$ ) 抑制了土壤总呼吸速率 [图 4(a)], 主要是增加的土壤 pH 只显著 ( $P < 0.05$ ) 抑制自养呼吸速率 [图 4(e)]; 根系 TP 和土壤 TN 的增加均显著 ( $P < 0.05$ ) 促进了自养呼吸速率 [图 4(f)、图 4(h)], 而未改变异养呼吸速率 [图 4(j) 和图 4(l)], 从而显著增加了土壤总呼吸速率 [图 4(b) 和图 4(d)]; 根系  $\omega(\text{TN})$  只与异养呼吸速率 [图 4(k)] 存在显著 ( $P < 0.05$ ) 负相关. 另外, 土壤总呼吸速率及其组分与土壤 SOC、土壤 TP、土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、地上生物量和地下生物量之间均无显著 ( $P > 0.05$ ) 相关性.

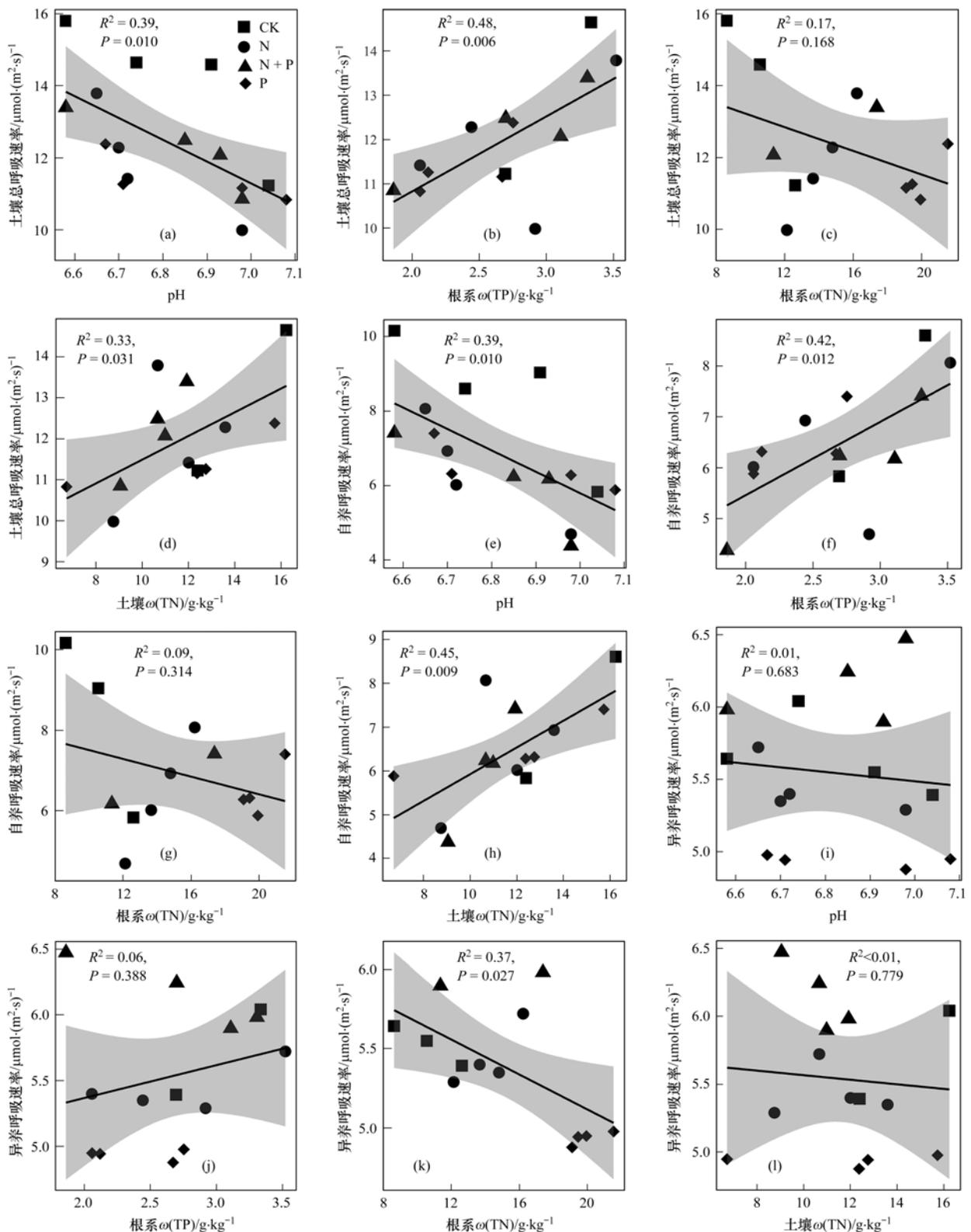
植物、土壤和环境因子与土壤呼吸组分的 PCA 如图 5, 第一轴特征值和第二轴特征值分别能够解释方差百分比的 34.40% 和 22.00%. 第一主成分 (PC1) 与自养呼吸和土壤总呼吸的相关性最高, 与土壤 pH 的相关性最低, 且自养呼吸和土壤总呼吸之间存在强相关性; 第二主成分 (PC2) 与地下生物

量和土壤 SOC 的相关性最高, 与异养呼吸和土壤温度的相关性最低, 且异养呼吸和土壤温度之间存在强相关性, 而与地下生物量和土壤 SOC 之间均为弱相关性.

## 3 讨论

### 3.1 氮磷添加对土壤总呼吸速率及其组分的影响

氮磷添加可通过影响土壤温度敏感性、改变土壤水分有效性或改变地下碳供应的方式影响土壤总呼吸速率<sup>[36]</sup>. 本研究中, 土壤总呼吸速率及其组分均与土壤温度同步增加 (6~8 月), 与 Zhou 等<sup>[37]</sup> 在其他草地生态系统的研究结论相似. 生长季尺度上的结果表明, 氮添加显著抑制自养呼吸速率, 而磷添加显著抑制异养呼吸速率, 这可能是由于氮添加和磷添加均抑制了植物光合作用同化产物向地下的碳分配过程<sup>[10,38,39]</sup>, 从而抑制自养呼吸和异养呼吸速率. 此外, 氮磷混施显著减少根系自养呼吸速率而增加异养呼吸速率, 这一结论否定了本文的第一条假设, 即氮磷混施并没有促进根系自养呼吸速率而抑



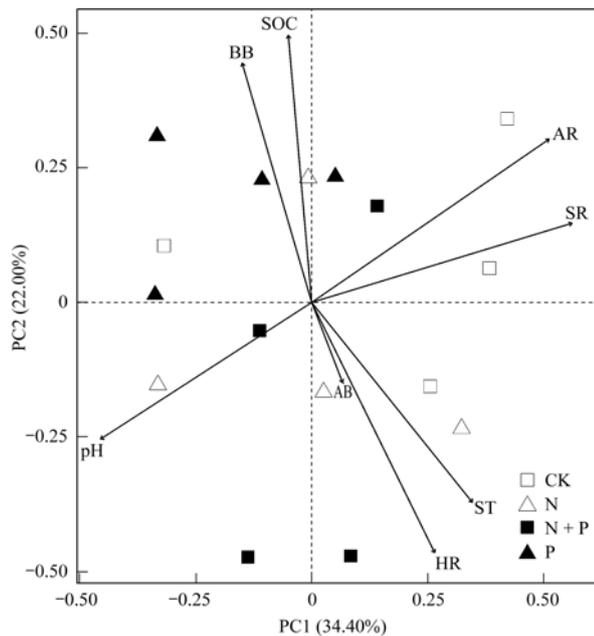
直线表示最佳拟合线, 阴影部分表示置信区间

图4 土壤总呼吸速率及其组分与植物、土壤和环境因子的拟合关系

Fig. 4 Fitting relationship between soil respiration rate and its components and plant, soil, and environmental factors

制异养呼吸速率. 尽管 Guo 等<sup>[24]</sup>在青藏高原高寒草甸的研究发现, 氮磷混施通过降低土壤微生物群落生物量, 进而降低异养呼吸速率, 但针对同一草地生态系统的其他氮磷添加试验却发现, 氮磷富集促进

了土壤微生物生长, 并加速了土壤中顽固性碳的分解<sup>[40]</sup>, 进而提高了异养呼吸速率. 而且, 也可能是氮磷混施降低了土壤 pH, 抑制了根系生长, 但土壤微生物碳和土壤胞外酶活性的增加又促进了土壤微生物



SOC 为土壤有机碳; BB 为地下生物量;  
AB 为地上生物量; ST 为土壤温度; pH 为土壤酸碱度  
图 5 土壤呼吸组分与植物、土壤和环境因子的  
主成分分析 (PCA)

Fig. 5 Principal component analysis (PCA) of soil respiration components and plant, soil, and environmental factors

物呼吸<sup>[41]</sup>,从而导致自养呼吸速率下降、异养呼吸速率增加。另外,本研究还发现,氮添加和磷添加对土壤总呼吸速率存在显著的交互作用,这与本研究的假设二相一致。

土壤 pH 作为衡量土壤质量状况的重要指标,可以通过调节土壤中相关化学反应和微生物体内的酶活性<sup>[42]</sup>来改变植物根系和土壤微生物的适应生境。本研究发现土壤 pH 值与土壤总呼吸速率及自养呼吸速率之间均呈显著负相关,这主要是由于较高的土壤 pH 对土壤呼吸存在抑制作用<sup>[43]</sup>。一般认为,土壤全氮与土壤质量和土壤肥力密切相关<sup>[44]</sup>。李洪建等<sup>[45]</sup>基于不同取样尺度对亚高山草甸土壤呼吸速率的研究发现,在不同的取样尺度条件下,土壤呼吸速率与土壤全氮均呈极显著正相关,与本研究的结果基本一致。此外,植被生产力特征也是影响土壤总呼吸及其组分的重要因素。随着植物根系磷浓度的增加,自养呼吸和土壤总呼吸速率均与之呈现显著的线性正相关。这可能是由于根系磷浓度的增加,缓解了施氮带来的磷限制,使得植物根系内氮、磷元素趋于平衡,促进了根系生长,从而提高了根系的自养呼吸速率<sup>[18]</sup>。另外,本研究还发现,随着根系氮浓度的增加,异养呼吸速率与之呈现显著的负相关关系。Zhang 等<sup>[36]</sup>在半干旱草地的研究表明,氮添加通过增加土壤中有效氮含量,促进了植物根系生长并提高了根系氮浓度含量,这一发现支持了

本文的结论。同样的,土壤中有有效氮含量的增加,可以通过降低土壤中可交换性阳离子含量和土壤酸碱性<sup>[13]</sup>,影响土壤微生物生物群落结构和生物量,进而抑制土壤微生物的异养呼吸速率。

### 3.2 氮磷添加对土壤总呼吸速率 $Q_{10}$ 的影响

与对照相比,土壤总呼吸速率及其组分的  $Q_{10}$  在磷添加样地均有不同程度的增加,而土壤总呼吸速率的  $Q_{10}$  在氮添加和氮磷添加样地均发生减少。这说明单施磷肥会增加土壤总呼吸及其组分的呼吸速率对土壤温度变化的敏感性,而单施氮肥或氮磷混施则会降低土壤总呼吸速率对土壤温度变化的敏感性。Sun 等<sup>[46]</sup>在模拟全球变暖对陆地生态系统碳释放的研究也发现,氮添加和氮磷混施均降低了土壤总呼吸速率的  $Q_{10}$ 。根系自养呼吸速率的  $Q_{10}$  均高于异养呼吸和土壤总呼吸速率,这可能是土壤总呼吸及其组分的呼吸速率对不同氮磷添加响应的不一致、温度敏感程度的内在差异以及各自所占的比例差异而导致<sup>[47]</sup>。有研究发现,在低肥力土壤中进行氮磷混施会降低土壤总呼吸速率的  $Q_{10}$ ,可能与氮素诱导下土壤微生物基质质量的提高有关<sup>[46]</sup>。氮添加降低了土壤总呼吸速率的  $Q_{10}$ ,可能与土壤温度升高引起了土壤水分含量下降、底物浓度降低抑制了根系生长和土壤微生物活性,以及微生物群落结构发生改变等有关<sup>[48,49]</sup>。此外,氮磷添加通过提高光合同化物碳产物向植物地下根系部分的输送<sup>[46]</sup>,或改变土壤中氮磷元素的配比,进而增加了自养呼吸速率的  $Q_{10}$ 。

## 4 结论

氮添加和磷添加分别通过显著抑制自养呼吸和异养呼吸速率以减少土壤碳排放速率,而氮磷混施显著抑制自养呼吸而促进异养呼吸速率,从而导致土壤排放速率未发生变化。其中自养呼吸对土壤酸碱性更加敏感。此外,磷添加增加了土壤碳排放对温度的敏感性,而氮添加和氮磷混施却降低了土壤碳排放对温度的敏感性,表明随着全球变暖的加剧高磷沉降区比高氮沉降区的土壤碳排放增加更快。

致谢:衷心感谢课题组老师和同学们在野外观测试验过程中提供的支持和帮助!

### 参考文献:

- [1] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, **528**(7580): 60-68.
- [2] Zhang Y J, Guo S L, Liu Q F, et al. Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **74**: 196-205.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.

- [ 4 ] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration[J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(1): 3-27.
- [ 5 ] Yan L M, Chen S P, Huang J H, *et al.* Differential responses of auto- and heterotrophic soil respiration to water and nitrogen addition in a semiarid temperate steppe [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(8): 2345-2357.
- [ 6 ] 方精云, 耿晓庆, 赵霞, 等. 我国草地面积有多大? [J]. *科学通报*, 2018, **63**(17): 1731-1739.  
Fang J Y, Geng X Q, Zhao X, *et al.* How many areas of grasslands are there in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(17): 1731-1739.
- [ 7 ] Mahowald N, Jickells T D, Baker A R, *et al.* Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, **22**, doi: 10.1029/2008GB003240.
- [ 8 ] Ågren G I, Wetterstedt J Å M, Billberger M F K. Nutrient limitation on terrestrial plant growth-modeling the interaction between nitrogen and phosphorus [J]. *New Phytologist*, 2012, **194**(4): 953-960.
- [ 9 ] Li W B, Gan X L, Jiang Y, *et al.* Nitrogen effects on grassland biomass production and biodiversity are stronger than those of phosphorus [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **309**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119720.
- [ 10 ] Wang D, Chi Z S, Yue B J, *et al.* Effects of mowing and nitrogen addition on the ecosystem C and N pools in a temperate steppe: a case study from Northern China [J]. *Catena*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104332.
- [ 11 ] Li W B, Hartmann H, Adams H D, *et al.* The sweet side of global change-dynamic responses of non-structural carbohydrates to drought, elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen fertilization in tree species [J]. *Tree Physiology*, 2018, **38**(11): 1706-1723.
- [ 12 ] Li W B, Zhang H X, Huang G Z, *et al.* Effects of nitrogen enrichment on tree carbon allocation: a global synthesis [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, **29**(3): 573-589.
- [ 13 ] Cai J P, Luo W T, Liu H Y, *et al.* Precipitation-mediated responses of soil acid buffering capacity to long-term nitrogen addition in a semi-arid grassland [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **170**: 312-318.
- [ 14 ] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Nitrogen fertilization inhibits soil microbial respiration regardless of the form of nitrogen applied [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(12): 2336-2338.
- [ 15 ] Kemmitt S J, Wright D, Goulding K W T, *et al.* pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(5): 898-911.
- [ 16 ] Ren F, Yang X X, Zhou H K, *et al.* Contrasting effects of nitrogen and phosphorus addition on soil respiration in an alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep34786.
- [ 17 ] 敖小蔓, 孟倩, 徐智超, 等. 氮、磷添加对呼伦贝尔草原生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换的影响 [J]. *草业科学*, 2020, **37**(8): 1428-1439.  
Ao X M, Meng Q, Xu Z C, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of meadow steppe in Hulunbuir, Inner Mongolia [J]. *Pratacultural Science*, 2020, **37**(8): 1428-1439.
- [ 18 ] 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 等. 黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 479-488.  
Zhou J J, Chen Z F, Yang Q, *et al.* Response of soil respiration and its components to nitrogen and phosphorus addition in farming-withdrawn grassland in the semiarid loess hilly-gully region [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 479-488.
- [ 19 ] Holm Jr G O, DeLaune R D, Sasser C E. Respiration of louisiana freshwater floating marsh soils amended with ammonium, phosphate, and sulfate [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, **45**(16): 2141-2150.
- [ 20 ] 李文宇, 张扬建, 沈若楠, 等. 氮磷共限制青藏高原高寒草甸生态系统碳吸收 [J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(1): 51-58.  
Li W Y, Zhang Y J, Shen R N, *et al.* Ecosystem carbon uptake was co-limited by nitrogen and phosphorus in alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(1): 51-58.
- [ 21 ] Zhou L Y, Zhou X H, Zhang B C, *et al.* Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(7): 2332-2343.
- [ 22 ] Li Y, Niu S L, Yu G R. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2016, **22**(2): 934-943.
- [ 23 ] Zhang L H, Yuan F H, Bai J H, *et al.* Phosphorus alleviation of nitrogen-suppressed methane sink in global grasslands [J]. *Ecology Letters*, 2020, **23**(5): 821-830.
- [ 24 ] Guo H, Ye C L, Zhang H, *et al.* Long-term nitrogen & phosphorus additions reduce soil microbial respiration but increase its temperature sensitivity in a Tibetan alpine meadow [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **113**(6): 26-34.
- [ 25 ] Wang Y, Wu C S, Wang F F, *et al.* Comprehensive evaluation and prediction of tourism ecological security in droughty area national parks—a case study of Qilian Mountain of Zhangye section, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(13): 16816-16829.
- [ 26 ] 祝景彬, 李红琴, 贺慧丹, 等. 祁连山海北高寒草甸生态系统大气气湿沉降动态变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2016, **30**(3): 127-132.  
Zhu J B, Li H Q, He H D, *et al.* A dynamic changes of wet deposition of nitrogen at Haibei alpine meadow ecosystem of Qilian Mountains [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30**(3): 127-132.
- [ 27 ] 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 等. 青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2449-2456.  
He F, Zhang L M, Shen C C, *et al.* Analysis of nitrogen transformation characteristics and influencing factors of forestland soil in the Qinghai-Tibet Plateau: a case study of the Qilian Mountains and southeast Tibet [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2449-2456.
- [ 28 ] Poeplau C, Bolinder M A, Kirchmann H, *et al.* Phosphorus fertilisation under nitrogen limitation can deplete soil carbon stocks: evidence from Swedish meta-replicated long-term field experiments [J]. *Biogeosciences*, 2016, **13**(4): 1119-1127.
- [ 29 ] Li W B, Huang G Z, Zhang H X. Enclosure increases nutrient resorption from senescing leaves in a subalpine pasture [J]. *Plant and Soil*, 2020, **457**(1-2): 269-278.
- [ 30 ] 曹丰丰, 刘瑞雪, 黄国柱, 等. 短期氮添加对祁连山亚高山草地生产力及植物多样性的影响 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(12): 5034-5044.  
Cao F F, Liu R X, Huang G Z, *et al.* Effect of short-term nitrogen addition on productivity and plant diversity of subalpine grassland in Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(12): 5034-5044.

- [31] 高云飞, 赵传燕, 戎战磊, 等. 祁连山天涝池流域不同覆被和人类干扰下亚高山草地蒸散发研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, **56**(3): 356-362.  
Gao Y F, Zhao C Y, Rong Z L, *et al.* Evapotranspiration of subalpine meadow under different coverages and human activities in the Tianlaochi catchment, Qilian Mountains[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, **56**(3): 356-362.
- [32] 张云海, 何念鹏, 张光明, 等. 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(21): 6786-6794.  
Zhang Y H, He N P, Zhang G M, *et al.* Nitrogen deposition and *leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(21): 6786-6794.
- [33] 刘瑞雪. 模拟氮沉降对祁连山亚高山草地土壤呼吸的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.  
Liu R X. Effects of nitrogen deposition on soil respiration of subalpine grassland in Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [34] Zheng P F, Wang D D, Yu X X, *et al.* Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, **308**, doi: 10.1016/j.agee.2020.107267.
- [35] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, **80**(4): 1150-1156.
- [36] Zhang C P, Niu D C, Hall S J, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration components and their temperature sensitivities in a semiarid grassland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **75**: 113-123.
- [37] Zhou J J, Chen Z F, Yang Q, *et al.* N and P addition increase soil respiration but decrease contribution of heterotrophic respiration in semiarid grassland[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, **318**, doi: 10.1016/j.agee.2021.107493.
- [38] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest[J]. Plant and Soil, 1997, **190**(1): 127-141.
- [39] Liu Y Z, Zhao C C, Guo J W, *et al.* Short-term phosphorus addition augments the effects of nitrogen addition on soil respiration in a typical steppe [J]. Science of the Total Environment, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143211.
- [40] Luo R Y, Fan J L, Wang W J, *et al.* Nitrogen and phosphorus enrichment accelerates soil organic carbon loss in alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 303-312.
- [41] 张森溪. 施肥对高寒草甸土壤有机碳矿化的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.  
Zhang S X. Effect of fertilization on soil organic carbon mineralization in alpine meadows[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [42] 侯建峰, 吕晓涛, 王超, 等. 中国北方草地土壤呼吸的空间变异及成因[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(10): 2840-2846.  
Hou J F, Lü X T, Wang C, *et al.* Variation of soil respiration and its underlying mechanism in grasslands of northern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(10): 2840-2846.
- [43] Xie J X, Li Y, Zhai C X, *et al.* CO<sub>2</sub> absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle[J]. Environmental Geology, 2009, **56**(5): 953-961.
- [44] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> 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.
- [45] 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 等. 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4313-4320.  
Li H J, Gao Y F, Yan J X, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration in a subalpine meadow at different sampling scales [J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4313-4320.
- [46] Sun Q Q, Wang R, Wang Y, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen and phosphorous fertilization: does soil initial fertility matter? [J]. Geoderma, 2018, **325**: 172-182.
- [47] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, **31**(8): 2301-2311.  
Yang Q P, Xu M, Liu H S, *et al.* Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(8): 2301-2311.
- [48] Schipper L A, Petrie O J, O'Neill T A, *et al.* Shifts in temperature response of soil respiration between adjacent irrigated and non-irrigated grazed pastures[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, **285**, doi: 10.1016/j.agee.2019.106620.
- [49] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. Nature, 2006, **440**(7081): 165-173.

## CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China .....	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter .....	WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain .....	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020 .....	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM <sub>2.5</sub> and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021 .....	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing .....	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing .....	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM <sub>2.5</sub> Over Xi'an .....	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels .....	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in the Core Area of Ili River Valley in Spring .....	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM <sub>2.5</sub> Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids .....	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration .....	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City .....	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ling, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O <sub>3</sub> -VOCs-NO <sub>x</sub> Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021 .....	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer .....	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao .....	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O <sub>3</sub> Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical .....	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect .....	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing .....	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO <sub>2</sub> Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories .....	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source .....	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River .....	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China .....	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes .....	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin .....	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin .....	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area .....	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan .....	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats .....	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water .....	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i> .....	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai .....	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar .....	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics .....	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation .....	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data .....	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model .....	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter .....	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network .....	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background .....	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize .....	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis .....	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau .....	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains .....	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River .....	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes .....	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest .....	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil .....	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil .....	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields .....	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress .....	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035 .....	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil .....	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils .....	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China .....	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)