

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期

Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析 唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)

珠江三角洲大气光化学氧化剂(O₃)与PM_{2.5}复合超标污染特征及气象影响因素 颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)

广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析 裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)

运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析 赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘水桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)

降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律 范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)

道路扬尘中PM_{2.5}粒度乘数的测定方法及特征 李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)

铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 淡默, 屈加豹, 雷团团 (1649)

燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险 倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)

兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性 赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)

大气污染排放格局优化方法及案例 李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响 李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)

基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析 金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)

新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)

漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价 黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)

近20年来鄱阳湖流域泛濫平原沉积物微量元素含量与污染变化 李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)

汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义 刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)

会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析 李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)

贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算 曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)

辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险 杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)

辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源 韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)

津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析 吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)

环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价 张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)

太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价 丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石浚哲, 邹华, 史红星 (1811)

淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价 程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)

三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价 詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)

三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)

反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估 辛慧敏, 林建伟, 詹艳慧 (1847)

锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体 李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)

太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解 张巧颖, 孙伟, 杜瑛琦, 巩小丽 (1870)

青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析 魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)

基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源 何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司徒壮 (1889)

老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为 范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)

磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮 王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)

城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响 于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)

基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析 王晓瞳, 杨宏 (1930)

ClO₂消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响 程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)

微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响 林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫫, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)

城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价 李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)

气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响 王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)

沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响 王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)

地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例 周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)

雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)

地质高背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素 代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)

不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响 刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)

影响不同农作物镉富集系数的土壤因素 陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)

Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响 张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)

不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响 李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)

铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性 陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)

微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力 张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)

动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播 张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)

区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用 万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)

《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)

气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响

王子龙¹, 刘传兴¹, 姜秋香^{1*}, 李世强², 柴迅³

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省水文水资源中心, 哈尔滨 150001; 3. 国网黑龙江省电力有限公司管理培训中心, 哈尔滨 150030)

摘要: 冬季土壤碳氮循环是全球生物地球化学循环的重要组成部分, 对气候变暖的响应极为敏感. 为更好地了解气候变暖对冻结期黑土碳氮动态的影响, 本试验采用红外辐射仪模拟土壤增温, 并进行了两种不同水平的增温研究 (W1 和 W2). 结果表明, 在冻结期 (2019 年 11 月至翌年 1 月), 与对照处理 (C) 相比, 模拟增温使表层土壤温度 (0 cm 土壤温度) 分别上升 1.54°C (W1) 和 4.10°C (W2), 并显著增加了土壤含水量, 这很可能是由于积雪融化造成的. 两种增温水平均降低了积雪覆盖厚度、土壤冻结深度、土壤有机碳 (SOC) 含量及活性有机碳 (LC) 含量. 而冻结期增温对黑土氮循环关键过程及指标的影响则相对更复杂, 随着增温幅度的提升, 硝态氮 (NO_3^- -N) 含量显著降低、全氮 (TN) 含量及净氮硝化速率明显增加, 而铵态氮 (NH_4^+ -N)、总无机氮 (TIN) 含量及净氮矿化速率则显著地呈现出先增加后降低的趋势. 气候变暖将给冻结期黑土带来更为温暖湿润的环境, 并且由此引起的土壤碳氮含量及转化过程的变化将会对随后生长季植物和微生物群落的结构组成、生产力及碳氮循环等过程产生深远的影响. 这为研究冻结期东北黑土碳氮循环机制提供了一定的科学依据.

关键词: 气候变暖; 冻结期; 黑土; 碳循环; 氮循环

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1967-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007204

Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period

WANG Zi-long¹, LIU Chuan-xing¹, JIANG Qiu-xiang^{1*}, LI Shi-qiang², CHAI Xun³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Hydrology and Water Resources Center, Harbin 150001, China; 3. State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited Management Training Center, Harbin 150030, China)

Abstract: As an critical part of the global biogeochemical cycle, the winter soil carbon and nitrogen cycles are extremely sensitive to climate warming. Furthermore, the black soil in northeast China is fertile and rich in organic matter and is a vital production base of commodity grains in China. For as long as half a year, the black soil is in a freezing-thawing state. Climate warming will change the snow cover thickness and soil freezing degree on the surface of the black soil in the winter and affect the freezing-thawing cycle frequency and timing of the soil, thus exerting a profound influence on the fixation, transformation, and release of soil carbon and nitrogen during the freezing period and throughout the year. To better understand the effects of climate warming on the black soil carbon and nitrogen dynamics during the freezing period, an experiment was conducted with two warming levels (W1 and W2) using an infrared radiometer to simulate soil warming. The warming increased the surface soil temperature (0 cm soil temperature) by 1.54°C (W1) and 4.10°C (W2), respectively, and significantly increased the soil moisture content compared with the control (C) during the freezing period, most likely because of the melting snow. The snow cover thickness, soil freezing depth, soil organic carbon (SOC), and labile organic carbon (LC) content were reduced by both warming treatments. However, the effect of the temperature increase during the freezing period on the key processes and indicators of the nitrogen cycle in black soil was relatively more complicated. With the increase in temperature, the content of nitrate nitrogen (NO_3^- -N) decreased significantly, and the content of total nitrogen (TN) and net nitrogen nitrification rate increased significantly, while the ammonium nitrogen (NH_4^+ -N), total inorganic nitrogen (TIN) content, and the net nitrogen mineralization rate exhibited a significant increase first and then decreased. In summary, climate warming will bring a warmer and more humid environment to the black soil during the freezing period, and the resulting changes in the soil carbon and nitrogen content and transformation processes will have a profound impact on the structure, productivity of the plants and microbial communities, and carbon and nitrogen cycles in the subsequent growing season. The results provide a scientific basis for studying the carbon and nitrogen cycle mechanisms of the northeast black soil during the freezing period.

Key words: climate change; freezing period; black soil; carbon cycle; nitrogen cycle

19 世纪 80 年代以来, 由于工业化的全面推进, 大气层中的 CO_2 浓度不断攀升, 致使全球地表平均温度提高了 0.74°C, 预计在 21 世纪末期温度又将持续增加 1.8~4°C^[1]. 气候变暖已是全世界所有国家急需应对的环境问题, 并具有非常明显的季节差异, 即冬季增温水平远远高于其他季节^[2, 3]. 东北黑

土区土质肥沃, 富含有机质 (碳、氮), 在长达半年的

收稿日期: 2020-07-21; 修订日期: 2020-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579045); 黑龙江省自然科学基金项目 (YQ2019E004)

作者简介: 王子龙 (1982~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为寒区陆面过程与寒区水文学, E-mail: wangzilong@neau.edu.cn
* 通信作者, E-mail: jiangqiu-xiang2017@163.com

时间里,黑土均处于冻融状态^[4,5].根据我国黑吉辽蒙等地区多个站点的温度实测资料发现,近年来东北地区冬季温度总体呈上升趋势且增幅高于全国平均增温水平^[6].而气候变暖会使冬季黑土表面覆盖的积雪厚度和土壤冻结程度发生变化,且影响土壤冻融循环频率和次数,进而对冻结期甚至全年的土壤碳氮固定、转化及释放过程产生深远影响^[7].因此,探究气候变暖对冻结期黑土碳氮循环的影响具有非常重要的意义.

土壤碳氮循环是全球碳氮循环的重要组成部分,温度影响着碳氮循环过程的各个环节,大量研究指出,气候变暖对冬季土壤碳氮循环过程及土壤植物、微生物、养分均有重要影响^[8,9].Li等^[10]综合分析了冬季积雪厚度变化对土壤碳循环的影响,结果表明冬季CO₂的排放量随着积雪覆盖厚度的增加而增长,同时明显降低土壤中总碳含量,并指出积雪厚度的增加导致了更高土壤温湿度进而产生了这些变化.Groffman等^[11]通过多年的实地监测发现,冬季微生物呼吸的重要影响因素是土壤溶解性有机碳的可利用性,气温的上升引起积雪厚度及持续时间的降低会使土壤溶解性有机碳逐渐固定,进而抑制冬季微生物呼吸作用.Natali等^[12]利用设置雪墙增加温度的方式发现,温度提升1.6℃将会增加十分之一的冻土融化深度,这使冬季土壤呼吸速率提高1倍,从而影响全年碳平衡.Turner等^[13]通过增加冬季土壤表面积雪覆盖厚度的方法,模拟冬季增温进而研究其对土壤氮素的影响,结果表明温度的上升可以增加土壤净矿化作用并使土壤氮素损失的可能性增加.Shibata等^[14]凭借对日本北部森林的多年试验分析发现,气候变暖会导致降雪总量减少,致使作为土壤隔热层的雪盖厚度减少,土壤表面的冻融次数和频率增加,并对土壤硝化和氨化产生一定的影响.Reinmann等^[15]所做的森林积雪处理试验结果表明,积雪较深时,土壤中更多氮素会被固定在微生物体内,积雪较浅时,土壤冻结程度加重会使植物细根死亡率增加,使其对土壤氮的吸收能力降低,最终导致陆地生态系统氮汇增加.预估计全球生态系统的碳氮平衡,以及精确预测全球气候变暖对土壤碳氮收支平衡影响的不确定性,研究增温对冬季土壤碳氮循环的影响就显得尤为重要.以往的研究大多集中在对高纬度、高海拔的永久冻土区,而有关季节性冻土地区的碳氮循环报道仍然十分有限,且大部分学者只是对融化期的土壤进行了碳氮的测定和分析,很少有探究变暖对冻结期土壤碳氮循环的影响.同时,东北黑土碳氮动态对气候变暖的响应比较敏感,但近年来的研究大都停留在生长季节升温,而关于冬季增温对

该地区碳氮循环的影响研究鲜见报道.此外,目前模拟冬季增温的手段大部分是采取对土壤表面积雪厚度处理的方法,虽然可以达到增温的效果,但是由于该手段人为破坏了影响土壤碳氮循环的重要因素——积雪,违背了冬季气候变暖产生的原因与表象,仍然无法真正做到准确模拟冬季增温机制.

鉴于此,为研究气候变暖对冻结期黑土碳氮循环的影响,本试验以黑土碳氮为研究对象,使用红外辐射仪对冻结期的黑土进行不同水平的加热,分析了气候变暖对冻结期黑土水热、霜冻状态及土壤碳氮循环的影响.通过探究增温对冻结期黑土碳氮循环的影响效应,以期为未来全球生物地球化学循环模型完善和相应预测提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究于2019年11月~2020年1月在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学水利综合试验场(45°44'41"N, 126°45'32"E)内进行,如图1所示.该试验地每年生长季节均会种植一次季大豆,并在9月进行收割和重新翻土处理.试验场地坐落于哈尔滨市香坊区,具备长期稳定供电能力,便于长期定点观测、获取土样和样本处理,以保证试验的准确性.哈尔滨地区平均海拔138 m,属于温带大陆性季风气候,冬季多年平均气温为-14.2℃,最冷月平均温度-19.6℃,历年积雪覆盖期为110 d,无霜期140 d,年最大冻结深度为180 cm,无多年冻土层,全年平均降水量约为570 mm.

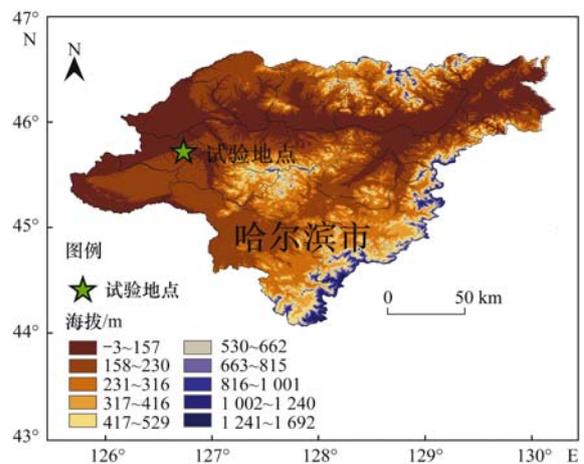


图1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of the study area

在气候、地形因素及人类活动的综合影响下,致使哈尔滨地区土壤类型比较多,总计9个土类、21个亚类和25个土种.其中黑土是该地的主要土壤,同时也是数量最多、分布最广的土壤类型.本研究区

土壤黑土层厚度大约为 100 cm, 不同土层的土壤物理性质见表 1.

表 1 不同土层的物理性质

土层深度 /cm	干容重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	颗粒组成(质量分数)/%			饱和含水率 /%	有机质 /%
		砂粒	粉粒	黏粒		
0~20	1.46	44.76	36.90	18.34	43.30	3.45
20~40	1.50	34.21	40.64	25.15	42.50	2.68
40~60	1.52	29.66	43.93	26.41	40.11	1.32
60~100	1.57	27.47	45.34	27.19	40.85	0.79

1.2 试验设计

本试验采用随机区组布置法, 共有 3 个区组, 其中每个区组中包含 3 个处理, 分别为两个加热处理(W1、W2)和一个对照处理(C). 在 2019 年 10 月, 将 3 个面积为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的地块并排布置, 相邻试验地块之间相隔 1 m, 以保证 3 个试验地块在地形、土壤质地、地上生物数量及组成等方面的相似性. 在需要加热处理的两个地块中(W1 和 W2), 将红外辐射加热器(MRM2420, 卡格洛电子有限公司, 美国)设置在相应地块正上方 1.2 m 处, 并通过改变加热调节旋钮位置的方法, 以达到不同的加热效果. 由于 IPCC 第一工作组在第五次评估报告中提出: 在 21 世纪末期全球地表平均升温幅度将达到 $1.8\sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]. 所以本试验设定 W1 和 W2 两个增温地块的表层土壤温度(0 cm 土壤温度)相对于对照处理分别增加 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但因为冻结期间低温和寒风的扰动, 两个增温地块的表层土壤温度实际增幅可能与试验设定有轻微差距. 在对照处理中(C), 则采用与 MRM2420 加热器相同材料、形状和重量的框架安装在地块上方 1.2 m 处, 这可以尽可能消除由于外在条件不同而造成的误差. 同时, 在每个地块的东、西、北这 3 个方向分别安装上一块 $1.5\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的金属板, 以减小冬季寒风对加热效果的影响. 试验地块的加热处理从 2019 年 11 月持续到 2020 年 1 月. 并且在 2020 年 1 月使用内径 5 cm, 内高 15 cm 圆柱形不锈钢材质的取土器分别从每个地块的土壤表层随机取出 3 个直径为 5 cm、高度 15 cm 的圆柱形土壤样本. 人工将土壤样本中植物根系、石块去除, 均匀混合后带回实验室并对土壤总有机碳(SOC)、活性有机碳(LC)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、总无机氮(TIN)和全氮(TN)含量进行测定.

1.3 测定内容与方法

1.3.1 环境因子监测

(1) 土壤温湿度 在每个地块的正中心位置, 埋设土壤温湿度传感器(ET100, 北京东方生态, 中国), 用以连续监测 0~100 cm 土层深度的温度和水分. 土壤温湿度数据由采集器每隔 60 min 自动收集

并记录一次.

(2) 地表空气温度 使用空气温度传感器(NH121, 中科能慧科技, 中国)对土表上方 15 cm 空间的气温进行实时监测, 并由数据采集器(NHJLY2801, 中科能慧科技, 中国)每 10 min 收集并记录一次数据.

(3) 土壤冻结深度 为了监测试验期间土壤冻结深度的变化, 在每个地块中心处安装一台冻土器, 每周通过人工方法对土壤冻结深度进行记录.

(4) 积雪厚度 对于每个地块的积雪覆盖深度使用米尺每周进行一次测量.

1.3.2 土壤总有机碳及活性有机碳测定

对于土壤总有机碳(SOC)含量的测定, 采用的方法是 H_2SO_4 - K_2CrO_7 氧化法.

对于活性有机碳(LC)含量的测量, 采取的方法是 $333\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KMnO_4 溶液氧化法. 具体操作流程为: 从试验地块中取出的土样需要放在自然通风橱内进行长达 10 d 的自然风干, 接下来将已经风干的土壤样品经研磨后过孔径为 0.5 mm 孔筛, 根据土壤 SOC 含量, 计算出含有 15 mg 碳的土壤样品质量, 并将其作为待测样品的称样重, 然后将样品转移至 50 mL 带盖的塑料离心管中, 以不加土样作为空白对照. 将离心管中加入 25 mL 浓度为 $333\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KMnO_4 溶液. 在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 将离心管放在振荡器上振荡 ($150\sim 180\text{ 次}\cdot\text{min}^{-1}$) 1 h, 然后在转速为 $2000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 5 min, 随后将上清液用去离子水以 1:250 倍稀释. 稀释样品用分光光度计在 565 nm 处测定吸光值. 接下来是配制不同浓度梯度的 KMnO_4 标准溶液, 同样是将其放在分光光度计上测定吸光值, 建立 KMnO_4 溶液浓度与吸光值的线性方程, 将稀释好的待测样品吸光值代入方程得到氧化活性有机碳后所剩余的 KMnO_4 溶液浓度, 用同样方法可以得到空白对照组所剩余的 KMnO_4 溶液浓度, 前后二者之差即为氧化活性有机碳后 KMnO_4 溶液的浓度变化值. 根据假设, 氧化过程中 KMnO_4 溶液浓度每变化 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 消耗 $0.75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 9 mg 的活性有机碳(LC), 其中能被

333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的碳是活性有机碳 (LC), 不能被氧化的碳上则非活性有机碳, 由此便可以计算出土壤活性有机碳的含量。

1.3.3 土壤氮素含量及净氮硝化、矿化速率测定

对于土壤硝态氮 (NO₃⁻-N) 和铵态氮 (NH₄⁺-N) 含量的测定, 用 1 mol·L⁻¹ KCl 溶液对土壤浸提后, 使用连续流动分析仪 (AA3, 布朗卢比公司, 德国) 对其含量进行测定。土壤全氮 (TN) 含量则是采用全自动型氮测定仪 (Kjeltec 8400, 福斯分析仪器公司, 丹麦), 按照凯氏定氮法测定。

净氮矿化和硝化速率的测定方法是原位埋袋法。在 2019 年 12 月使用内径 5 cm, 内高 15 cm 圆柱形不锈钢材质的取土器从每个试验地块的土表随机取出 3 个直径为 5 cm, 高度 15 cm 的圆柱形土样, 将其送回实验室进行土壤无机氮 (TIN) 含量的测定 (包括: NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N)。同时, 在每个地块已经取样的 3 个位置附近再分别取出 1 个与其形状、大小相同的土样, 并将这 3 个土样放入聚乙烯袋中, 密封 (保留适量空气), 并送回到原处进行为期一个月的培养。培养结束之后使用连续流动分析仪 (AA3, 布朗卢比公司, 德国) 测定土壤中各种无机氮的含量。所有土壤样品均保存在 4℃ 并且保证采样与分析之间时间间隔小于一周。计算方式如下:

$$\text{土壤净氮硝化速率} = \frac{\text{培养后}(\text{NO}_3^- \text{-N}) \text{含量} - \text{培养前}(\text{NO}_3^- \text{-N}) \text{含量}}{\text{培养时间}}$$

$$\text{土壤净氮矿化速率} = \frac{\text{培养后无机氮}[(\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N})] \text{含量} - \text{培养前无机氮}[(\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N})] \text{含量}}{\text{培养时间}}$$

1.3.4 土壤-大气 CO₂ 通量测定

使用气体通量室来测定土壤-大气 CO₂ 通量。在每次测定之前, 将直径为 287 mm, 高度为 40 mm 聚氯乙烯圆筒 (圆筒顶部中心处有气体取样口) 置于永久埋设在 5 cm 土层深度处并与之具有相同直径

的聚氯乙烯基环上部。同时, 在 2019 年的 11 月 15 日、11 月 25 日、12 月 5 日、12 月 15 日、12 月 25 日及 2020 年 1 月 4 日每隔 10 d 对土壤-大气 CO₂ 通量进行一次测量。每次测定时使用带有细针头的聚丙烯注射器在 0、10、20 和 30 min 这 4 个时间节点分别收集 9 mL 的气体样本, 随后将样本转移到集气袋中, 室温保存, 用气相色谱法分析 (GC-2014C, 岛津公司, 日本), 热导率原理检测。最后, 利用土壤表面积、通量室容积及 CO₂ 浓度线性变化率计算出土壤-大气 CO₂ 通量。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019 对试验数据进行初步整理及绘图, 采用 SPSS 19.0 统计分析数据, 利用最小显著差异法 (LSD) 和单因素方差分析 (One-way ANOVA) 进行显著性检验, 以 $P < 0.05$ 为显著性水平。

2 结果与分析

2.1 冻结期增温对环境因子的影响

在整个试验期内, 3 种不同处理样地的空气温度及 0、10、20、40、60、80 和 100 cm 土层温度呈下降趋势。同时, 两种加热处理方式均增加了土壤表面及不同深度土层的温度, 但对空气温度影响相对较小, 并且影响主要集中在冻结期增温处理的后期。除此之外, 从图 2 中可以发现, W2 处理相对于 W1 处理对空气温度及土壤温度的增温效果更好。

在 W1 和 W2 两种增温处理条件下, 增温幅度随着土层加深而逐渐减小, 且 W2 处理的温度增幅始终大于 W1 处理。同时, 两种增温方式除对 0 cm 土层温度和 10 cm 土层温度的影响显著外, 对于空气温度和其他更深土层温度的提升效果并不明显, 见表 2。

表 2 W2 处理、W1 处理与 C 处理在空气温度和土壤温度上的差异及其显著度 P 值

Table 2 Difference in air temperature and soil temperature between W2, W1, and C and their significance P values

项目	空气温度/℃	土壤温度/℃						
		0 cm	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
W1-C	0.57	1.54	1.40	0.54	0.29	0.26	0.05	0.02
P	0.64	<0.05	<0.05	0.32	0.60	0.62	0.92	0.96
W2-C	1.19	4.10	1.83	1.03	1.34	0.90	0.71	0.62
P	0.34	<0.05	<0.05	0.06	0.06	0.08	0.17	0.21

1) $P < 0.05$, 表示 W2 处理、W1 处理与 C 处理在温度方面差异显著

本试验期内空气温度的波动幅度相比于各土层温度波动而言更大, 如表 3 所示, 可以发现 3 种处理条件下, 土壤温度波动数值从 0 ~ 100 cm 深度土层呈下降趋势。W2 和 W1 两种增温处理相对对照组而

言均降低了空气温度及 10 ~ 100 cm 土层温度的波动幅度, 总体而言, 温度波动值有 $W2 < W1 < C$ 的趋势。但是对 0 cm 土壤温度, W2 处理下其温度波动更大, 超过了 W1 和 C 处理下的温度波动数值, 这很

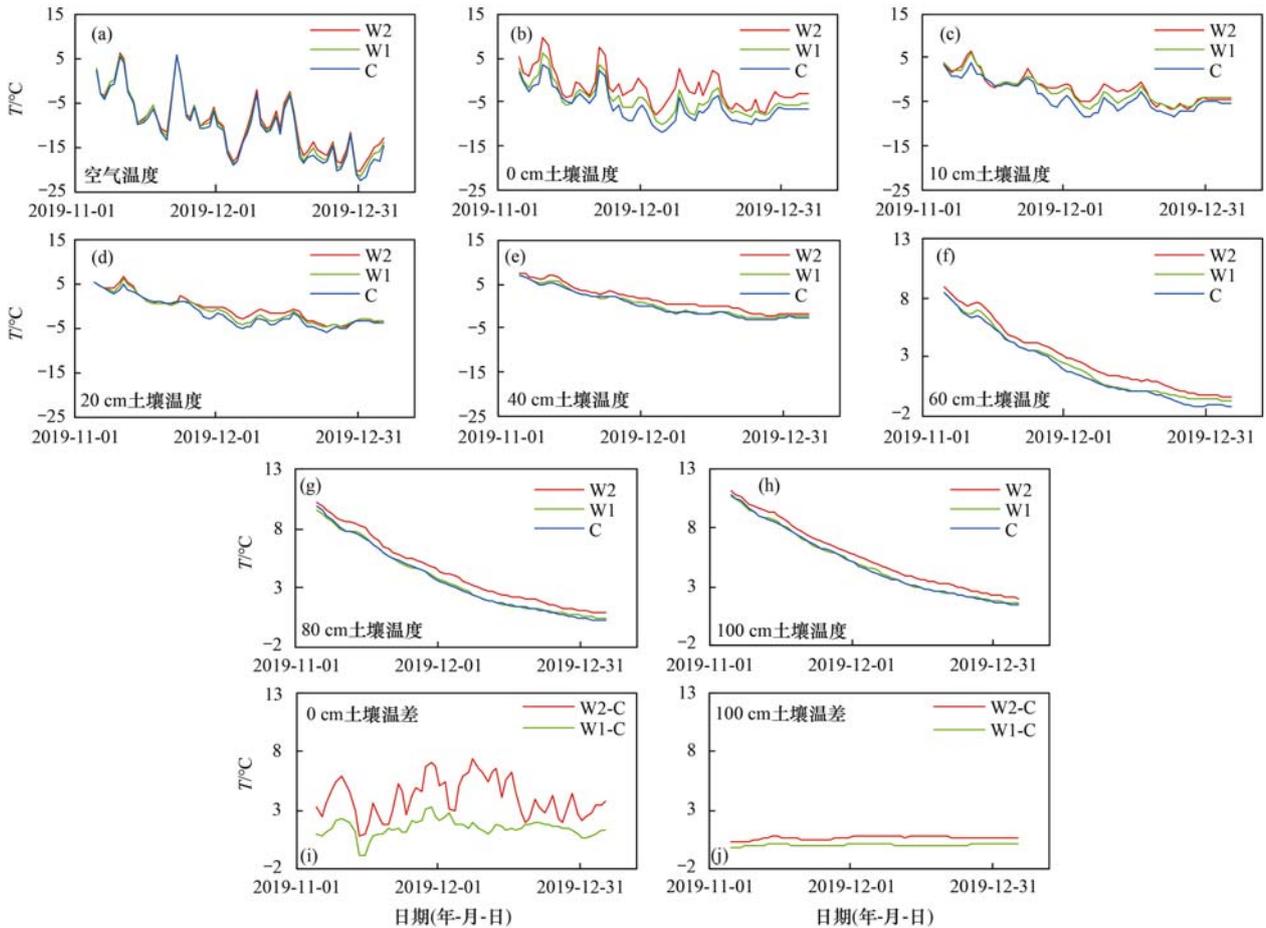


图2 不同处理条件下空气温度及各深度土壤温度的变化

Fig. 2 Variation of air and soil temperatures at different depths under different treatments

表3 不同处理条件下空气温度及各深度土壤温度的波动

Table 3 Fluctuations in air and soil temperature at different depths under different treatments

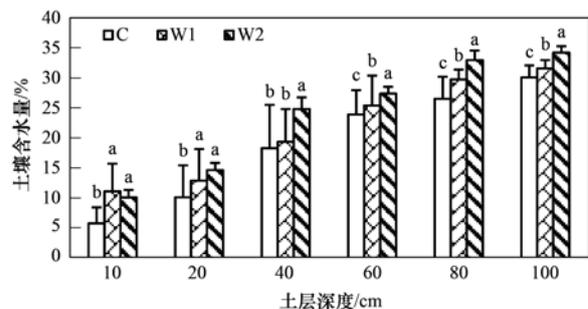
温度波动值	空气温度/°C	土壤温度/°C						
		0 cm	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm
W2	6.59	3.92	3.09	2.92	2.86	2.80	2.81	2.73
W1	6.87	3.51	3.06	2.98	2.90	2.78	2.79	2.76
C	7.05	3.61	3.26	3.17	2.97	2.88	2.85	2.80

有可能是因为 W2 处理下土壤表层覆盖的积雪厚度大大降低,使其温度波动更为剧烈。

3 种处理条件下土壤含水量均随着土层深度的增加而增加,同时,除 10 cm 深度土壤含水量情况是 W1 > W2 > C 之外,其他各深度土壤含水量均是 W2 > W1 > C,造成 10 cm 深度土壤含水量与其他深度土壤含水量趋势不同的原因是由于 W2 样地的增温水平相对其他两种处理要高得多,从而大大增加了 0~10 cm 土层处水分蒸发速率,致使 10 cm 深度土壤含水量呈现出 W1 > W2 > C 的情况。总体而言,仍是增温水平越高土壤含水量越高。W2 处理均显著增加了各深度土层的土壤含水量,而 W1 处理除在 40 cm 土层外也显著增加各土层土壤含水量。总体而言,W1 和 W2 样地的平均土壤含水量分别为 21.67% 和 24.02%,与对照组相比分别提升了

13.42% 和 25.74%,如图 3 所示。

由于增温,平均积雪深度[图 4(a)]、最大积



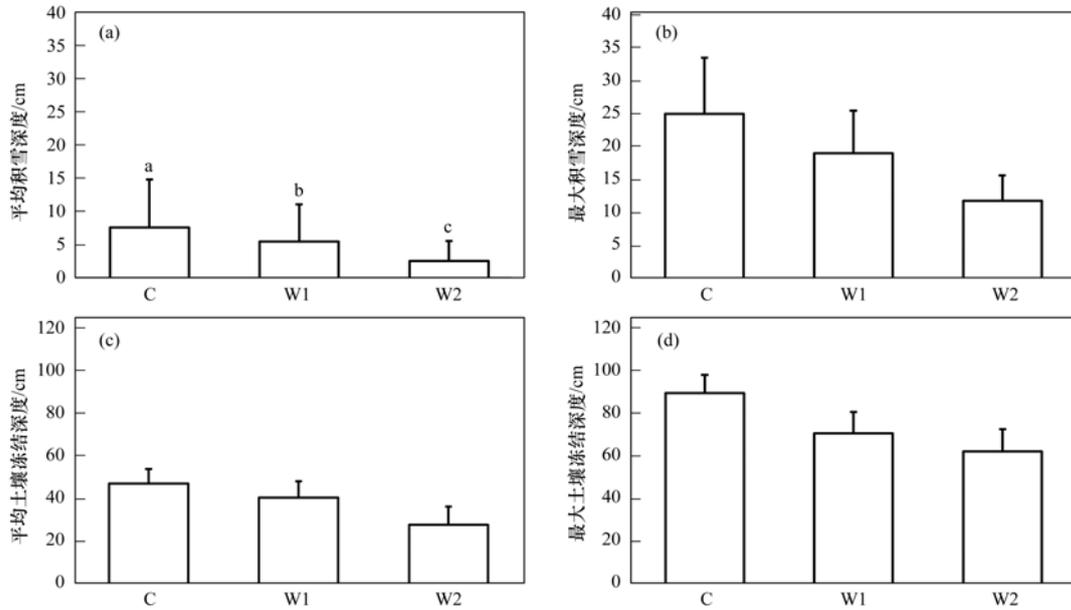
图中数据为 3 个重复的平均值与标准偏差;图中不同小写字母表示同一深度土层不同增温处理间土壤含水量在 P=0.05 水平差异显著

图3 不同处理条件下各土层深度的平均含水量

Fig. 3 Average water content at different soil depths under different treatments

雪深度[图 4(b)]、平均土壤冻结深度[图 4(c)]及最大土壤冻结深度均呈现下降趋势[图 4(d)],且增温水平越高积雪厚度与土壤冻结深度下降幅

度越大,即 $C > W1 > W2$. 同时,冻结期增温对平均积雪深度影响显著,对于其他 3 个指标影响并不显著.



图中数据为 3 个重复的平均值与标准偏差; 图中不同小写字母表示不同增温处理间各指标在 $P=0.05$ 水平差异显著; 无字母表示不同增温处理间各指标在 $P=0.05$ 水平无显著差异

图 4 不同处理条件下平均积雪深度、最大积雪深度、平均土壤冻结深度和最大土壤冻结深度

Fig. 4 Average snow depth, maximum snow depth, average frost depth, and maximum frost depth under different treatments

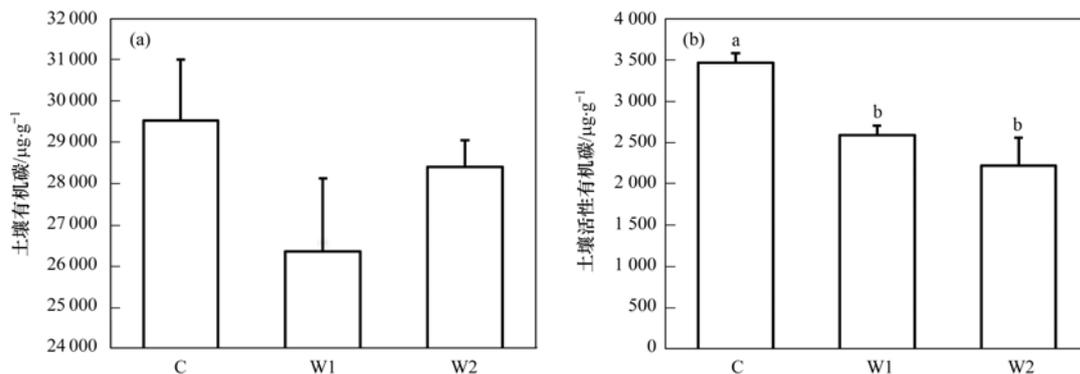
2.2 冻结期增温对土壤碳循环的影响

土壤有机碳(SOC)含量如图 5(a)所示, W1 和 W2 样地内土壤有机碳的平均含量分别为 $2.64 \times 10^4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.84 \times 10^4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别比对照组降低了 10.7% 和 3.8%, 但差异不显著. 此外, 从图中可以发现, 土壤有机碳(SOC)含量随着增温水平的提升呈现出先减少后增加的趋势.

活性有机碳(LC)含量如图 5(b)所示, W1 和 W2 两个增温样地中的活性有机碳(LC)平均含量分别为 $2591.51 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2220.72 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 二者分别

比对照组减少了 25.3% 和 36.0%, 增温处理显著地降低土壤活性有机碳(LC)的含量. 同时, 增温水平越高, 土壤中活性有机碳(LC)含量则越低.

如图 6(b)所示, W1 和 W2 两个增温样地的平均土壤呼吸速率分别为 $70.56 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $95.12 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 比对照组高 99.2% 和 168.5%, 增加显著. 整个试验期内, 增温样地和对照组样地的土壤呼吸速率变化趋势基本一致, 但增温样地的土壤呼吸速率始终高于对照组. 同时, 增温水平越高, 土壤平均呼吸速率也随之更高. 并且从图 6(a)中可以看出, 仅在



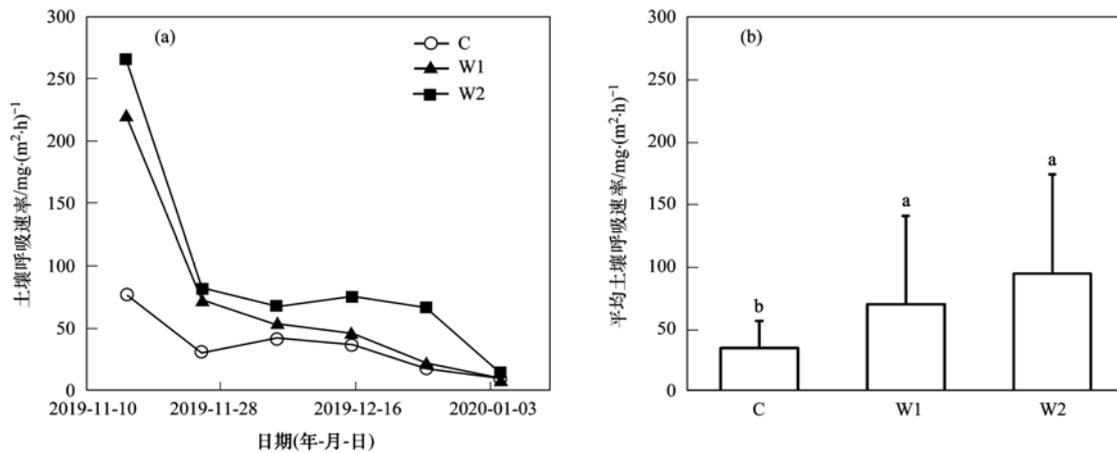
图中数据为 3 个重复的平均值与标准偏差; 图中不同小写字母表示不同增温处理间各指标在 $P=0.05$ 水平差异显著; 无字母表示不同增温处理间各指标在 $P=0.05$ 水平无显著差异

图 5 增温试验结束时土壤中有有机碳的含量和活性有机碳含量

Fig. 5 Contents of soil organic carbon and labile organic carbon at the end of the warming experiment

第一次测定土壤呼吸速率时,两种增温处理条件下的呼吸速率远远大于对照组的呼吸速率.在后续几次测定中,虽然增温处理地块的呼吸速率仍然大于不做任何处理的对照组,但这种差距随着冻结期增温处理的持续而呈现出减弱趋势.尤其是对于 W1 处理,在后几次试验中,它的土壤呼吸速率已经与对照组非常接

近,特别在本试验最后一次测定土壤呼吸速率时, W2、W1 和 C 这 3 种处理地块的土壤呼吸速率几乎持平.此刻,增温处理与对照处理在土壤呼吸速率方面没有拉开差距,这很可能是因为深冬拥有更低的温度,即使在人为增温条件下仍然处在抑制土壤呼吸速率有关微生物活动的阈值.



柱状图中数据为 3 个重复的平均值与标准偏差; 图中不同小写字母表示不同增温处理间平均土壤呼吸速率在 $P=0.05$ 水平差异显著

图 6 增温对土壤-大气 CO_2 通量的影响

Fig. 6 Influence of warming on the soil-atmospheric CO_2 flux

2.3 冻结期增温对土壤氮循环的影响

冻结期土壤中的无机氮(TIN)含量显著受到增温处理的影响. W1、W2 两个地块中的硝态氮(NO_3^- -N)含量显著低于对照地块.同时,随着增温水平的提升,土壤中硝态氮(NO_3^- -N)含量逐渐减少,如图 7(a)所示.土壤中铵态氮(NH_4^+ -N)和总无机氮(TIN)的含量变化趋势接近,均随着温度的提升,呈现出先上升后下降的趋势,如图 7(b)和 7(c)所示.这也可以说明本研究所在的试验地无机氮中铵态氮的含量更多,更具主导地位.增温使土壤中的全氮(TN)的含量显著增加. W1 和 W2 两块增温样地中平均全氮(TN)含量分别为 $1538.33 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1723.67 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别比对照组提高了 156.4% 和 187.3%, 增加显著, 并且从图 7(d)中可以发现, 土壤全氮(TN)含量随增温水平的提升逐步增加.

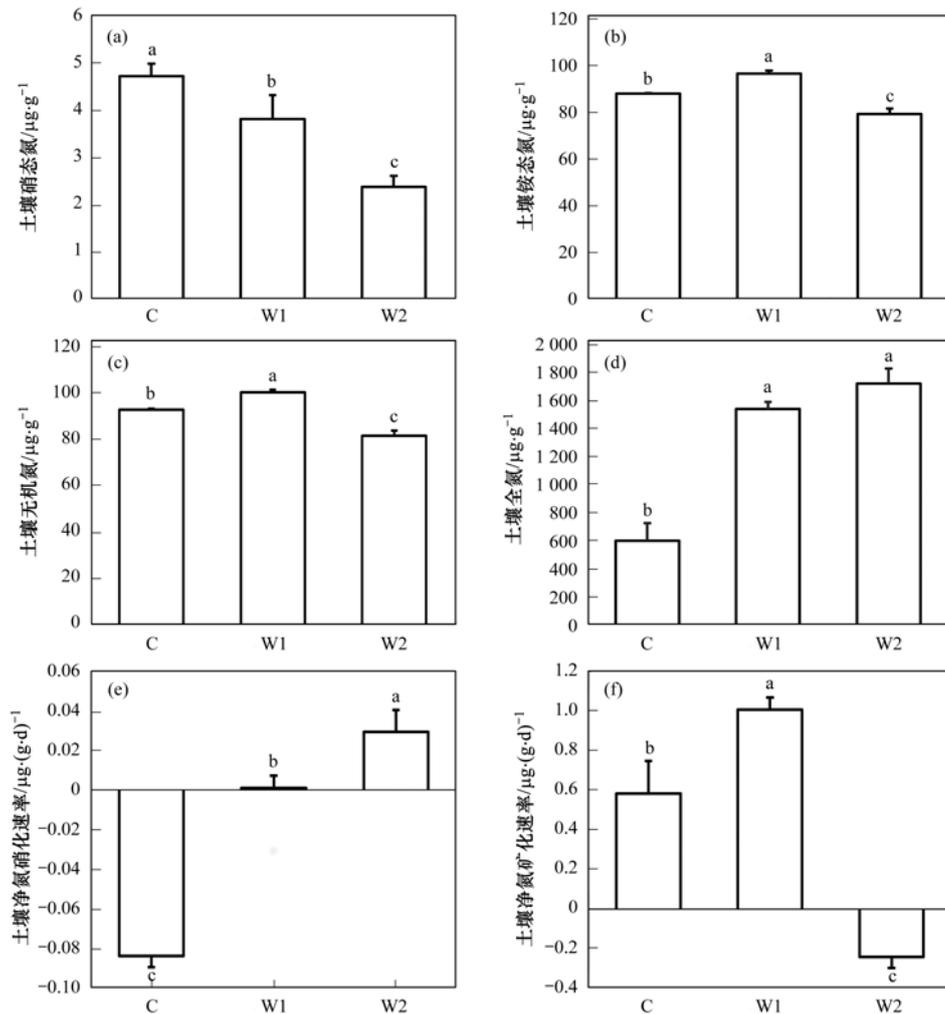
冻结期增温使土壤净氮硝化速率显著提升,并随着温度的增加而逐步提高,如图 7(e)所示.土壤净氮矿化速率则与其不同,它随着增温水平的增加呈现出先增加后减小的趋势,如图 7(f)所示, W1 和 C 样地中氮的矿化速率均是正值,而 W2 样地中土壤氮的净矿化速率为负值,此时土壤氮的固持作用可能远远大于氮的矿化作用.

3 讨论

本研究结果支持了笔者的设想,即增温将会通

过改变土壤水热及冻结状态的方式来影响土壤碳氮循环的相关过程^[16-18],所以开展冬季增温对土壤碳氮动态影响的研究便显得尤为重要.但很多学者就增温对冬季土壤状态的影响持不同的观点,有研究表明,冬季变暖会使积雪厚度减少,雪的隔热保温作用削弱,进而导致土壤温度与液态含水量降低,土壤冻结增加^[19].相反,一些学者认为冬季气温的提升会克服积雪隔热层减少的损失,从而减少土壤冻结^[20].本研究的结果则表明,冻结期增温不仅会导致土壤温度与液态含水量的上升,而且还会使土壤冻结深度变浅,由此引起土壤部分生物地球化学过程的改变,如土壤微生物的增殖,土壤结构的变化,土壤碳氮的转换.

与加热管道法、开顶箱法、电缆法等增温方法相比,红外辐射仪的工作原理与全球气候变暖的机制基本一致,可以避免对土壤产生物理扰动,是目前模拟气候变暖的最好方式.但红外辐射加热器对空气温度的影响较弱.此外,由于本试验是在冬季进行,寒风会相对削弱预定的加热效果.然而,这种加热方法仍然帮助了很多学者开展了大量有关气候变暖的研究,并为各自领域提供了许多新见解和新思路^[2,16,17].同时,本试验采用的 MRM2420 加热器可以自由调节增温程度,为定量研究冻结期增温对土壤碳氮循环影响提供了可能,有助于探索冬季气候变化对碳氮动态的不确定性.



图中数据为3个重复的平均值与标准偏差;图中不同小写字母表示不同增温处理间各指标在 $P=0.05$ 水平差异显著

图7 增温试验结束时土壤全氮含量、硝态氮含量、铵态氮含量、无机氮含量及净氮硝化速率和矿化速率

Fig. 7 Contents of soil total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, inorganic and nitrogen and the soil nitrogen net nitrification rate and mineralization rate at the end of the warming experiment

以往关于气候变暖对土壤碳氮的研究大多集中在生长季节,近些年人们才逐渐发现冬季增温对生物地球化学循环的重要影响^[2,3,18].所以开展冬季增温对土壤碳氮循环影响的研究为更好地了解地球生态系统碳氮循环提供了一个很好的机会.

土壤氮被公认为是影响陆地生态系统碳源汇的重要调节因子,并与陆地植物生产力和土壤有机碳(SOC)有着不可分割的关系^[21,22].土壤全氮(TN)含量随着土壤温度的上升而不断增长,这与前人研究得到的结果完全相反^[23],这可能是因为降雪作为冻结期大气沉降的一种主要形式,也是该时期大气污染物去除最为重要的方式之一,它在降落到地表并融化形成融雪水时往往会携带一定浓度的含氮物质进入土壤^[24],进而影响土壤中某些氮素的转化过程和速率^[25],本试验中的W2和W1两个地块均进行了增温处理,与对照组相比会造成更多积雪发生融化,并且随着增温水平的提升,积雪融化量也会随

之增多,进而使融雪水中夹着的含氮物质更多地进入土壤.以对照组为基础,土壤中总无机氮(TIN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量及净氮矿化速率均随增温水平的上升呈现出先增加后降低的趋势,这一结果与前人研究得出的结论有所不同,即增温会通过提升土壤矿化作用的方式使土壤无机氮库显著增加^[26],究其原因可能是由土壤水分、土壤温度及温度波动幅度共同作用的结果^[27,28].因为本试验采取了高低不同的两种增温处理方式,分别用于模拟在RCP2.6和RCP8.5两种情景下21世纪末期的地表温度.在RCP2.6排放情景条件下地表温度上升有限,不会造成过多的积雪融化,保证了土壤表面仍然会有较厚的积雪,因而使W1处理土表温度在提升同时不会由于积雪的大量融化而造成土表温度过大地波动,使得与土壤无机氮相关的微生物活动、土壤酶活性在这样一个相对温暖且恒定的环境下皆可以得到很好地发挥^[29-31].然而在RCP8.5排放情景下,增

温会导致冻结期土表面积雪覆盖厚度显著降低,致使 W2 样地的温度虽然相对较高,但是由于积雪的缺失使土壤表层温度波动也更大,大大抑制土壤微生物活性甚至导致其死亡,限制了有机氮向无机氮转换^[32]。同时,由于调节无机氮含量变化的因素除温度之外,水分也是一个重要的关键因子^[33]。本研究中取样深度为 0~15 cm,且图 3 中 10 cm 处土壤含水量随增温幅度的提升呈现出先增加后减少的趋势,鉴于此,笔者可以推测出土壤中总无机氮(TIN)、铵态氮(NH_4^+ -N)含量及净氮矿化速率与对应土层的含水量存在一定的相关性。在寒冷而又漫长的冬季,土壤硝态氮(NO_3^- -N)在维持年际氮循环中起着不可代替的作用,并为下个生长季节植物生长提供了重要的养分供给^[34],而冬季土壤硝态氮(NO_3^- -N)的累积和转化往往受到土壤温度和冻结状态的影响。本研究发现,随着温度的提升,土壤净氮硝化速率显著提升,这与以往许多学者的研究结果一致^[35,36]。由此推测,随着温度增长,硝化细菌的活性和数量可能会增加,从而使土壤净硝化速率加快。但土壤硝态氮(NO_3^- -N)含量并没有做到与土壤净氮硝化速率变化趋势保持一致。相反,土壤硝态氮(NO_3^- -N)的含量随着温度增幅的提升而不断下降,温度最低的对照组中土壤硝态氮含量最高。出现这一试验结果的原因可能有以下 3 点:① 由于硝态氮(NO_3^- -N)不易被土壤胶体吸附,所以其在土壤中相对不稳定,容易流失。而在本试验中随着增温水平的提升,土壤表面的积雪融化也会随之增多,融雪水进入土壤会将一部分硝态氮(NO_3^- -N)带向更深土层^[37];② 冻结期土壤温度相对越高,土壤中一些耐寒的微生物活动、代谢及养分转化能力也会随之增加,以致于冻结期温度越高的土壤环境中,微生物的固氮能力越强,进而出现了上述的研究结果^[38];③ 冻结期土壤表层大多处在冻结或半冻结状态,土壤容易形成厌氧环境,反硝化细菌数量和活性相对于硝化细菌而言更占优势,使得反硝化细菌相比于硝化细菌而言对温度的提升反应更快也更敏感,最终导致土壤温度越高的试验区反硝化速率也越强,从而损失了更多的硝态氮^[9,39,40]。

冬季土壤碳循环对气候变暖响应的未知性仍然是导致全球气候变化预测不确定性的主要因素^[41]。随着温度增长,土壤有机碳(SOC)的分解速率加快,使储存在土壤中的碳大量损失^[42,43]。本研究也得到类似的结果,即冻结期增温使土壤有机碳(SOC)含量降低。但在 W2 土壤温度比 W1 土壤温度高的条件下,W2 样地中土壤有机碳含量却相对较高,导致这一情况可能有以下 3 个原因:① 由于土壤有机碳

(SOC)含量取决于某一时期内矿化量和输入量的平衡关系^[44],本试验中 W2 处理土壤表层的温度波动变化相对较大,这会一定程度上削弱负责有机碳矿化的微生物活动,进而减少该区土壤有机碳(SOC)的矿化量,以抵消一部分由于温度上升带来的影响。

② W2 处理相比 W1 处理土壤表层含水量低,土壤有机碳(SOC)的分解不仅需要适宜的温度,还需要相应水分用于反应,W2 处理中较低含水量相对削弱了土壤有机碳的分解^[45]。③ 积雪在降落到地面之前会附着少量大气中的含碳物质^[46,47],因为 W2 处理增温水平相对更高,积雪融化量也相应更多,进入土壤的融雪水夹带着某些含碳物质可能会增加该区土壤有机碳的输入量。土壤活性有机碳(LC)是一种易受植物、微生物影响,并具有很强氧化分解能力及矿化能力的那部分活性碳,其对生物化学肥力保持和土壤碳平衡具有极其重要的意义^[48]。在本研究中发现土壤活性有机碳(LC)含量随着冻结期增温数值的提升而不断降低,导致这一现象可能有两个原因:一方面土壤活性有机碳(LC)相对土壤中其他碳素而言具有更强的分解能力,温度提升加快了它的分解和矿化速率;另一方面由于土壤活性有机碳(LC)具有较强溶解性,并且在土壤中表现出极强的不稳定性,容易发生位置迁移^[49],本试验中随着表层土壤温度的递增,覆盖在地表的积雪会融化得更多,雪水进入土壤则会携带着活性有机碳向土壤更深处运动。同时,土壤活性有机碳并不是一种单纯的化合物,其组分一般包括溶解性有机碳、微生物量碳和可矿化碳等,而这些主要成分大多来源于植物凋落物、根系及其分泌物、土壤有机质和土壤微生物等^[45,50]。所以冻结期土壤温度越低,土壤则越容易产生较强冻胀和物理性形变,从而使土壤团聚体结构发生一定程度的破坏^[51],进而导致土壤中大分子量有机质的氢键产生开裂^[52],土壤中的植物凋落物、细根逐步破碎^[53],部分不耐寒的微生物开始裂解^[17],最终致使冻结期土壤温度越低、冻结程度越强的地块积累更多的活性有机碳。有研究表明,冬季土壤呼吸速率大概能消耗掉陆地生态系统在上个生长季节所固定碳的一半^[3,18],而冬季增温则会导致土壤向大气释放的 CO_2 更多,进而影响土壤中碳储量。在本研究中,W1 和 W2 的两种不同程度增温处理使冻结期土壤呼吸速率分别提升 99.2% 和 168.5%,这可能是因为冻结期处于相对较低温度环境下,影响土壤呼吸速率的各种生态过程(如微生物活性、氮矿化及酶活性等)对短时间的增温反应很强烈^[54],从而使土壤-大气 CO_2 的释放量大大增加,这一结果也一定程度上支持了前人的设

想^[16, 36, 41].

4 结论

(1) 增温给冻结期黑土区带来了相对更为温暖和湿润的土壤环境, 对其表面的积雪覆盖厚度及土壤冻结深度等环境因子也产生一定的影响。

(2) 冻结期增温会促进土壤有机碳(SOC)与活性有机碳(LC)的分解、转化和迁移, 从而降低其含量. 土壤呼吸速率则随着温度升高而增强, 进而增加了土壤-大气 CO₂ 的释放量。

(3) 在冻结期增温作用下, 由于不同种类土壤氮素理化性质和来源的差异, 它们含量变化及转化趋势差异性较大。

致谢: 感谢孙建、林百健、李东睿、武子一、王婷婷、刘宏伟、铁云龙、李嘉欣、徐梓翔、侯锐、王莹和邵欣欣同学在样品采集和分析中的帮助。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013; the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Hutchison J S, Henry H A L. Additive effects of warming and increased nitrogen deposition in a temperate old field: plant productivity and the importance of winter[J]. *Ecosystems*, 2010, **13**(5): 661-672.
- [3] 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 等. 季节非对称升温对喀斯特土壤 CO₂ 释放的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1962-1970.
Tang G Y, Zhang C H, Liu F Y, *et al.* Effects of seasonal asymmetric warming on soil CO₂ release in Karst Region[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1962-1970.
- [4] 王子龙, 胡石涛, 付强, 等. 基于多源数据的松嫩平原黑土区亚像元雪盖率算法研究[J]. *农业机械学报*, 2018, **49**(2): 299-304.
Wang Z L, Hu S T, Fu Q, *et al.* Sub-pixel snow cover fraction algorithm based on multi-source data in black soil Region of Songnen Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(2): 299-304.
- [5] 王子龙, 林百健, 姜秋香, 等. 寒区春季融雪期表层土壤湿度变化与影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2019, **50**(11): 301-311.
Wang Z L, Lin B J, Jiang Q X, *et al.* Analysis of surface soil moisture changes and influencing factors during spring snowmelt in cold regions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(11): 301-311.
- [6] 徐迪, 王一文, 蒋超, 等. 东北地区异常的增温趋势分析[A]. 见: 第35届中国气象学会年会S7 东亚气候、极端气候事件变异机理及气候预测[C]. 合肥: 中国气象学会, 2018. 437-443.
- [7] 宗宁, 石培礼. 冬季升温对高山生态系统碳氮循环过程的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(9): 3131-3143.
Zong N, Shi P L. Effects of winter warming on carbon and nitrogen cycling in alpine ecosystems: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(9): 3131-3143.
- [8] Campbell J L, Mitchell M J, Groffman P M, *et al.* Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, **3**(6): 314-322.
- [9] 于雪, 孙洪伟, 李维维, 等. 温度对硝化杆菌(Nitrobacter)活性动力学影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1426-1430.
Yu X, Sun H W, Li W W, *et al.* Effect of temperature on the activity kinetics of nitrobacter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1426-1430.
- [10] Li W B, Wu J B, Bai E, *et al.* Response of terrestrial carbon dynamics to snow cover change: a meta-analysis of experimental manipulation (II)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **103**: 388-393.
- [11] Groffman P M, Hardy J P, Fashu-kanu S, *et al.* Snow depth, soil freezing and nitrogen cycling in a northern hardwood forest landscape[J]. *Biogeochemistry*, 2011, **102**(1-3): 223-238.
- [12] Natali S M, Schuur E A G, Trucco C, *et al.* Effects of experimental warming of air, soil and permafrost on carbon balance in Alaskan tundra[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(3): 1394-1407.
- [13] Turner M M, Henry H A L. Net nitrogen mineralization and leaching in response to warming and nitrogen deposition in a temperate old field: the importance of winter temperature[J]. *Oecologia*, 2010, **162**(1): 227-236.
- [14] Shibata H. Impact of winter climate change on nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems: a synthesis from Japanese case studies[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **65**: 4-9.
- [15] Reinmann A B, Susser J R, Demaria E M C, *et al.* Declines in northern forest tree growth following snowpack decline and soil freezing[J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(2): 420-430.
- [16] Peng F, Xue X, You Q G, *et al.* Warming effects on carbon release in a permafrost area of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(1): 57-66.
- [17] 宗宁, 石培礼. 模拟增温对西藏高原高寒草甸土壤供氮潜力的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(12): 4356-4365.
Zong N, Shi P L. Effects of simulated warming on soil nitrogen supply potential in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(12): 4356-4365.
- [18] 李晋波, 姚楠, 李秀, 等. 内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面 CO₂、N₂O 特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2330-2338.
Li J B, Yao N, Li X, *et al.* Dynamics of CO₂ and N₂O in seasonal frozen soil profiles for a typical steppe in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2330-2338.
- [19] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, *et al.* Snow depth manipulation and its influence on soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, **56**(2): 151-174.
- [20] Henry H A L. Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes[J]. *Climatic Change*, 2008, **87**(3-4): 421-434.
- [21] 郑恩楠, 杨桦, 陈鹏, 等. 水氮管理模式下水稻碳氮吸收、土壤呼吸与产量效应[J]. *农业机械学报*, 2018, **49**(6): 287-295.
Zheng E N, Yang H, Chen P, *et al.* Effects of carbon-nitrogen absorption, soil respiration and yield of rice under water and fertilizer management modes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(6): 287-295.
- [22] 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 等. 三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1468-1474.
Wang T, Huang Z L, Zeng L X, *et al.* Effects of fertilization on

- the nitrogen residual amounts and leaching from citrus orchard soil in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1468-1474.
- [23] 艾丽, 吴建国, 刘建泉, 等. 土壤有机碳和全氮含量及其与海拔、植被和气候要素的关系——以祁连山中段北坡为研究对象[J]. *中国园艺文摘*, 2010, **26**(3): 27-34.
Ai L, Wu J G, Liu J Q, *et al.* The soil organic carbon and total nitrogen content on the northern slope of Qi Lian Mountain and its relationship with altitude, vegetation and climatic factors [J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2010, **26**(3): 27-34.
- [24] 傅扬, 陈璐艳, 谢捷, 等. 积雪中氮、磷污染物浓度及其垂直分布特征[J]. *环境污染与防治*, 2018, **40**(6): 684-688.
Fu Y, Chen L Y, Xie J, *et al.* Concentrations of nitrogen and phosphorus pollutants in firn as well as its vertical distribution [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2018, **40**(6): 684-688.
- [25] 杨涵越, 张婷, 黄永梅, 等. 模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1900-1907.
Yang H Y, Zhang T, Huang Y M, *et al.* Effect of stimulated N deposition on N₂O emission from a *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1900-1907.
- [26] 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.
- [27] Chen Z, Yang S Q, Zhang A P, *et al.* Nitrous oxide emissions following seasonal freeze-thaw events from arable soils in Northeast China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, **17**(1): 231-246.
- [28] 李志杰, 杨万勤, 贺若阳, 等. 雪被去除对川西亚高山云杉林土壤活性氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(6): 1786-1792.
Li Z J, Yang W Q, He R Y, *et al.* Effects of snow removal on soil labile nitrogen in a subalpine spruce forest of western Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(6): 1786-1792.
- [29] 于济通, 陶佳慧, 马小凡, 等. 冻融作用下模拟氮沉降对土壤酶活性与土壤无机氮含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(3): 518-523.
Yu J T, Tao J H, Ma X F, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on enzymatic activities and inorganic nitrogen contents in soil during freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(3): 518-523.
- [30] 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 等. 黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 859-868.
Yao L, Hu L H, Zhang H C, *et al.* Elevational distribution characteristics of soil bacterial community and enzyme activities in mount Huangshan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 859-868.
- [31] 李玥, 胡奇, 高大文. 温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1731-1738.
Li Y, Hu Q, Gao D W. Effect of temperature on the performance and microbial community structure in an integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor treating benzothiazole wastewater [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1731-1738.
- [32] 徐欢, 王芳芳, 李婷, 等. 冻融交替对土壤氮素循环关键过程的影响与机制研究进展[J]. *生态学报*, 2020, **40**(10): 3168-3182.
- Xu H, Wang F F, Li T, *et al.* A review of freezing-thawing cycle effects on key processes of soil nitrogen cycling and the underlying mechanisms [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(10): 3168-3182.
- [33] 武丹丹, 井新, 林笠, 等. 青藏高原高寒草甸土壤无机氮对增温和降水改变的响应[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, **52**(5): 959-966.
Wu D D, Jing X, Lin L, *et al.* Responses of soil inorganic nitrogen to warming and altered precipitation in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2016, **52**(5): 959-966.
- [34] 胡霞, 吴宁, 王乾, 等. 青藏高原东缘雪被覆盖和凋落物添加对土壤氮素动态的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(11): 1789-1794.
Hu X, Wu N, Wang Q, *et al.* Effects of snowpack and litter input on soil nitrogen dynamics in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(11): 1789-1794.
- [35] 殷睿, 徐振锋, 吴福忠, 等. 雪被斑块对川西亚高山冷杉林冬季土壤活性氮库及氮矿化潜力的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2014, **20**(1): 15-21.
Yin R, Xu Z F, Wu F Z, *et al.* Effects of snow pack on winter soil labile nitrogen pools and nitrogen mineralization potential in an subalpine *Abies faxoniana* forest of western Sichuan [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, **20**(1): 15-21.
- [36] 熊沛, 徐振锋, 林波, 等. 岷江上游华山松林冬季土壤呼吸对模拟增温的短期响应[J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(12): 1369-1376.
Xiong P, Xu Z F, Lin B, *et al.* Short-term response of winter soil respiration to simulated warming in a *Pinus armandii* plantation in the upper reaches of the Minjiang River, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(12): 1369-1376.
- [37] 陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. *生态学报*, 2016, **36**(4): 1083-1094.
Chen Z, Yang S Q, Zhang Q W, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles on soil nitrogen loss and availability [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(4): 1083-1094.
- [38] 高珊, 尹航, 傅民杰, 等. 冻融循环对温带3种林型下土壤微生物量碳、氮和氮矿化的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(21): 7859-7869.
Gao S, Yin H, Fu M J, *et al.* Effects of freeze-thaw cycles on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and nitrogen mineralization in three types of forest in the temperate zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(21): 7859-7869.
- [39] Raciti S M, Groffman P M, Jenkins J C, *et al.* Nitrate production and availability in residential soils [J]. *Ecological Applications*, 2011, **21**(7): 2357-2366.
- [40] 文刚, 王彤, 黄廷林, 等. 贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2339-2348.
Wen G, Wang T, Huang T L, *et al.* Nitrogen removal performance and nitrogen/carbon balance of oligotrophic aerobic denitrifiers [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2339-2348.
- [41] 陈龙飞, 何志斌, 杜军, 等. 土壤碳循环主要过程对气候变暖响应的研究进展[J]. *草业学报*, 2015, **24**(11): 183-194.
Chen L F, He Z B, Du J, *et al.* Response of soil carbon cycling to climate warming: challenges and perspectives [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(11): 183-194.
- [42] Cox P M, Betts R A, Jones C D, *et al.* Acceleration of global

- warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2000, **408**(6809): 184-187.
- [43] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content[J]. *Nature*, 2000, **408**(6814): 789-790.
- [44] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, **53**(2): 317-331.
Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, **53**(2): 317-331.
- [45] 赵光影, 郭冬楠, 江姗, 等. 冻融作用对小兴安岭典型湿地土壤活性有机碳的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(16): 5411-5417.
Zhao G Y, Guo D N, Yang S, *et al.* Effects of freezing and thawing on soil active organic carbon in the Xiaoxing'an Mountain wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(16): 5411-5417.
- [46] 陈文倩, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆干旱区季节性积雪中黑碳气溶胶研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(1): 83-91.
Chen W Q, Ding J L, Zhang Z, *et al.* Black carbon in seasonal snow across northern of Xinjiang [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(1): 83-91.
- [47] 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶的来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 9-17.
Xiao S H, Yu X N, Zhu B, *et al.* Source apportionment of black carbon aerosol in the North Suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 9-17.
- [48] 鲁博权, 臧淑英, 孙丽, 等. 冻融作用对大兴安岭典型森林土壤活性有机碳和氮矿化的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(5): 1664-1672.
Lu B Q, Zang S Y, Sun L. *et al.* The effects of freezing-thawing process on soil active organic carbon and nitrogen mineralization in Daxing'anling Mountain forests [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5): 1664-1672.
- [49] 刘育红. 退化高寒草地土壤活性有机碳组分分布[J]. *湖北农业科学*, 2016, **55**(17): 4375-4380, 4384.
Liu Y H. Distribution of active soil organic carbon fraction on degradation alpine grassland [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, **55**(17): 4375-4380, 4384.
- [50] 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 等. 极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1950-1959.
Meng T G, Wu L Y, Zhang S L, *et al.* Vertical distribution of soil dissolved carbon and its influencing factors in the artificial shelterbelt irrigated with saline water in an extreme drought desert [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1950-1959.
- [51] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(2): 378-386.
Li J, Wu H J, Wu X P, *et al.* Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, **21**(2): 378-386.
- [52] 郭冬楠, 臧淑英, 赵光影, 等. 冻融作用对小兴安岭湿地土壤溶解性有机碳和氮素矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, **29**(5): 260-265.
Guo D N, Zang S Y, Zhao G Y, *et al.* Effect of freeze-thaw action on dissolved organic carbon and nitrogen mineralization of wetland soil in Xiaoxing'an Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29**(5): 260-265.
- [53] Durán J, Rodríguez A, Morse J L, *et al.* Winter climate change effects on soil C and N cycles in urban grasslands [J]. *Global Change Biology*, 2013, **19**(9): 2826-2837.
- [54] 张彦军, 郭胜利. 环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1446-1456.
Zhang Y J, Guo S L. Effect of environmental factors on variation characteristics of soil microbial respiration and its temperature sensitivity [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1446-1456.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wei, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)