

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清 (2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾璐杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源磷的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧 (2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑 (2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌 (2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩 (2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	
《环境科学》征稿简则 (2947)	
信息 (2646, 2656, 2857)	

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响

胡伟^{1,2}, 张亚红^{1*}, 李鹏¹, 张鹏¹, 李满友¹, 尤璟涛¹, 田水泉¹

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 宜宾学院川茶学院, 宜宾 644000)

摘要: 为探讨不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸速率和土壤生化性质的影响及其关系, 本研究于2017年4月至2018年3月采用田间试验和室内分析相结合的方法, 设置了无氮(N0, 0)、低氮(N1, 60 kg·hm⁻²)、中氮(N2, 120 kg·hm⁻²)和高氮(N3, 180 kg·hm⁻²)这4个施氮水平, 监测了不同施氮水平下紫花苜蓿草地土壤呼吸速率及土壤水热的季节变化, 并于紫花苜蓿生长季内不同茬次刈割后测定了土壤生化性质。结果表明: ①不同施氮水平下紫花苜蓿草地土壤呼吸速率均表现出明显的季节性变化特征, 在7月下旬达到峰值, 12月中旬降至最低; 随施氮量的增加紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率逐渐增强, N1、N2和N3施氮水平下的土壤呼吸速率均值分别为0.97、1.04和1.07 g·(m²·h)⁻¹, 与N0 [0.88 g·(m²·h)⁻¹]相比, 土壤呼吸速率分别增加了10.2%、18.2%和21.6%; 施氮对紫花苜蓿非生长季内土壤呼吸速率无显著影响($P > 0.05$)。②不同施氮水平下紫花苜蓿生长季、非生长季和全年的土壤呼吸速率与土壤温度拟合指数模型均达极显著水平($P < 0.01$), 且指数模型的决定系数 R^2 值表现为生长季(0.46~0.62) < 非生长季(0.66~0.76) < 全年(0.80~0.86)。③施氮在一定程度上降低了紫花苜蓿草地土壤的pH值和速效磷(AP), 而提高了速效钾(AK)、土壤有机质(SOM)、土壤脲酶(URE)和土壤蔗糖酶活性(INV)。土壤全氮(TN)和碱解氮(AN)含量在不同施氮水平下表现出不同的变化趋势, 当施氮量在0~120 kg·hm⁻²时, TN和AN随施氮量的增加而增加, 继续增施氮肥超过N2(120 kg·hm⁻²)水平时则略有下降。④通过紫花苜蓿生长季内土壤呼吸与其土壤生化性质之间的相关矩阵分析可知, 土壤呼吸速率(R_s)与土壤pH值呈极显著负相关($P < 0.01$), 与TN和URE呈极显著正相关($P < 0.01$), 与SOM呈显著的正相关($P < 0.05$), 与INV呈显著负相关($P < 0.05$)。综合考虑土壤生化特性对不同施氮条件下紫花苜蓿草地土壤呼吸速率的影响, 可为草地生态系统土壤呼吸强度研究提供理论依据。

关键词: 施氮; 土壤呼吸速率; 土壤生化性质; 紫花苜蓿

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2858-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201810019

Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland

HU Wei^{1,2}, ZHANG Ya-hong^{1*}, LI Peng¹, ZHANG Peng¹, LI Man-you¹, YOU Jing-tao¹, TIAN Shui-quan¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Sichuan Tea College, Yibin University, Yibin 644000, China)

Abstract: Understanding the effects of different levels of nitrogen fertilizer applications on soil respiration rates and soil biochemical properties is of great importance for providing a theoretical basis for accurate assessments of the soil respiration intensity and carbon recycling in grassland ecosystems. A field experiment was performed from April 2017 to March 2018, in which four different levels of nitrogen applications were investigated, including 0 kg·hm⁻² (N0), 60 kg·hm⁻² (N1), 120 kg·hm⁻² (N2), and 180 kg·hm⁻² (N3). The seasonal changes in the soil respiration rate, soil temperature, and soil moisture in the alfalfa grassland under different levels of nitrogen applications were observed, and soil biochemical characteristics were observed after each harvest in the growing season. The results showed that soil respiration rate of the alfalfa grassland displayed significant seasonal variation under different nitrogen levels. In particular, the soil respiration rate reached a peak during the last 10-day period of July and then decreased to the minimum in mid-December. During the growing season of alfalfa, the soil respiration rate of the alfalfa grassland increased with the increases in the nitrogen application rate. The mean soil respiration rates of the N1, N2, and N3 treatments were 0.97, 1.04, and 1.07 g·(m²·h)⁻¹, respectively, and these values were 10.2%, 18.2%, and 21.6% greater than that of N0 [0.88 g·(m²·h)⁻¹], respectively. The results from ANOVA testing indicated that nitrogen applications had no significant effect on the soil respiration rate during the non-growing season of alfalfa ($P > 0.05$). According to the statistical analysis, the soil respiration rate had a significant exponential positive relationship with soil temperature during the growing season, non-growing season, and entire year of alfalfa grassland observations under different nitrogen application rates ($P < 0.01$); the coefficients of determination were ranked as follows: growing season (0.46-0.62) < non-growing season (0.66-0.76) < whole year (0.80-0.86). Soil temperature (T) and soil moisture (W) interacted with each other and ultimately affected the soil respiration (R_s), and by using a two-factor linear model of soil temperature and soil moisture, a better fit was obtained for the change in the soil respiration rate. Both of the two factors explained

收稿日期: 2018-10-08; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 宁夏回族自治区对外科技合作项目; 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01)

作者简介: 胡伟(1981~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为草地生态环境变化与评价, E-mail: wh_1981225@163.com

* 通信作者, E-mail: zhyhcau@sina.com

68%-80% of the variation in the seasonal soil respiratory rate during the growing season of alfalfa. Nitrogen fertilization decreased the soil pH and available phosphorus content (AP) to varying degrees, but it increased the available potassium (AK), soil organic matter (SOM), and soil urease (URE) and invertase activity (INV). Total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) showed different trends under different nitrogen levels. The TN and AN contents increased considerably in soils; however, when the nitrogen rate was higher than N₂ (120 kg·hm⁻²), TN and AN decreased with the increases in the nitrogen application rate. According to the correlation matrix analysis between soil respiration and soil biochemical properties during the growth period of alfalfa, data showed that the soil respiration rate (RS) was significantly and negatively correlated with soil pH ($P < 0.01$), and it was significantly and positively correlated with soil TN and URE ($P < 0.01$). Simultaneously, there was a significant positive correlation between the soil respiration rate (R_s) and SOM ($P < 0.05$), and there was a significant negative correlation with INV ($P < 0.05$). The soil nutrient and enzyme activities of the alfalfa grassland explained the variations in the soil respiration rate under different nitrogen application levels to varying degrees.

Key words: nitrogen fertilization; soil respiration rate; soil biochemical properties; alfalfa

大气 CO₂ 浓度升高所导致全球气候变化已受到人们普遍关注^[1, 2]. 土壤呼吸是陆地生态系统土壤向大气释放 CO₂ 的主要途径, 也是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 在全球碳循环调控中起着至关重要的作用^[3~6]. 土壤呼吸主要由土壤微生物和作物根系产生, 另有极少部分来自土壤动物呼吸和含碳矿物质的化学氧化作用, 其中根呼吸约占土壤呼吸的 10%~90%^[7~9]. 施氮作为作物增产的主要农业管理措施之一, 它不仅通过改变作物地上部分和地下部分的碳分配和土壤的生化性质来直接或间接影响土壤呼吸^[10~13], 而且也是影响土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})变异的一个重要驱动力^[14]. 土壤呼吸不仅与土壤温度、土壤水分、土壤有效态氮等非因素有关, 而且也受到生物因素, 如土壤酶活性、土壤微生物和根系生物量有关^[4, 7, 15]. 氮肥管理是影响作物生长生态指标和土壤微环境的关键技术之一^[13]. 目前, 施氮对土壤呼吸速率的影响主要表现为促进^[16~19]、抑制^[20~23]和无显著影响^[24, 25]. 氮肥投入对陆地生态系统土壤呼吸的影响仍存在极大的不确定性. 因此, 要准确估算陆地生态系统的土壤呼吸碳释放量, 就必须加强土壤呼吸过程及其影响因素的研究.

紫花苜蓿是中国分布最广, 栽培历史最悠久的豆科牧草, 对中国西北地区生态环境改善和农牧业作物结构调整有极其重要的作用^[26]. 近年来, 国内外学者对紫花苜蓿的研究多集中于施肥对其产量、品质和土壤养分的影响, 而对紫花苜蓿草地土壤呼吸研究相对较少, 尤其是从氮肥投入的角度分析紫花苜蓿草地土壤呼吸速率与土壤生化性质的关系如何鲜见报道. 因此, 本文选取宁夏引黄灌区地下滴灌条件下第 2 年紫花苜蓿为研究对象, 分析不同施氮水平对紫花苜蓿全年土壤呼吸速率及其温度敏感性的影响, 探讨紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率与土壤生化性质的变化规律和内在联系, 明确氮肥投入对土壤呼吸及其温度敏感性的影响机制, 以期对紫花苜蓿草地土壤呼吸强度的准确评估与碳收支

提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在宁夏农垦局贺兰山茂盛草业有限公司核心试验站进行. 该站位于银川市境内(38°31'N, 106°08'E), 海拔 1 037 m. 该区属中温带大陆性气候, 年平均日照时数 3 000 h 以上, 年平均气温 8.5℃, 是全国太阳辐射和日照时数最多的地区之一. 全年无霜期 157 d, 多年平均降水量 203 mm, 降水较为集中在 7~9 月. 试验田排灌方便, 土壤类型为淡灰钙土, 土壤耕层(0~20 cm)土壤容重为 1.51 g·cm⁻³, 田间持水量为 21.95%, pH 值为 8.61, 有机质含量 13.43 g·kg⁻¹, 全盐含量 0.26 g·kg⁻¹, 碱解氮 43.91 mg·kg⁻¹, 速效磷 10.65 mg·kg⁻¹, 速效钾 128.26 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计与管理

以第 2 年的紫花苜蓿‘巨能 7 号’(*Medicago Sativa* L. cv. Magnum VII)为试验材料. 紫花苜蓿草地建植于 2016 年 5 月 16 日, 播种量为 22.5 kg·hm⁻², 播深 2 cm, 行距 22.5 cm. 采用地下滴灌方式进行灌水, 滴灌带间距 60 cm, 埋深 20 cm, 滴头间距 30 cm, 滴头流量 3.0 L·h⁻¹, 用水表控制灌溉水量.

2017 年 4 月开始, 根据紫花苜蓿需肥规律和当地施氮量, 本试验共设置 4 个施氮量定额处理: 无氮(N0, 0)、低氮(N1, 60 kg·hm⁻²)、中氮(N2, 120 kg·hm⁻²)和高氮(N3, 180 kg·hm⁻²). 采用人工撒施方式分 4 次施入, 即每次施氮量分别为总施氮定额 40%、30%、20% 和 10%, 分别于 4 月 5 日、6 月 9 日、7 月 4 日和 8 月 7 日结合灌溉进行, 氮源为尿素(含 N 46.4%). 本试验每个处理重复 3 次, 小区面积为 4 m×6 m, 为防止试验处理间水分与氮素移动, 各试验小区之间设置 1 m 的人行走道并进行防水氮隔离处理. 紫花苜蓿全年滴灌量均为 600 mm、共滴水 12 次(含越冬水), 紫花苜蓿田间

管理措施等同当地普通大田。紫花苜蓿生长季内共刈割4次,分别于初花期的5月24日、6月25日、7月30日和9月16日进行。试验期间日平均气温和降水量情况见图1。试验期间总降水量为192.8

mm,降水量最大值出现在2017年6月4日,为22.1 mm;日平均气温最高值出现在2017年7月13日,为30.2℃,最低值出现在2018年1月28日,为-13.1℃。

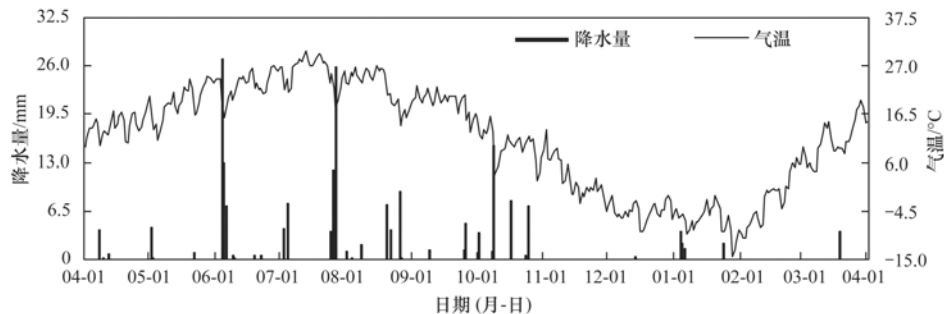


图1 试验期间日平均气温和降水量

Fig. 1 Mean daily temperature and daily precipitation during the experiment

1.3 观测指标和方法

1.3.1 土壤呼吸、温度和水分的测定

本试验采用美国 PP Systems 公司生产的 EGM-4 便携式环境监测仪测定土壤呼吸速率^[27],每个小区选取3个取样点,取样点均分布在距滴头水平距离10 cm处,每取样点测定2个值。紫花苜蓿的生长季(2017年4月~2017年10月)每月测定3次,紫花苜蓿的非生长季(2017年11月~2018年3月)每月测定2次;选择晴好天气于09:00~11:00进行土壤呼吸速率的测定^[18, 19]。本试验紫花苜蓿草地土壤呼吸速率于2017年4月1日开始测定。在测定土壤呼吸速率的同时,分别采用 ZDR-41 温度记录仪(杭州泽大仪器有限公司 精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)和 MP406 土壤水分传感器(澳大利亚)每10 min自采各小区内土层深度为10 cm处土壤温度和土壤湿度。土壤温度和土壤水分通过计算得到小时和日平均值,每小时平均值用于匹配瞬时土壤呼吸速率和土壤温度和土壤湿度的关系。

1.3.2 土壤生化性质的测定

2017年紫花苜蓿生长季内不同茬次刈割后的5月25日、6月25日、7月30日和9月16日,采用S形多点取样法采集各小区内0~20 cm土层土壤样品,采样均在紫花苜蓿行间内进行,剔除石块和植物残根等杂物后混匀,风干后过2 mm筛用于土壤速效养分和土壤酶活性的测定。

土壤 pH 值采用 pH 电极测定;全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测定;碱解氮(AN)采用碱解扩散法测定;速效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾(AK)采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;土壤全盐(ST)采用质量法测定;土壤有机质(SOM)采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定;以上土壤养分均参照鲁如坤^[28]的方法。

土壤脲酶活性(URE)采用靛酚蓝比色法测定^[29];土壤碱性磷酸酶活性(ALP)采用磷酸苯二钠比色法测定^[29]。土壤蔗糖酶,又称土壤转化酶(INV)采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[29]。土壤过氧化氢酶(CAT)采用紫外分光光度法测定^[30]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件对试验数据进行回归分析和 One-way、Two-way ANOVA 方差分析,并用 LSD 法进行多重比较;显著性水平:显著($P < 0.05$);极显著($P < 0.01$)。采用 Pearson's 相关分析法研究紫花苜蓿土壤呼吸速率与土壤生化性质相关性关系。采用 Microsoft Excel 2013 绘制紫花苜蓿草地土壤呼吸速率、土壤温度和土壤酶活性等动态变化。

紫花苜蓿土壤呼吸速率与土壤温度间的关系采用指数模型^[4, 13]来拟合:

$$R_s = a_0 e^{kT} \quad (1)$$

式中, R_s 为紫花苜蓿土壤呼吸速率[以 CO_2 计, $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], T 为 10 cm 处土壤温度($^{\circ}\text{C}$), a_0 为基础土壤呼吸速率[以 CO_2 计, $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], k 为土壤呼吸温度敏感性的参数。

土壤呼吸温度敏感性系数^[13, 27]:

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

式中, Q_{10} 为土壤呼吸温度敏感性系数,表示土壤温度每升高 10°C 时土壤呼吸速率所增加的倍数, k 为土壤呼吸温度敏感性的参数。

紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率与土壤湿度关系采用一元二次模型^[13, 27]来拟合:

$$R_s = aW^2 + bW + c \quad (3)$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率[以 CO_2 计, $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], W 为 10 cm 处土壤湿度(%), a 、 b 、 c 为待定常数。

土壤呼吸速率与土壤水分和土壤温度的复合关

系分别采用线性模型和非线性模型来拟合^[13, 15].

线性模型：

$$R_s = a + bW + cT \quad (4)$$

非线性模型：

$$R_s = aW^b e^{cT} \quad (5)$$

式中， R_s 为土壤呼吸速率 [以 CO_2 计， $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]， W 为 10 cm 处土壤湿度(%)， T 为 10 cm 处土壤平均温度($^{\circ}\text{C}$)， a 、 b 、 c 为待定常数.

2 结果与分析

2.1 施氮对紫花苜蓿草地土壤呼吸速率和年累积呼吸量的影响

不同施氮水平下紫花苜蓿草地土壤呼吸速率均表现出明显的季节性变化特征，在 7 月下旬达到峰值，12 月中旬降至最低(图 2). 紫花苜蓿生长季内(2017 年 4 月初 ~10 月中旬)土壤呼吸速率整体上呈先上升后下降趋势. 2017 年紫花苜蓿返青后(4 月初)，土壤温度逐渐升高，紫花苜蓿生长速度开始加快，土壤呼吸速率呈波浪式上升趋势，土壤呼吸速率均于 7 月下旬达最大值；之后随着紫花苜蓿生长状况和气象条件的改变，土壤呼吸开始逐渐减弱，9 月上旬温度急剧下降，土壤呼吸随之迅速降

低，至紫花苜蓿枯落后(10 月中旬)土壤呼吸速率降至生长内最低值. 紫花苜蓿生长季内，土壤呼吸速率随施氮量的增加而逐渐增强，N1、N2 和 N3 施氮水平下的土壤呼吸速率均值分别为 0.97、1.04 和 $1.07 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ，与 N0 [$0.88 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]相比，土壤呼吸速率分别提高了 10.2%、18.2% 和 21.6%. 紫花苜蓿非生长季(2017 年 10 月中旬 ~2018 年 3 月下旬)土壤呼吸速率整体上呈先下降后上升趋势. 10 月中旬以后，土壤温度快速下降，紫花苜蓿停止生长，土壤呼吸速率快速降低；12 月中旬降低至全年最低值并持续到次年 2 月下旬；3 月上旬，随着土壤温度的升高，土壤呼吸速率开始逐渐升高. 紫花苜蓿非生长季内，不同施氮条件下土壤呼吸速率平均值为 $\text{N0} [0.09 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}] < \text{N2} [0.11 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}] < \text{N1} [0.12 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}] < \text{N3} [0.13 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$. 经方差分析表明，紫花苜蓿非生长季不同施氮水平下(N0、N1、N2 和 N3)两两之间土壤呼吸速率差异均不显著($P > 0.05$)，表明紫花苜蓿非生长季内施氮对土壤呼吸速率无显著影响($P > 0.05$).

紫花苜蓿草地年累积土壤呼吸量随施氮量的增加逐渐增大(图 3). N1、N2 和 N3 施氮水平下年累

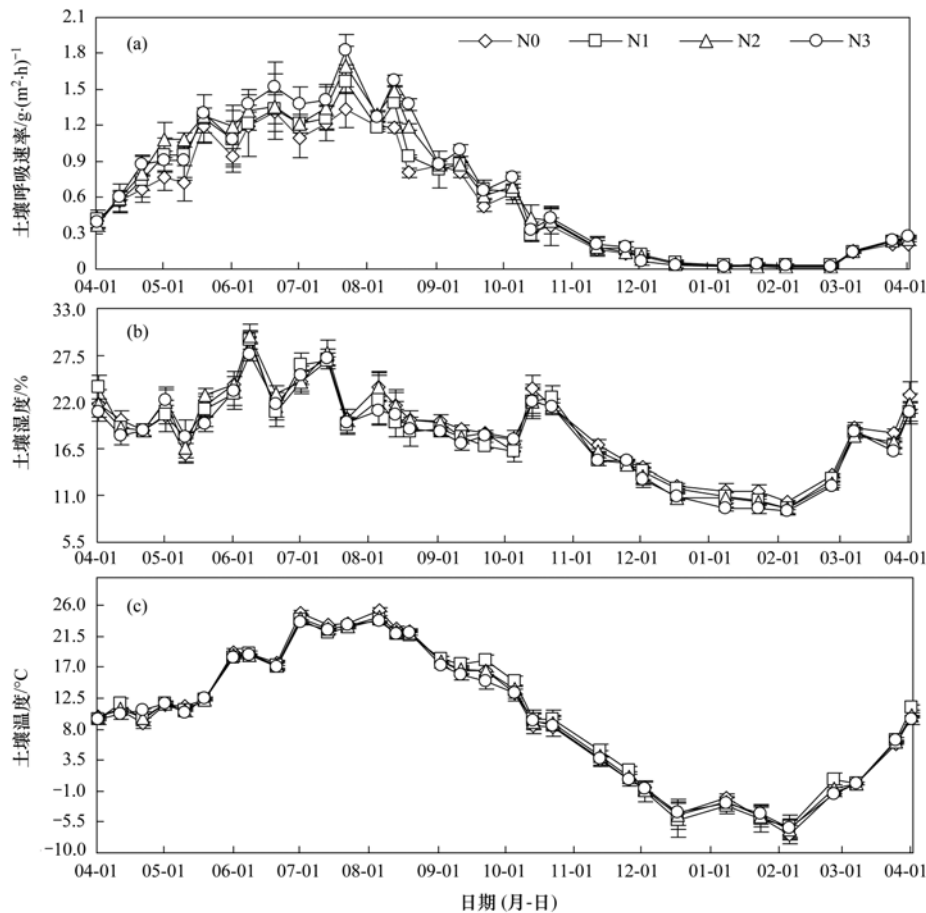
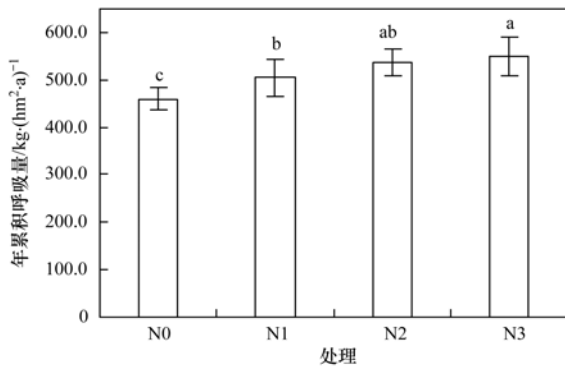


图 2 不同施氮水平下紫花苜蓿土壤呼吸、土壤湿度和土壤温度变化特征

Fig. 2 Dynamics of soil respiration, soil moisture, and soil temperature of the alfalfa grassland treated with different nitrogen levels

积土壤呼吸量分别为 504.3、536.6 和 548.5 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ，与 N0 [459.8 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 相比，年累积土壤呼吸量分别提高 9.6%、16.7% 和 19.2%。经方差分析表明，施氮(N1、N2 和 N3)处理下累积土壤呼吸量均显著高于不施氮(N0)处理($P < 0.05$)，N1 和 N3 累积土壤呼吸量达显著性差异($P < 0.05$)，而 N2 和 N1、N3 之间累积土壤呼吸量差异不显著($P > 0.05$)。



图中相同小写字母表示处理间无显著差异($P > 0.05$)，不同小写字母表示处理间存在显著差异($P < 0.05$)，下同
图 3 不同施氮水平下紫花苜蓿草地年土壤累积呼吸量比较

Fig. 3 Cumulative soil respiration in the alfalfa grassland under different nitrogen levels

表 1 紫花苜蓿草地土壤呼吸速率(R_s)与土壤温度(T)的拟合模型及 Q_{10} 值¹⁾

Table 1 Regression equations between soil respiration (R_s) and soil temperature, and Q_{10} values under different nitrogen levels

项目	生长季	非生长季	全年
N0	$R_s = 0.339e^{0.053 T}$, $R^2 = 0.54^{**}$, $Q_{10} = 1.70$	$R_s = 0.062e^{0.183 T}$, $R^2 = 0.66^{**}$, $Q_{10} = 6.23$	$R_s = 0.076e^{0.136 T}$, $R^2 = 0.80^{**}$, $Q_{10} = 3.91$
N1	$R_s = 0.344e^{0.057 T}$, $R^2 = 0.46^{**}$, $Q_{10} = 1.78$	$R_s = 0.079e^{0.184 T}$, $R^2 = 0.72^{**}$, $Q_{10} = 6.46$	$R_s = 0.095e^{0.139 T}$, $R^2 = 0.85^{**}$, $Q_{10} = 3.95$
N2	$R_s = 0.384e^{0.056 T}$, $R^2 = 0.49^{**}$, $Q_{10} = 1.74$	$R_s = 0.068e^{0.187 T}$, $R^2 = 0.75^{**}$, $Q_{10} = 6.50$	$R_s = 0.084e^{0.142 T}$, $R^2 = 0.85^{**}$, $Q_{10} = 4.12$
N3	$R_s = 0.319e^{0.069 T}$, $R^2 = 0.62^{**}$, $Q_{10} = 2.05$	$R_s = 0.075e^{0.188 T}$, $R^2 = 0.76^{**}$, $Q_{10} = 6.55$	$R_s = 0.088e^{0.143 T}$, $R^2 = 0.86^{**}$, $Q_{10} = 4.17$

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$, 下同

2.2.2 土壤呼吸速率与土壤湿度和土壤温度的关系

不同施氮水平下紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率与土壤湿度实测数据采用单因素方程进行回归分析，结果表明土壤呼吸速率与土壤湿度拟合模型均不显著($P < 0.05$ ，表 2)。为了提高紫花苜蓿草地土壤呼吸速率预测的准确性，本试验以紫花苜蓿生长季内土壤温度和土壤湿度为变量，分别采用线性和非线性双因素复合模型分析土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸速率的协同作用(表 2)。结果表明，线性和非线性双因素复合模型均可描述紫花苜蓿草地土壤温度和土壤湿度对土壤呼吸速率的影响，且

2.2 紫花苜蓿草地土壤呼吸速率与土壤水热的关系

2.2.1 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

不同施氮条件下紫花苜蓿全年土壤温度变化与气温变化基本一致，均呈现先升高后降低再升高的趋势。方差分析表明，施氮对紫花苜蓿生长季、非生长季和全年的土壤温度均无显著性影响($P > 0.05$)。紫花苜蓿草地土壤呼吸速率变化与土壤温度有显著地指数相关关系($P < 0.05$ ，表 1)。不同施氮水平下紫花苜蓿生长季、非生长季和全年的土壤呼吸速率与土壤温度拟合指数模型均达极显著水平($P < 0.01$)，且指数模型的相关性系数 R^2 值表现为紫花苜蓿生长季(0.46 ~ 0.62) < 非生长季(0.66 ~ 0.76) < 全年(0.80 ~ 0.86)。紫花苜蓿非生长季和全年的土壤呼吸敏感性系数 Q_{10} 均随施氮量的增加相关性(R^2 值)逐渐增大，而紫花苜蓿生长季内相关性系数 R^2 值随施氮量的增加表现出先降低后增加趋势，具体表现为 N3 (0.62) > N0 (0.54) > N2 (0.49) > N1 (0.46)。紫花苜蓿生长季、非生长季和全年的土壤呼吸敏感性系数 Q_{10} 均随施氮量的增加而增加，表明施氮有效增加了紫花苜蓿生长季内温度敏感性系数。

不同施氮条件下土壤呼吸速率与土壤温度和土壤湿度的拟合线性双因素模型均达到极显著水平($P < 0.01$)。与非线性模型相关系数 R^2 值相比，线性双因素复合模型拟合效果较好，可以解释紫花苜蓿草地生长季土壤呼吸速率季节变化的 68% ~ 80%。不同施氮水平下土壤湿度和土壤温度对紫花苜蓿生长季内土壤呼吸的影响具体表现为 N3 > N2 > N0 > N1，表明施氮量为 N3 (180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下，土壤呼吸速率对土壤温度和土壤湿度更为敏感，在一定施氮范围内适当减小施氮量可降低土壤呼吸速率对土壤水热的敏感性。

表 2 紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率(R_s)与土壤湿度(W)和土壤温度(T)关系方程

Table 2 Relationships of soil respiration rates (R_s) with soil moisture (W) and soil temperature (T) during the alfalfa growing season

项目	土壤呼吸速率(R_s)与土壤水分(W)关系	土壤呼吸速率(R_s)与土壤水分(W)和土壤温度(T)的复合关系	
	$R_s = aW^2 + bW + c$	线性模型 $R_s = a + bW + cT$	非线性模型 $R_s = aW^b e^{cT}$
N0	$R_s = -0.001W^2 + 0.065W - 0.23$, $R^2 = 0.18$	$R_s = 0.089 + 0.015W + 0.031T$, $R^2 = 0.73^{**}$	$R_s = 0.177W^{0.367} e^{0.031T}$, $R^2 = 0.51^{**}$
N1	$R_s = -0.001W^2 + 0.076W - 0.14$, $R^2 = 0.08$	$R_s = 0.333 + 0.002W + 0.038T$, $R^2 = 0.68^{**}$	$R_s = 0.445W^{0.069} e^{0.037T}$, $R^2 = 0.45^{**}$
N2	$R_s = -0.001W^2 + 0.097W - 0.52$, $R^2 = 0.19$	$R_s = 0.197 + 0.010W + 0.040T$, $R^2 = 0.76^{**}$	$R_s = 0.329W^{0.191} e^{0.036T}$, $R^2 = 0.49^{**}$
N3	$R_s = -0.001W^2 + 0.074W - 0.17$, $R^2 = 0.12$	$R_s = 0.179 + 0.001W + 0.056T$, $R^2 = 0.80^{**}$	$R_s = 0.466W^{0.022} e^{0.048T}$, $R^2 = 0.61^{**}$

2.3 施氮对紫花苜蓿生长季草地土壤生化性质的影响

2.3.1 施氮对紫花苜蓿草地肥力变化的影响

不同施氮条件对紫花苜蓿土壤表层 0~20 cm 土壤肥力有不同的影响(表 3)。与不施氮(N0)相比,施氮(N1、N2 和 N3)明显降低了土壤的 pH 值和速效磷含量,其中 N2 水平下显著降低了土壤的 pH 值,而 N3 水平下显著降低了土壤速效磷含量;全氮和碱解氮含量在不同施氮水平下表现出不同的趋势,即当施氮量低于 N2 水平时,全氮和碱解氮含量随施氮

量的增加而增加,继续增施氮肥超过 N2 水平时则略有下降;土壤速效钾和土壤有机质含量随施氮量的增加而逐步增加,而全盐含量不随施氮量的增加而发生明显的规律性变化。从不同测定时期来看,紫花苜蓿土壤表层 0~20 cm 土壤肥力也有不同的变化趋势(表 3)。紫花苜蓿第 1 茬(5 月 24 日)至第 4 茬(9 月 16 日),土壤 pH 值呈逐渐减小趋势;全氮和碱解氮含量呈先升高后降低的趋势;土壤速效磷和土壤有机质含量均呈逐渐增加趋势;速效钾无明显变化规律;全盐含量呈先减小后增加的趋势。

表 3 不同施氮水平下紫花苜蓿生长季内不同时期表层 0~20 cm 土壤肥力变化特征¹⁾

Table 3 Characteristics of available nutrients in 0-20 cm of soil in the alfalfa grassland during the growing season under different nitrogen levels								
日期(月-日)	处理	pH	全氮 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	速效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	全盐 /g·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹
05-24	N0	8.53±0.08a	0.88±0.07b	57.57±2.23b	9.55±0.41a	103.7±8.08ab	0.31±0.03ab	15.23±1.05b
	N1	8.46±0.09ab	0.93±0.03b	63.33±4.01a	9.14±0.62a	98.6±5.61b	0.35±0.05ab	16.52±1.46ab
	N2	8.31±0.11b	1.11±0.11a	59.71±3.30ab	8.95±0.73a	109.4±5.11ab	0.27±0.06b	17.17±0.74a
	N3	8.34±0.14b	1.08±0.08a	63.17±6.18a	9.21±0.47a	110.3±3.16a	0.37±0.04a	16.95±0.41ab
06-25	N0	8.41±0.10a	1.07±0.05b	61.31±5.49b	10.64±0.91a	99.2±3.54b	0.27±0.04b	16.55±1.55b
	N1	8.33±0.07ab	1.12±0.05ab	58.93±3.41b	10.17±0.88ab	112.7±4.07a	0.31±0.02a	17.18±0.76ab
	N2	8.29±0.14b	1.21±0.06a	64.29±9.17a	9.86±0.33b	101.3±4.96b	0.29±0.03ab	17.83±0.55ab
	N3	8.27±0.17b	1.16±0.06ab	59.61±3.93b	9.49±0.31b	108.4±8.21b	0.28±0.03ab	18.36±1.20a
07-30	N0	8.33±0.16a	1.04±0.05c	58.36±3.55b	11.21±0.80a	107.3±5.08b	0.36±0.08a	17.85±0.85b
	N1	8.21±0.16ab	1.16±0.06ab	67.46±5.30a	10.21±0.45a	98.5±4.27b	0.31±0.03a	18.59±0.81ab
	N2	8.17±0.06b	1.13±0.03b	65.29±1.56ab	11.08±0.23a	103.7±7.29b	0.35±0.03a	18.51±0.36ab
	N3	8.24±0.23ab	1.21±0.03a	63.78±3.73ab	10.31±0.76a	121.3±5.90a	0.38±0.05a	19.33±1.27a
09-16	N0	8.35±0.08a	0.98±0.06b	56.71±1.54b	12.73±0.90a	96.1±4.26ab	0.42±0.05a	18.53±1.49ab
	N1	8.28±0.08a	1.06±0.06ab	61.34±1.50a	11.78±0.76b	103.4±5.97a	0.37±0.02b	17.48±0.89b
	N2	8.21±0.12a	1.18±0.10a	59.72±0.52ab	11.23±0.21b	99.3±6.60ab	0.41±0.04a	18.91±0.65ab
	N3	8.13±0.15b	1.15±0.07a	57.37±4.44b	12.39±0.88a	94.9±3.38b	0.39±0.03ab	19.95±0.30a
平均值	N0	8.40±0.19a	0.99±0.75c	58.49±3.57c	11.03±0.87a	101.58±4.44c	0.34±0.05ab	17.04±1.11c
	N1	8.32±0.18b	1.07±0.15b	62.76±4.78a	10.35±0.77b	103.31±5.31b	0.33±0.03ab	17.44±0.98b
	N2	8.25±0.13c	1.16±0.16a	62.25±6.76a	10.34±0.75b	103.51±4.31b	0.32±0.05b	18.41±0.56a
	N3	8.24±0.18c	1.15±0.14a	60.98±5.67b	10.28±0.89c	108.72±3.89a	0.35±0.04a	18.65±0.56a

1) 表中数据表示测定指标平均值±标准差;同列不同小写字母表示显著性差异(P<0.05)

2.3.2 施氮对紫花苜蓿草地土壤酶活性的影响

不同施氮水平下紫花苜蓿草地土壤脲酶活性均表现为第 3 茬(7 月 30 日)>第 2 茬(6 月 25 日)>第 4 茬(9 月 16 日)>第 1 茬(5 月 24 日)。在同一刈割茬次内,土壤脲酶活性随施氮量的增加而逐渐提高,当施氮量增加到一定值时,继续增施氮肥,其增高效果在不同刈割茬次下表现出不同的趋势;其中第 1 茬、第 3 茬和第 4 茬刈割后土壤脲酶活性随施氮量的增加而提高;第 2 茬刈割后,当施氮量低于 N2 水平时,土壤脲酶活性随施氮量的增加而增加,当施氮量超过 N2 水平时则略有下降[图 4(a)]。土壤蔗糖酶活性从第 1 茬刈割后开始逐渐降低,第 3 茬刈割后达到最小值,然后又开始缓慢升高;与不施氮(N0)相比,施氮显著提高了紫花苜蓿各茬次土壤蔗糖酶活性(P<0.05)[图 4(b)]。不

同施氮水平下紫花苜蓿草地土壤碱性磷酸酶活性均表现为第 2 茬>第 3 茬>第 1 茬>第 4 茬。紫花苜蓿第 1 茬刈割后土壤碱性磷酸酶活性随施氮量的增加而逐渐增加,表现为 N0<N1<N2<N3;施氮对紫花苜蓿第 2 茬、第 3 茬和第 4 茬刈割后土壤碱性磷酸酶活性无显著影响(P>0.05)[图 4(c)]。不同施氮水平下紫花苜蓿草地过氧化氢酶活性从第 1 茬刈割后开始逐渐升高,第 2 茬刈割后达最大值,然后又开始快速下降。在紫花苜蓿第 1 茬和第 4 茬刈割后,与 N0 相比,施氮明显提高了过氧化氢酶活性(P<0.05);第 2 茬和第 3 茬刈割后过氧化氢酶活性随施氮量的增加呈先降低后逐渐增加趋势,其中,第 2 茬刈割后过氧化氢酶活性具体表现为 N1<N0<N3<N2,第 3 茬表现为 N1<N0<N2<N3[图 4(d)]。

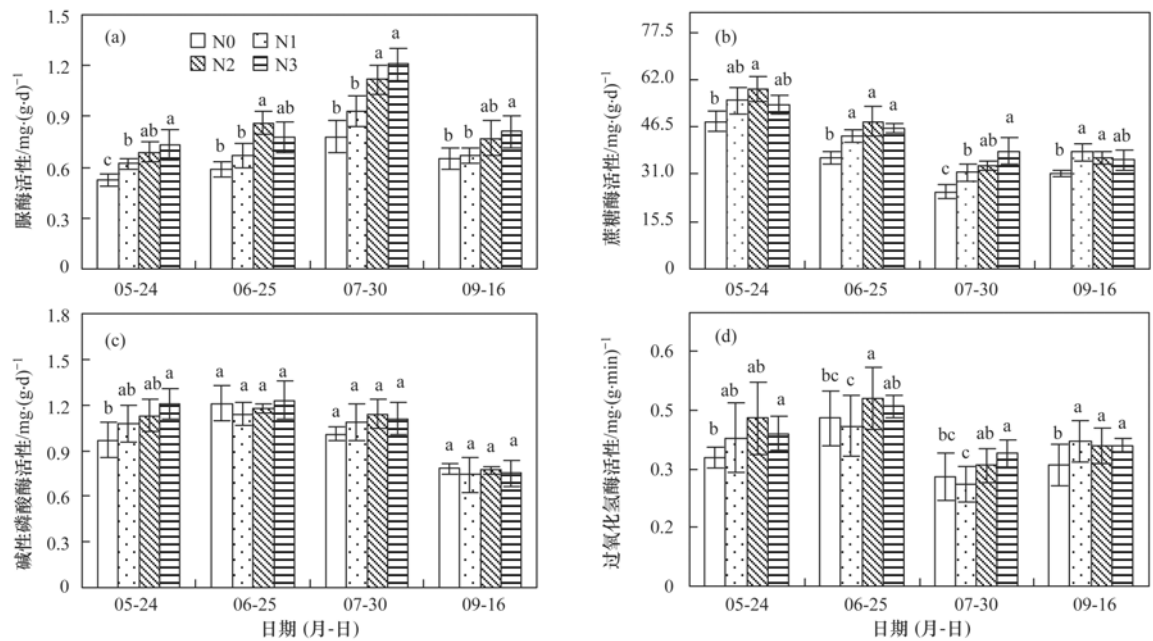


图4 不同施氮水平下紫花苜蓿生长季内不同时期土壤酶活性的变化

Fig. 4 Variation trends of soil enzyme activity during the alfalfa growing seasons under different nitrogen levels

2.4 紫花苜蓿生长季土壤呼吸速率与土壤生化性质的关系

综合分析紫花苜蓿生长季土壤呼吸速率与土壤生化性质的关系,以紫花苜蓿生长季内各茬次4个施氮水平处理的土壤呼吸速率平均值与其土壤生化性质平均值之间进行相关矩阵分析.由表4可知,紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率(R_s)与土壤pH值呈极显著负相关($P < 0.01$),与土壤

TN、URE呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤SOM呈显著的正相关($P < 0.05$),与INV呈显著负相关($P < 0.05$).土壤TN与土壤pH值呈极显著负相关($P < 0.01$),与AN、AK和ALP呈显著的正相关($P < 0.05$),与SOM、URE呈极显著的正相关($P < 0.01$).土壤URE与pH值呈极显著负相关($P < 0.01$),与SOM、URE呈极显著的正相关($P < 0.01$).

表4 紫花苜蓿生长季土壤呼吸速率与土壤生化性质之间的相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of soil respiration and soil biochemical parameters by using data from the alfalfa growing season

	R_s	pH	TN	AN	AP	AK	ST	SOM	CAT	INV	ALP	URE
R_s	1											
pH	-0.88 **	1										
TN	0.64 **	-0.69 **	1									
AN	0.37	-0.41	0.56 *	1								
AP	0.13	-0.01	-0.42	-0.29	1							
AK	0.26	-0.37	0.58 *	0.08	-0.37	1						
ST	-0.03	-0.03	-0.24	-0.22	0.61 *	-0.16	1					
SOM	0.52 *	-0.78 **	0.86 **	0.57 *	-0.25	0.55 *	-0.22	1				
CAT	-0.08	-0.01	0.13	-0.12	-0.52 *	0.15	-0.54 *	-0.11	1			
INV	-0.53 *	0.36	0.13	-0.01	-0.80 **	0.25	-0.43	-0.18	0.65 **	1		
ALP	0.21	-0.27	0.53 *	0.49 *	-0.71 **	0.48	-0.72 **	0.06 *	0.41	0.42	1	
URE	0.82 **	-0.84 **	0.73 **	0.48	0.02	0.37	0.20	0.85 **	-0.26	-0.33	0.19	1

3 讨论

3.1 不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸速率的影响

全球陆地生态系统土壤呼吸具有明显地季节变化^[19, 31].本试验中不同施氮水平下紫花苜蓿草地土壤呼吸速率季节变化趋势基本一致,土壤呼吸速率峰值均出现在紫花苜蓿生长旺盛时期的7~8月,表明紫花苜蓿草地土壤呼吸速率的季节性变化受施

氮措施的影响较小,这主要是因为土壤温度是影响土壤呼吸速率的最重要的因子,土壤温度的季节性变化使作物根系生长和土壤微生物活动也发生变化,从而导致土壤呼吸具有明显地季节变化特征^[14, 19].本研究中,施氮对土壤呼吸速率的影响因紫花苜蓿生长时期的不同而表现出不同的效果.施氮对紫花苜蓿非生长季土壤呼吸无显著性影响($P > 0.05$).土壤呼吸主要包括根呼吸(自养呼吸)和土壤微生物呼吸(异养呼吸),作物光合产物控制根

系呼吸, 土壤有机质控制异养呼吸^[19]. 紫花苜蓿非生长季内空气温度低于其生长的最低温度, 紫花苜蓿停止生长, 施氮对自养呼吸无显著影响; 土壤温度降低会使土壤酶活性和一系列生化反应速率受到抑制, 施氮对异养呼吸也无显著影响, 所以不同施氮水平条件下紫花苜蓿非生长季土壤呼吸的差异不大. 紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率随施氮量的增加而增加, 与不施氮肥 (N0) 相比, 施氮处理下 (N1、N2 和 N3) 土壤呼吸速率分别提高了 10.2%、18.2% 和 21.5%. 施氮促进了紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率的原因可能是由于施氮加速了作物根系的生长, 根系呼吸增强^[7, 16]. 同时, 根系生物量的增加促进了根系分泌物的增多, 提高了根系微生物的数量和活性, 从而增加了土壤微生物呼吸速率^[7, 15]. 另外, 增加氮肥促进了植物的光合作用, 提高了返还土壤的残余量 (根茬和秸秆), 为自养呼吸和异养呼吸提供更多的底物^[14].

3.2 不同施氮水平下土壤呼吸速率与土壤水热的关系

土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸速率的两个主要的环境因子^[5, 13]. 有关土壤温度和土壤呼吸的关系研究较多, 其中采用指数模型模拟效果较好^[7, 27]. 本研究中, 不同施氮水平下紫花苜蓿生长季、非生长季和全年的土壤呼吸速率与土壤温度拟合指数模型均达极显著水平 ($P < 0.01$), 且指数模型的决定系数 R^2 值表现为生长季 (0.46 ~ 0.56) < 非生长季 (0.66 ~ 0.76) < 全年 (0.80 ~ 0.86). 土壤呼吸温度敏感性系数 (Q_{10}) 是反映土壤呼吸对温度变化敏感性的重要指标, 对了解未来气候变化条件下陆地生态系统的土壤呼吸速率变化有指导意义^[7, 15]. 陆地生态系统的 Q_{10} 值一般在 1.3 ~ 5.6 之间变化^[32, 33]. 本研究中, Q_{10} 值在紫花苜蓿非生长季 (6.23 ~ 6.55) 均大于生长季 (1.70 ~ 2.05), 这与 Luo 等^[33] 的研究结果相同. 目前, 有关氮添加对土壤呼吸 Q_{10} 值的研究并未形成统一的结论, 还存在诸多的不确定性^[34]. 姜继韶等^[7] 在农田生态系统研究中发现, 施氮明显降低了土壤呼吸 Q_{10} 值; 李银坤等^[35] 在华北地区研究施肥对夏玉米土壤呼吸的影响时也发现, 施氮处理的土壤呼吸显著高于不施氮处理, 且土壤呼吸 Q_{10} 值随施氮肥的增加而增大; 而张俊丽等^[15] 在对旱作玉米田研究中发现当施氮量低于 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土壤呼吸 Q_{10} 值随施氮量的增加而增大, 但当施氮量增加至 $320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土壤呼吸 Q_{10} 值反而低于不施氮处理. 本试验研究表明施氮明显促进了紫花苜蓿生长季和非生长季

土壤呼吸 Q_{10} 值的升高, 这可能是由于施氮提高了土壤微生物数量和群落结构, 影响了土壤的底物数量和质量以及土壤的水热状况, 促进了土壤微生物呼吸的温度敏感性, 从而导致了土壤呼吸的 Q_{10} 值增大^[34].

土壤湿度是影响土壤呼吸速率的另一个重要的因素^[15, 27]. 有研究表明, 土壤湿度通过改变根和微生物的生理过程来直接影响土壤呼吸速率^[36, 37], 另外土壤湿度还可通过影响底物和氧气的扩散来间接影响土壤呼吸速率^[15, 38]. 本研究通过紫花苜蓿生长季内草地土壤呼吸速率与土壤水分实测数据采用一元二次方程进行回归分析, 结果表明土壤呼吸与土壤水分拟合模型均不显著, 这与马涛等^[39] 和严俊霞等^[40] 的研究结果一致. 张前兵等^[13] 和张俊丽等^[15] 的研究认为土壤湿度往往是通过与土壤温度的共同作用来影响土壤呼吸速率. 本研究分别采用线性 ($R_s = a + bW + cT$) 和非线性 ($R_s = aW^b e^{cT}$) 的双因素复合模型分析紫花苜蓿生长季内 10 cm 土壤温度和土壤水分与土壤呼吸速率的协同作用. 结果表明, 土壤温度和土壤湿度与土壤呼吸速率的拟合双因素复合模型 R^2 值均达到极显著水平 ($P < 0.01$). 与单因素模型相比, 采用双因素模型能较好地模拟土壤温度和土壤水分与土壤呼吸速率的关系. 与非线性双因素模型相关系数 R^2 值相比, 线性双因素模型拟合效果较好, 可以解释紫花苜蓿草地生长季土壤呼吸速率季节变化的 68% ~ 80%. 不同施氮水平下土壤水分和土壤温度对土壤呼吸的影响具体表现为 $N3 > N2 > N0 > N1$, 表明施氮量为 N3 ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 下, 土壤呼吸对土壤温度和土壤水分更为敏感, 在一定施氮范围内减小施氮量可降低其对土壤水热的敏感性. 因此, 通过建立双因素模型分析土壤水热状况与土壤呼吸速率的关系, 可提高施氮对紫花苜蓿草地土壤呼吸速率预测的准确性.

3.3 不同施氮水平对紫花苜蓿生长季土壤生化性质的影响

大量的研究表明, 施氮对作物根区土壤养分、土壤微生物量和土壤酶活性均有一定的影响^[4, 30, 41]. 本试验中, 紫花苜蓿土壤 pH 值随施氮量的增加逐渐降低, 该结果与前人研究结果相同^[11, 12]. 张进霞等^[12] 的研究表明, 施氮可以提高紫花苜蓿草地土壤全氮和土壤碱解氮含量. 赵莉^[42] 认为适量的增施氮肥能大幅度提高土壤全氮和土壤碱解氮含量, 过量施氮时将会导致土壤养分的下降. 本试验也得出相同结论, 即随施氮量水平的增加紫花苜蓿草地土壤全氮和碱解氮均呈先升高

后降低的趋势,最大值均出现在 N2 水平. 陈林等^[11]的研究表明,施氮能有效提高土壤有机质含量. 本试验中,施氮可提高紫花苜蓿草地土壤有机质含量,表现为 $N3 > N2 > N1 > N0$,这可能是由于施氮增加了返还土壤的残余量及根系生物量,进而提高了土壤有机质的含量.

土壤酶活性是表征紫花苜蓿草地土壤微生物和土壤肥力的有效生物学指标^[4, 41, 43]. 国内外有关研究认为土壤酶活性主要来自于植物根系、土壤微生物以及残体分解物,与土壤水气热条件、土壤理化性质、土壤类型、施肥、耕作以及季节性等密切相关^[12, 30, 41]. 吴秀臣等^[44]的研究表明,土壤水分和土壤温度是土壤酶活性发生季节变化的重要原因,过高或过低的土壤水热条件均会引起土壤酶活性的降低. 本试验中 4 种酶活性(蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶)在不同时期所表现出不同的差异也说明了这一点. 梁国鹏等^[45]的研究表明,适量施入氮肥一方面能够改善土壤养分状况,促进作物根系生长,进而分泌更多土壤酶来吸收养分,以满足作物生长需求;另一方面能促进土壤微生物的生长及繁殖,最终提高根际土壤酶活性. 曾艳等^[46]的结果表明,施用合理氮肥能提高桑园土壤磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性,过多的施用氮肥,土壤过氧化氢酶、磷酸酶活性受到抑制. 本试验中,施氮明显提高了紫花苜蓿土壤脲酶和蔗糖酶活性,而施氮对土壤碱性磷酸酶和土壤过氧化氢酶活性在紫花苜蓿生长季不同刈割茬次内表现为不同的变化趋势,这可能是由于不同土壤酶活性对外界环境条件及土壤理化性质的响应不同所致^[30, 41].

3.4 土壤呼吸速率与土壤生化性质的关系

土壤呼吸是一个复杂的生物化学过程,除受土壤温度和土壤水分影响外,还受土壤质地、土壤酶活性、土壤活性碳氮、土壤 pH 值和底物供应等因素的影响^[4, 15, 27]. 其中,土壤酶活性是影响土壤微生物活性和土壤状况的重要指标之一^[41, 42]. 陈书涛等^[41]的研究表明,土壤酶活性的增强,可导致土壤有机质周转速度加快,从而促进了土壤呼吸的增强. 土壤有机质作为陆地生态系统最大的碳库,不仅为作物的生长发育提供了养分,同时为土壤微生物进行分解活动提供了营养和能量,因而有机质对土壤呼吸而言至关重要^[15]. 郭胜利等^[47]的研究表明,不同施氮条件下黄土旱塬区麦田土壤呼吸速率与土壤活性有机碳氮含量呈显著正相关. 张滕等^[25]认为土壤 pH 值通过调控土壤中化学反应和微生物体内酶的多样性来影响土壤呼吸速率. Xu 等^[48]对加利福尼亚北部幼龄黄松林中发现土壤表

层 10 cm 的 pH 值与土壤呼吸速率呈负相关,可引起 34% 的土壤呼吸的变化. 本研究在前人研究的基础上通过对各茬次紫花苜蓿草地土壤呼吸平均值与其土壤生化性质之间进行相关矩阵分析,结果表明紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率(R_s)与土壤 pH 值呈极显著负相关($P < 0.01$),与土壤 TN、URE 呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤 SOM 呈显著的正相关($P < 0.05$),与 INV 呈显著负相关($P < 0.05$). 因此,土壤呼吸过程较为复杂,除对无机环境因素进行评价之外,生物过程和人为因素的研究也应该进一步加强,同时完善各因素间的交互作用对土壤呼吸影响机制的研究.

4 结论

(1) 不同施氮水平下紫花苜蓿草地土壤呼吸均表现出明显的季节性变化规律,峰值出现在 7 月下旬,最低值出现在 12 月中旬;紫花苜蓿生长季土壤呼吸速率随施氮量的增加逐渐增强, N1、N2 和 N3 施氮水平下的土壤呼吸速率均值分别为 0.97、1.04 和 $1.07 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,与 N0 [$0.88 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] 相比,土壤呼吸速率分别增加了 10.2%、18.2% 和 21.6%;紫花苜蓿非生长季内,施氮对土壤呼吸速率无显著影响($P > 0.05$).

(2) 不同施氮水平下紫花苜蓿生长季、非生长季和全年的土壤呼吸速率与土壤温度拟合指数模型均达极显著水平($P < 0.01$),且指数模型的决定系数 R^2 值表现为生长季(0.46 ~ 0.62) < 非生长季(0.66 ~ 0.76) < 全年(0.80 ~ 0.86). 紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率(R_s)受地下 10 cm 处土壤温度与土壤水分的综合影响,采用土壤温度和土壤水分双因素线性模型($R_s = a + bW + cT$)能较好地拟合土壤呼吸速率的变化,两者可以解释土壤呼吸速率季节变化的 68% ~ 80%.

(3) 施氮在不同程度上降低了紫花苜蓿草地土壤的 pH 值和 AP,提高了 AK、SOM、土壤脲酶和蔗糖酶活性. TN 和 AN 在不同施氮水平下表现出不同的趋势,当施氮量在 0 ~ $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, TN 和 AN 随施氮量的增加而增加,继续增施氮肥超过 N2 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 水平时则略有下降.

(4) 紫花苜蓿生长季内土壤呼吸速率(R_s)与土壤 pH 值呈极显著负相关($P < 0.01$),与土壤 TN、URE 呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤 SOM 呈显著的正相关($P < 0.05$),与 INV 呈显著负相关($P < 0.01$).

(5) 紫花苜蓿土壤呼吸速率除受土壤温度和水分的影响外,土壤生化性质对其也有重要影响.

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] Hursh A, Ballantyne A, Cooper L, *et al.* The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale[J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(5): 2090-2103.
- [3] 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.
- [4] Liang G P, Wu H J, Houssou A A, *et al.* Soil respiration, glomalin content, and enzymatic activity response to straw application in a wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(3): 697-707.
- [5] 张建华, 唐志尧, 沈海花, 等. 氮添加对北京东灵山地区灌丛土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2017, **41**(1): 81-94.
Zhang J H, Tang Z Y, Shen H H, *et al.* Effects of nitrogen addition on soil respiration in shrublands in Mt. Dongling, Beijing, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, **41**(1): 81-94.
- [6] 叶成龙, 张浩, 周小龙, 等. 氮添加对高寒草甸土壤微生物呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(7): 2279-2287.
Ye C L, Zhang H, Zhou X L, *et al.* Effects of nitrogen additions on soil microbial respiration and its temperature sensitivity in a Tibetan alpine meadow[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(7): 2279-2287.
- [7] 姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 等. 施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1802-1809.
Jiang J S, Guo S L, Wang R, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on soil respiration and temperature sensitivity in spring maize field in semi-arid regions on loess plateau[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1802-1809.
- [8] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, *et al.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(5): 315-322.
- [9] Wang Q K, Liu S G, Wang Y P, *et al.* Influences of N deposition on soil microbial respiration and its temperature sensitivity depend on N type in a temperate forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **260-261**: 240-246.
- [10] 金皖豫, 李铭, 何杨辉, 等. 不同施氮水平对冬小麦生长期土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2015, **39**(3): 249-257.
Jin W Y, Li M, He Y H, *et al.* Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration during growing season in winter wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(3): 249-257.
- [11] 陈林, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同施氮水平下土壤的生化性质对干湿交替的响应[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(4): 675-683.
Chen L, Zhang J B, Zhao B Z, *et al.* Soil fertility and its response to drying-wetting alternation as affected by nitrogen fertilization rate[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, **50**(4): 675-683.
- [12] 张进霞, 刘晓静, 郝凤, 等. 氮磷调控对紫花苜蓿氮积累与土壤氮磷营养的影响[J]. *草地学报*, 2016, **24**(1): 61-68.
Zhang J X, Liu X J, Hao F, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus regulation on alfalfa nitrogen accumulation and the nitrogen and phosphorus nutrients of soil[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, **24**(1): 61-68.
- [13] 张前兵, 杨玲, 孙兵, 等. 干旱区灌溉及施肥措施下棉田土壤的呼吸特征[J]. *农业工程学报*, 2012, **28**(14): 77-84.
Zhang Q B, Yang L, Sun B, *et al.* Respiration characteristics of cotton soil under irrigation and fertilization measures in arid region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(14): 77-84.
- [14] 张彦军. 长期施肥对休闲季土壤呼吸温度敏感性的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, **50**(16): 3164-3174.
Zhang Y J. Effect of long-term fertilization on temperature sensitivity of soil respiration during fallow season[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(16): 3164-3174.
- [15] 张俊丽, 廖允成, 曾爱, 等. 不同施氮水平下旱作玉米田土壤呼吸速率与土壤水热关系[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(7): 1382-1388.
Zhang J L, Liao Y C, Zeng A, *et al.* Effects of different levels of N fertilizer on soil respiration, and its relation to soil moisture and soil temperature under rainfed land of summer maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(7): 1382-1388.
- [16] Tu L H, Hu T X, Zhang J, *et al.* Nitrogen addition stimulates different components of soil respiration in a subtropical bamboo ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 255-264.
- [17] Jia X X, Shao M A, Wei X R. Responses of soil respiration to N addition, burning and clipping in temperate semiarid grassland in northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **166-167**: 32-40.
- [18] Fang C, Ye J S, Gong Y H, *et al.* Seasonal responses of soil respiration to warming and nitrogen addition in a semi-arid alfalfa-pasture of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **590-591**: 729-738.
- [19] 张前兵, 杨玲, 王进, 等. 干旱区不同灌溉方式及施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(12): 2420-2430.
Zhang Q B, Yang L, Wang J, *et al.* Effects of different irrigation methods and fertilization measures on soil respiration and its component contributions in cotton field in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(12): 2420-2430.
- [20] Bowden R D, Davidson E, Savage K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**(1): 43-56.
- [21] 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.
- [22] Wei L, Su J H, Jing G H, *et al.* Nitrogen addition decreased soil respiration and its components in a long-term fenced grassland on the Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, **152**: 37-44.
- [23] Ward D, Kirkman K, Hagenah N, *et al.* Soil respiration declines with increasing nitrogen fertilization and is not related to productivity in long-term grassland experiments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **115**: 415-422.
- [24] Wang X Y, Zhao X Y, Li Y L, *et al.* Responses of soil respiration to simulated precipitation and nitrogen, phosphorus additions in Horqin Sandy Land of northeastern China[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, **22**(5): 1463-1471.
- [25] 张滕, 饶良懿, 吕坤珑, 等. 土壤呼吸影响因素研究进展[J]. *广东农业科学*, 2012, **39**(8): 64-67.
Zhang T, Rao L Y, Lv K L, *et al.* Some advance on effective factors of soil respiration[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012, **39**(8): 64-67.
- [26] 伏兵哲, 高雪芹, 张蓉, 等. 宁夏引黄灌区不同紫花苜蓿品

- 种比较[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, **45**(2): 71-78.
- Fu B Z, Gao X Q, Zhang R, *et al.* Comparison of different alfalfa cultivars in the Yellow River irrigation region of Ningxia [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, **45**(2): 71-78.
- [27] 崔海, 张亚红. 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[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1507-1515.
- Cui H, Zhang Y H. Diurnal and seasonal dynamic variation of soil respiration and its influencing factors of different fenced enclosure years in desert steppe[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1507-1515.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 106-107, 146-195.
- [29] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 260-360.
- [30] 南丽丽, 郁继华, 郭全恩. 荒漠灌区不同种植年限苜蓿地土壤酶活性的变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, **33**(6): 71-76.
- Nan L L, Yu J H, Guo Q E. The change of soil enzyme activities in alfalfa field with different growing years in arid desert oasis [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, **33**(6): 71-76.
- [31] 郝旺林, 梁银丽, 吴兴, 等. 不同前茬冬小麦土壤呼吸特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(11): 3167-3173.
- Hao W L, Liang Y L, Wu X, *et al.* Soil respiration variations in winter wheat field in different previous crops and its influencing factors[J]. Environmental Science, 2011, **32**(11): 3167-3173.
- [32] 陈骥, 曹军骥, 魏永林, 等. 青海湖北岸高寒草甸草原非生长季土壤呼吸对温度和湿度的响应[J]. 草业学报, 2014, **23**(6): 78-86.
- Chen J, Cao J J, Wei Y L, *et al.* Effect of grazing exclusion on soil respiration during the dormant season in alpine meadow grassland ecosystems on the northern shore of Qinghai Lake, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, **23**(6): 78-86.
- [33] 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.
- [34] 彭勇, 陈刚, 陈冠陶, 等. 模拟氮沉降对瓦屋山常绿阔叶次生林土壤呼吸的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21**(4): 733-739.
- Peng Y, Chen G, Chen G T, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in a secondary evergreen broad-leaved forest on Wawushan Mountain [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, **21**(4): 733-739.
- [35] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(1): 18-24.
- Li Y K, Chen M P, Xia X, *et al.* Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(1): 18-24.
- [36] 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.
- [37] Lagomarsino A, Lukac M, Godbold D L, *et al.* Drivers of increased soil respiration in a poplar coppice exposed to elevated CO₂ [J]. Plant and Soil, 2013, **362**(1-2): 93-106.
- [38] 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**(1): 187-194.
- [39] 马涛, 贾志清, 周波, 等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤呼吸及其与温度和水分的关系[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(1): 82-88, 95.
- Ma T, Jia Z Q, Zhou B, *et al.* Soil respiration of different land uses and its relation to water and temperature in hilly area of loess plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(1): 82-88, 95.
- [40] 严俊霞, 郝忠, 荆雪锴, 等. 太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3625-3633.
- Yan J X, Hao Z, Jing X K, *et al.* Interannual variations of soil respiration and its temperature sensitivity in an orchard in jinci region of taiyuan city [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3625-3633.
- [41] 陈书涛, 桑琳, 张旭, 等. 增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 703-709.
- Chen S T, Sang L, Zhang X, *et al.* Effects of warming and straw application on soil respiration and enzyme activity in a winter wheat cropland [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 703-709.
- [42] 赵莉. 氮添加对紫花苜蓿根区土壤养分及土壤微生物量的影响[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(6): 35-40.
- Zhao L. Effects of nitrogen addition on the soil nutrient and microbial biomass in root zone of *Medicagosativa* [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21**(6): 35-40.
- [43] 刘星, 汪金松, 赵秀海. 模拟氮沉降对太岳山油松林土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(14): 4613-4624.
- Liu X, Wang J S, Zhao X H. Effects of simulated nitrogen deposition on the soil enzyme activities in a *Pinus tabulaeformis* forest at the Taiyue Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(14): 4613-4624.
- [44] 吴秀臣, 孙辉, 杨万勤. 土壤酶活性对温度和 CO₂ 浓度升高的响应研究[J]. 土壤, 2007, **39**(3): 358-363.
- Wu X C, Sun H, Yang W Q. Effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide on activity of soil enzymes [J]. Soils, 2007, **39**(3): 358-363.
- [45] 梁国鹏, Albert H A, 吴会军, 等. 施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(6): 1917-1924.
- Liang G P, Albert H A, Wu H J, *et al.* Soil nitrogen content and enzyme activities in rhizosphere and non-rhizosphere of summer maize under different nitrogen application rates [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(6): 1917-1924.
- [46] 曾艳, 周柳强, 黄金生, 等. 不同氮肥处理对桑园土壤酶活性的影响[J]. 南方农业学报, 2013, **44**(2): 253-256.
- Zeng Y, Zhou L Q, Huang J S, *et al.* Enzymatic activity of mulberry garden soil using different nitrogen fertilizer treatments [J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, **44**(2): 253-256.
- [47] 郭胜利, 高会议, 党廷辉. 施氮水平对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳、氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(4): 808-814.
- Guo S L, Gao H Y, Dang T H. Effects of nitrogen application rates on grain yield, soil organic carbon and nitrogen under a rainfed cropping system in the loess tablelands of China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, **15**(4): 808-814.
- [48] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ 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.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)