

冬季增温对东北农田黑土氮磷有效性的影响

王子龙, 孙秋雨, 姜秋香^{*}, 刘传兴, 陈昊辉, 单家珣, 王 凯

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究全球气候变暖对东北农田黑土氮、磷有效性的影响, 该研究以东北农田黑土为研究对象, 采用红外辐射增温技术模拟气候变暖(增温 5 °C), 将样地分为增温组(W)和对照组(C)来进行野外原位试验, 通过测定土壤温度、土壤湿度、冻融循环次数、积雪厚度、冻结深度、铵态氮(ammonium N, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮(nitrate N, $\text{NO}_3^- - \text{N}$)、全氮(total N, TN)、微生物量氮(microbial biomass N, MBN)、速效磷(available P, AP)、全磷(total P, TP)浓度, 分析不同指标在冬季增温下的动态变化过程及其响应。结果表明: 冬季增温显著提升土壤温度和含水率, 进而增加土壤的冻融循环次数, 并且减少了土壤积雪深度和冻结深度, 使冻结时间点延后和融化时间点提前。增温组土壤相较于对照组, 经过整个冬季后, 土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN、MBN和TP浓度分别降低126.38%、146.98%、51.23%、21.48%和12.61%, AP浓度提升了25.54% ($P < 0.05$)。在冬季增温过程中, 各时期土壤温度的提升会对土壤有效养分产生显著影响, 导致在融化期氮素大量的流失。研究结果可为后续春季合理高效施肥, 改善东北农田土壤质量提供理论基础。

关键词: 温度; 土壤; 氮; 磷; 冬季增温; 东北; 黑土; 冻融循环

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302162

中图分类号: S158.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0091-11

王子龙, 孙秋雨, 姜秋香, 等. 冬季增温对东北农田黑土氮磷有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 91-101.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302162 <http://www.tcsae.org>

WANG Zilong, SUN Qiuyu, JIANG Qiuxiang, et al. Effects of winter warming on the nitrogen and phosphorus availability of black soil in Northeast farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 91-101. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302162 <http://www.tcsae.org>

0 引言

根据政府间气候变化专门委员会(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次报告, 从1850—1900年, 全球地表平均温度已上升约1 °C, 预计21世纪末全球平均地表温度将上升1.0~5.7 °C^[1]。在气候变暖背景下, 各个季节的升温趋势也不尽相同, 冬季温度的变化幅度更为明显^[2], 地表冻融循环受到影响^[3], 进而使土壤养分发生变化^[4]。

土壤中的氮素和磷素是植物生长发育的必要元素, 其丰缺程度会直接影响植物的生长与发育, 而大多数情况下氮、磷素只有从有机态转化为无机态后, 才能成为被植物有效吸收的养分^[5]。研究指出^[6], 冬季气温变化直接作用于土壤表面, 使其温度在凝固点上下变化, 除土壤温度外, 气候变暖还可能改变土壤含水率、积雪深度、冻结深度和土壤冻融循环作用等。同时, 影响着氮、磷元素循环转化的各个阶段, 并对微生物数量和活性、土壤养分的积累和释放均有重要作用^[7]。温度是控制土壤氮磷循环过程中最重要的气候因素, 温度的升高通常可以加速土壤有机质的分解, 促进土壤养分的积累^[8]。赵

长盛等^[9]综合分析了温度和水分对华中地区土壤氮矿化的影响, 结果表明: 土壤矿化速率受温度、湿度及温湿交互作用的影响。COUGHENOUR等^[10]研究结果表明: 温度是影响土壤氮矿化最重要的非生物因素, 土壤温度的升高会影响土壤氮素的矿化、有机质的分解、土壤养分的含量和迁移过程。LI等^[11]在中国福建使用加热电缆模拟气候变暖情况, 结果表明: 增温会改变土壤微生物群落结构和各项酶活性, 进而导致土壤氮素的严重失衡。CHEN等^[12]对青藏高原的研究发现, 气候变暖显著增加了土壤的呼吸作用, 导致生态系统氮循环加快。WANG等^[13]研究发现, 土壤磷组分主要储存在大团聚体中, 而持续变暖导致土壤大、小团聚体的变化, 进而影响不同团聚体中磷组分的分布。RUI等^[14]探究表明: 全球变暖可能刺激微生物分泌磷酸酶, 有助于有机磷的矿化, 最终导致速效磷浓度的提高。HAN等^[15]模拟冬季平均气温的自然情景, 结果表明: 不同土壤之间差异与土壤有机质浓度和土壤微生物的差异性有关, 快速的冻融交替对土壤微生物群落功能及其恢复能力影响较大。综上所述, 预估土壤有效氮、磷浓度的动态变化、积累和释放, 对土壤生物的生长和发育都有至关重要的作用。

东北地区作为中国多年冻土主要分布区, 每年东北的农田黑土会有近一半的时间处于冻融循环状态中, 受全球气候变暖影响颇深, 冬季土壤温度的上升导致其含水率、积雪深度和冻结深度受到影响^[16], 从而改变土壤的冻融循环频次, 进而使土壤有效氮、磷的积累和释放发生一定变化^[17-18]。土壤温度对土壤氮、磷浓度动态变化具有较大影响^[19], 以往的研究主要通过改变东北地区

收稿日期: 2023-02-27 修订日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179035、51579045); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2019E004)

作者简介: 王子龙, 博士, 教授, 研究方向为寒区农业水土资源高效利用。

Email: wangzilong@neau.edu.cn.

^{*}通信作者: 姜秋香, 博士, 副教授, 研究方向为水土资源高效利用和管理。Email: jiangqiuxiang2017@163.com。

土壤理化性质来间接模拟气候变暖对东北地区土壤各项指标的影响,例如提高土壤温度和含水率、增加冻融循环次数或者改变土壤表面积雪的覆盖情况,大部分研究表明,气候变暖造成东北地区土壤养分大量流失^[20-21]。一部分研究则直接模拟气候变暖对于土壤的影响,即通过埋设增温管或开顶式气室来模拟气候变暖情况。但以上研究均没有考虑气候变暖的增温本质,通过改变土壤理化性质来模拟气候变暖不符合实际自然现象,可能导致土壤自身生化反应发生改变,并且增温管和开顶式气室等增温设备的使用对土壤原位属性产生影响。红外辐射增温仪器通过红外辐射加热土壤来模拟气候变暖情况,对土壤进行无接触式增温,是模拟全球温度升高的最佳方法^[22],更加贴近气候变暖的真实情况。因此,本文以东北农田黑土区土壤为研究对象,探究冬季东北农田黑土在气候变暖背景下,土壤有效氮、磷动态变化,分析冬季增温对土壤有效氮、磷耦合机制的影响,以期气候变暖背景下东北农田黑土养分调控提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于2021年11月—2022年5月在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学水利综合试验场内进行试验。该试验地每年生长季节均会种植一次大豆,并在9月进行收割和重新翻地处理。地块旁有稳定的电力来源,便于长期观测,调整和取样操作。哈尔滨地处中国东北北部地区,黑龙江省南部,属温带大陆性季风气候,研究区地理坐标为126°45'32"E、45°44'41"N,冬季寒冷干燥,春季气温也处于低温状态。历年平均气温3.6℃,冬季多年平均气温为-4.2℃,最冷月平均气温-19.6℃。年积雪覆盖期平均110 d,无霜期140 d,无多年冻土层,试验期内研究区气温和降水动态变化见图1。哈尔滨地区土壤类型种类较多,共计9个土壤类型,其中黑土为研究区主要土壤,同时也是数量最多、分布最广的土壤类型,不同土层的土壤基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

本次试验于2021年11月—2022年5月进行不同温度的冬季试验,选择12个相对平整的地块进行2种处理分别为增温处理(W)和对照处理(C)。其中6个地块为增温处理,6个地块为对照处理,增温处理地块与对照处理地块交错布置,每个地块长3 m,宽2 m,不同地块之间有1 m宽的间隔作为隔离带。将红外辐射加热器(MRM2420,卡格罗电子有限公司,美国,温度精度为±0.5℃)设置在相应地块正上方1.2 m处,保持土壤表层温度增温幅度达到预设标准。由于IPCC第一次工作组在第六次评估报告中提出:21世纪末全球平均地表温度预计将上升1.0~5.7℃^[1]。同时,冬季气候变暖现象较夏季更为明显^[2],故本次试验增温设定为5℃,且在试验期内一直保持工作状态,对照处理地块上方布置相同材质的灰色金属壳以消除误差影响。同时,由于冬季低温和寒风的影响,气温浮动幅度较大,可能与试验设定有差距,具体如图2所示。每次取土使用内径5 cm、

内高15 cm的圆柱型不锈钢取土器,分别从每个地块土壤表层随机选取3个直径为5 cm、深度为15 cm的圆柱形土壤样品放入无菌袋中。人工将土壤样品中的石块,植物根系以及其他杂质去除,并将3个土柱均匀混合。用于土壤铵态氮(ammonium N, NH₄⁺-N)、硝态氮(nitrate N, NO₃⁻-N)、全氮(total N, TN)、微生物量氮(microbial biomass N, MBN)、速效磷(available P, AP)和全磷(total P, TP)浓度的测定。

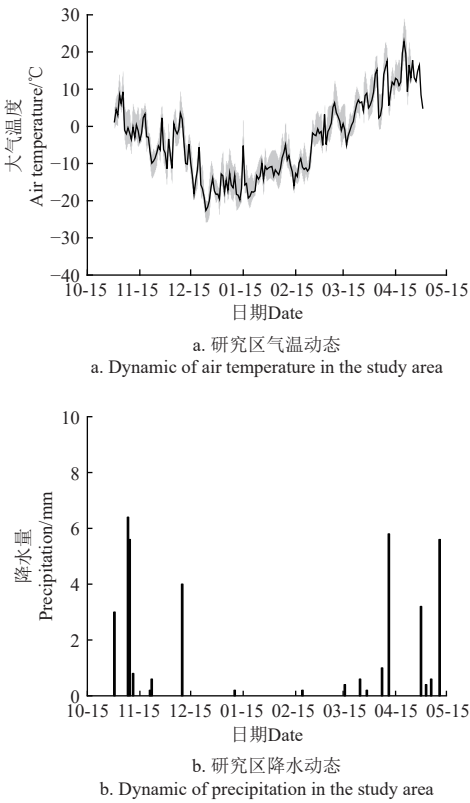


图1 试验期内研究区气温、降水动态
Fig.1 Dynamics of air temperature and precipitation in the study area during the experimental period
表1 供试土壤基础理化性质

| 指标 Index | 土层深度 Depth of soil layer/cm | | |
|---|-----------------------------|----------|----------|
| | 0 ~ 20 | >20 ~ 40 | >40 ~ 60 |
| 干容重 Dry bulk density/(g·cm ⁻³) | 1.46 | 1.50 | 1.52 |
| 砂粒质量分数 Sand particles mass fraction/% | 44.76 | 34.21 | 29.66 |
| 粉粒质量分数 Silt particles mass fraction/% | 36.90 | 40.64 | 43.93 |
| 黏粒质量分数 Clay particles mass fraction/% | 18.34 | 25.15 | 26.41 |
| 饱和含水率 Saturated water content/% | 43.30 | 42.50 | 40.11 |
| 有机质 Organic matter/% | 3.45 | 2.68 | 1.32 |
| 铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹) | 3.83 | 2.44 | 3.43 |
| 硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹) | 5.40 | 8.73 | 5.51 |
| 全氮 Total N(TN)/(mg·kg ⁻¹) | 1 163.76 | 1 032.44 | 860.05 |
| 微生物量氮 Microbial biomass N/(mg·kg ⁻¹) | 11.18 | 9.87 | 8.39 |
| 速效磷 Available P (AP)/(mg·kg ⁻¹) | 21.76 | 17.06 | 9.17 |
| 全磷 Total P(TP)/(g·kg ⁻¹) | 3.75 | 3.30 | 2.86 |

表 2 不同处理下土壤的积雪深度和冻结深度变化特征

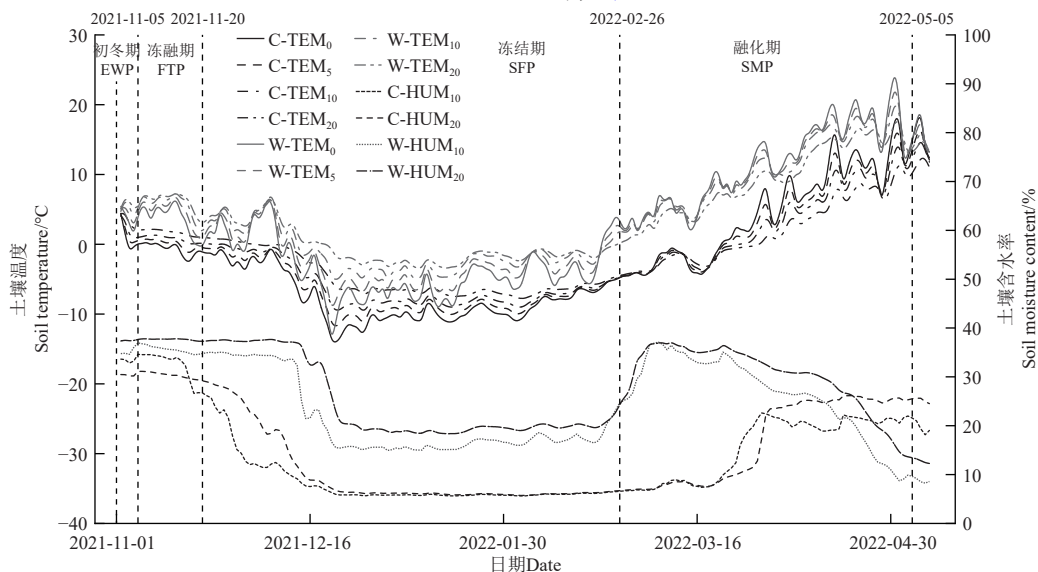
Table 2 Variation characteristics of snow depth and freezing depth of soil under different treatments

| 日期 Date | 积雪深度 Snow depth(SD)/cm | | 冻结深度 Freezing depth (FD)/cm | | 融化深度 Melting depth (MD)/cm | |
|------------|---------------------------|-------|-----------------------------------|--------|----------------------------------|--------|
| | W | C | W | C | W | C |
| 2021-11-03 | 0 | 17.25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2021-11-05 | 0 | 10.69 | 0 | 3.80 | 0 | 0 |
| 2021-11-10 | 0 | 10.35 | 0 | 4.20 | 0 | 0 |
| 2021-11-15 | 0 | 10.15 | 0 | 4.50 | 0 | 0 |
| 2021-11-20 | 0 | 10.00 | 0 | 4.80 | 0 | 0 |
| 2021-11-29 | 0 | 15.31 | 5.00 | 7.00 | 0 | 0 |
| 2021-12-09 | 0 | 10.00 | 0 | 8.30 | 0 | 0 |
| 2021-12-19 | 0 | 12.50 | 9.80 | 20.80 | 0 | 0 |
| 2022-01-03 | 0 | 13.50 | 21.80 | 33.50 | 0 | 0 |
| 2022-01-13 | 0 | 13.75 | 34.00 | 45.00 | 0 | 0 |
| 2022-01-23 | 0 | 14.75 | 61.50 | 66.00 | 0 | 0 |
| 2022-02-03 | 0 | 18.10 | 76.00 | 83.00 | 0 | 0 |
| 2022-02-13 | 0 | 18.19 | 89.50 | 96.50 | 0 | 0 |
| 2022-02-26 | 0 | 19.75 | 120.00 | 129.00 | 0 | 0 |
| 2022-03-04 | 0 | 22.88 | 122.00 | 132.00 | 2.00 | 0 |
| 2022-03-12 | 0 | 6.63 | 121.00 | 133.00 | 38.00 | 0 |
| 2022-03-19 | 0 | 3.31 | 120.00 | 133.00 | 47.00 | 2.00 |
| 2022-03-24 | 0 | 0 | 118.00 | 133.00 | 58.00 | 21.00 |
| 2022-03-29 | 0 | 0 | 115.00 | 131.00 | 69.00 | 34.00 |
| 2022-04-04 | 0 | 0 | 113.00 | 129.00 | 76.00 | 42.00 |
| 2022-04-08 | 0 | 0 | 111.00 | 128.00 | 88.00 | 52.00 |
| 2022-04-23 | 0 | 0 | 115.00 | 127.00 | 100.00 | 60.00 |
| 2022-05-05 | 0 | 0 | 0 | 0.00 | 150.00 | 150.00 |

注: W 表示增温组 (增温 5 °C), C 表示对照组。下同。

Note: W represents the warming group (warming by 5 °C), and C represents the control group. The same below.

图 3 表示不同处理下土壤温度、含水率的动态变化过程。冻融期, 不同冬季环境条件土壤温度、含水率变化趋势较为平稳, 增温组土壤开始冻融循环日期较对照组推迟 14 d。冻结期时, 土壤温度、含水率均处于下降趋势, 此时对照组土壤含水率达到试验期内最低值, 为 5.59%, 增温组与对照组表层土壤温度、含水率差值最大分别为 7.79 °C、23.99%; 不同冬季环境条件下土壤温度、含水率在冻结期末段大致趋于稳定。融化期, 2 组土壤温度变化呈增加趋势, 增温组和对照组表层土壤温度达到整个试验期最大值为 (25.05、19.08 °C), 冬季增温导致此时土壤表层土壤温度提高 5.97 °C; 在 2022 年 4 月 22 日, 增温组和对照组土壤含水率接近, 随后增温组土壤含水率开始降低, 增温组土壤 10 cm 含水率达到最低值 (8.25%), 增温组土壤结束冻融循环日期较对照组提前 19 d。整个试验期后, 冬季增温显著提高 0 cm 土壤温度 5.01 °C、5 cm 土壤温度 5.34 °C、10 cm 土壤温度 5.66 °C、20 cm 土壤温度 5.01 °C、10 cm 土壤含水率 10.50%、20 cm 土壤含水率 12.65% 和冻融循环次数 11 s, 2 种处理下土壤环境因子的显著性分析详见表 3。



注: TEM₀ 表示 0 cm 土壤温度, TEM₅ 表示 5 cm 土壤温度, TEM₁₀ 表示 10 cm 土壤温度, TEM₂₀ 表示 20 cm 土壤温度, HUM₁₀ 表示 10 cm 土壤含水率, HUM₂₀ 表示 20 cm 土壤含水率, EWP 表示为初冬期, FTP 表示为冻融期, SFP 表示为冻结期, SMP 表示为融化期。不同小写字母表示同一指标不同处理在同一时期 0.05 水平差异显著, 不同大写字母表示同一处理不同时期在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: TEM₀ represents 0 cm soil temperature, TEM₅ represents 5 cm soil temperature, TEM₁₀ represents 10 cm soil temperature, TEM₂₀ represents 20 cm soil temperature, HUM₁₀ represents 10 cm soil moisture content, and HUM₂₀ represents 20 cm soil moisture content. EWP represents the early winter period, FTP represents the freeze-thaw period, SFP represents the soil freezing period, and SMP represents the soil melting period. Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level between different treatments for the same indicator during the same period, while different uppercase letters indicate significant differences at the 0.05 level between different periods of the same treatment. The same below.

图 3 不同处理下土壤温度和含水率的变化特征

Fig.3 Variation characteristics of soil temperature and humidity under different treatments

2.2 东北农田黑土有效氮素对冬季增温的响应

不同处理下土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度变化如图 4 所示。增温处理下, 土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 均呈现出先降低后增加再降低的趋势, 初冬期增温组土壤 NH₄⁺-N 浓度达到最大值 (3.90 mg/kg), 而 NO₃⁻-N 浓度最大值在冻结期出现 (6.97 mg/kg); 对照处理下,

土壤 NH₄⁺-N 浓度动态变化为先降低后增加, 而土壤 NO₃⁻-N 呈现出先增加后降低再增加的变化特征, 二者均在融化期达到峰值 (4.30、11.19 mg/kg)。初冬期, 增温组 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度相较于对照组无显著差异; 冻融期, 增温组 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度显著低于对照组, 分别降低 56.12% 和 65.70%; 冻结

期，土壤 NH_4^+-N 在增温处理下变化不明显，而 NO_3^--N 在增温处理下显著增加 31.49%；融化期，增温处理均显著减少 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在土壤中的浓度，分别为 126.38% 和 146.98%。增温处理导致各时期 NH_4^+-N 总浓度显著降低了 33.59%， NO_3^--N 浓度显著降低 30.27%。

表 3 2 种处理下土壤环境因子的显著性分析

| Table 3 Significance analysis of soil environmental factors under two treatments | | | | | | | |
|--|--------------------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| 指标 Index | 土层深度 Depth of soil layer/cm | 处理 Treatment | EWP | FTP | SFP | SMP | 累计平均值 Cumulative average |
| 土壤温度 Soil temperature/℃ | 0 | W | 5.43±0.85 aB | 3.55±0.31 aC | 2.09±0.57 aC | 20.92±0.88 aA | 2.98 a |
| | | C | 4.42±0.60 aB | -2.32±0.16 bC | -5.35±0.47 bD | 18.24±0.70 bA | -2.02 b |
| | 5 | W | 5.07±0.55 aB | 4.98±0.20 aB | 1.03±0.40 aC | 19.96±0.50 aA | 3.53 a |
| | | C | 4.24±0.39 aB | -0.99±0.09 bC | -5.36±0.04 bD | 16.35±0.42 bA | -1.81 b |
| | 10 | W | 4.71±0.30 aC | 6.41±0.09 aB | -0.03±0.04 aC | 19.00±0.18 aA | 4.08 a |
| | | C | 4.05±0.22 bB | 0.34±0.02 bC | -5.37±0.03 bC | 14.46±0.22 bA | -1.58 b |
| | 20 | W | 5.11±0.11 aC | 6.81±0.02 aB | -0.53±0.02 aD | 17.65±0.09 aA | 4.09 a |
| | | C | 4.41±0.08 bB | 1.42±0.01 bC | -5.14±0.03 bD | 11.65±0.10 bA | -1.25 b |
| 土壤含水率 Soil moisture content/% | 10 | W | 34.76±0.04 aB | 35.08±0.01 aA | 20.44±0.13 aC | 8.71±0.05 bD | 24.19 a |
| | | C | 33.64±0.01 bA | 32.37±0.08 bB | 6.37±0.01 bD | 20.52±0.04 aC | 13.69 b |
| | 20 | W | 37.35±0.02 aB | 37.71±0.01 aA | 20.89±0.04 aC | 14.56±0.08 bD | 27.68 a |
| | | C | 30.49±0.02 bA | 29.84±0.01 bB | 6.48±0.01 bD | 25.68±0.03 aC | 15.03 b |
| 冻融循环次数 Number of freeze-thaw cycles(FTCs) | 0~20 | W | 0 aC | 0 bC | 22 aA | 6 bB | 28 a |
| | | C | 0 aD | 7 aB | 1 bC | 9 aA | 17 b |

注：不同小（大）写字母表示同一指标不同处理（时期）在同一时期（处理）0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different small (large) letters indicate significant differences in 0.05 levels between different treatments (periods) for the same indicator at the same period (treatment). The same below.

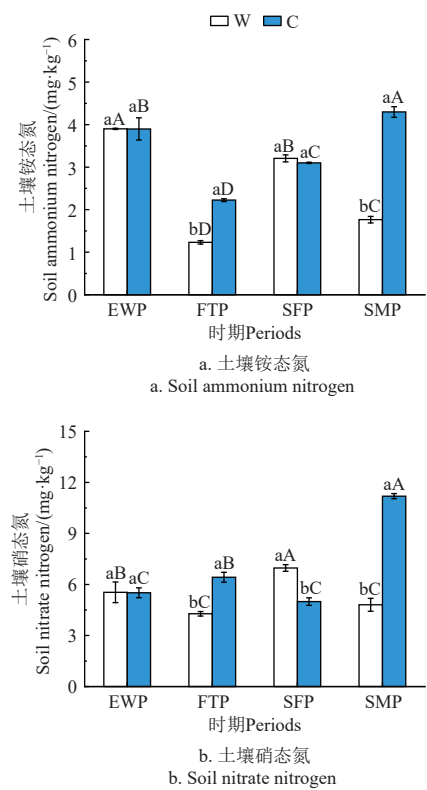


图 4 不同处理下土壤铵态氮和硝态氮变化特征
Fig.4 Variation characteristics of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen under different treatments

不同冬季环境条件下土壤 TN 和 MBN 浓度变化如图 5 所示。冬季增温条件下，土壤 TN 浓度呈现先增加后降低的趋势，并在冻融期内达到最大值（1 263.25 mg/kg）；增温组土壤 MBN 在前 2 个时期持续增加并达到峰值（17.15 mg/kg），在随后的冻结期浓度降低，最后在融

化期土壤 MBN 再次升高；对照处理下，土壤 TN 浓度在整个试验期内稳步上升，并在冻结期和融化期达到峰值（1 499.50 mg/kg），冻结期和融化期全氮浓度差异不显著。对照组土壤 MBN 与增温组趋势相近，均呈现出先增加后降低再增加的动态变化特征。对于 2 种处理下 TN 和 MBN 的变化，在整个试验期，冬季增温均显著降低了其浓度，融化期增温组与对照组 TN 浓度差异最为显著，降低幅度超过一半；土壤 MBN 在冻结期和融化期，增温组相较于对照组均显著降低其浓度，并在融化期时差距最为明显，增温组土壤 MBN 浓度显著降低了 21.48%；冻融期，不同环境处理条件下，土壤 MBN 浓度差异性不显著；冻结期，增温处理显著增加了 1.4 倍的土壤 MBN 浓度。增温处理导致各时期 TN 浓度总和显著降低 18.67%，MBN 总浓度增加了 9.54%。

2.3 东北农田黑土有效磷素对冬季增温的响应

不同处理下土壤 AP 和 TP 浓度变化如图 6 所示。增温处理下，土壤 AP 浓度先上升而后稳定，在融化期达到峰值（24.59 mg/kg），土壤 TP 则为先上升后下降，在冻结期达到峰值（0.46 mg/kg）；对照处理下，土壤 AP 总体趋势为先下降后上升再下降，在冻结期时为最大值（21.95 mg/kg），土壤 TP 浓度与增温组 TP 变化趋势相反，为先减少后增加，在融化期达到最大值（0.43 g/kg）。对于 2 种处理下 AP 和 TP 变化，土壤 AP 和 TP 在前 3 个时期受不同处理条件下的差异大致相同，在冻融期和冻结期，增温组土壤 AP 和 TP 浓度显著高于对照组土壤；在冻融期差异最为显著，增温组土壤 AP 和 TP 浓度显著高于对照组土壤 AP 和 TP 浓度（41.77% 和 30.49%），最后在融化期，土壤 AP 在对于 2 种处理条件下，增温组土壤 AP 浓度显著大于对照组浓度，为 25.54%；对照组土壤 TP 显著高于增温组 TP 浓度，为 12.61%。增温处理导致各时期土壤 AP 浓度总和显著增加 15.58%；TP 总浓度降低了 4.41%。

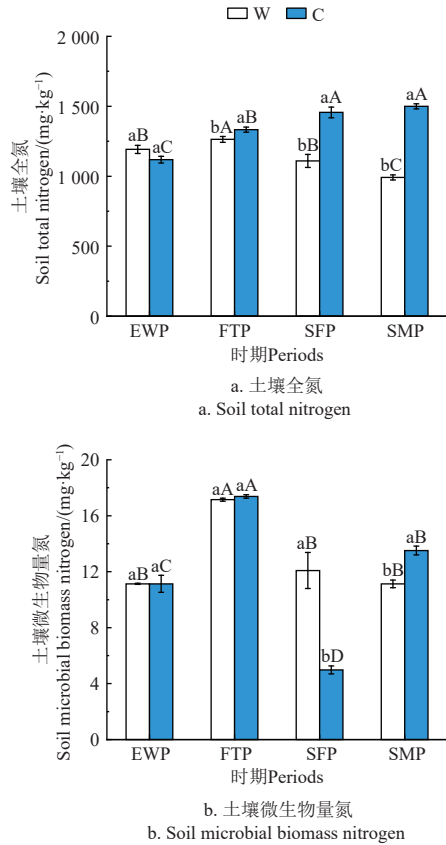


图5 不同处理下土壤全氮和微生物量氮变化特征

Fig.5 Variation characteristics of soil total nitrogen and microbial biomass nitrogen under different treatments

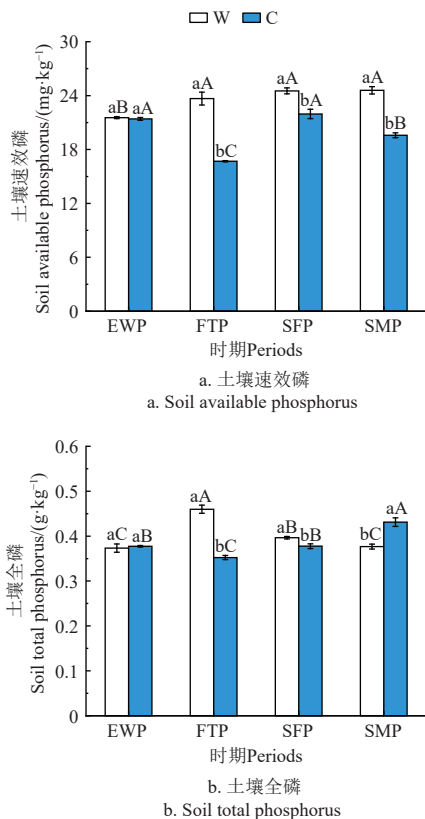


图6 不同处理下土壤速效磷和全磷变化特征

Fig.6 Variation characteristics of soil available phosphorus and total phosphorus under different treatments

2.4 冬季增温下东北农田黑土有效氮、磷与环境因子的响应关系

为进一步探讨东北黑土有效氮磷浓度与环境因子之间的响应关系,采用冗余分析进行统计学分析。由图7可知,不同处理下的环境因子对土壤有效氮磷的影响存在差异。第1轴对响应变量的累积解释量为34.23%,前2轴对响应变量的累积解释量达到59.04%,说明2种处理条件下,前2轴所形成的二维线性关系可以充分反映东北农田黑土有效氮磷与环境因子之间的响应关系。

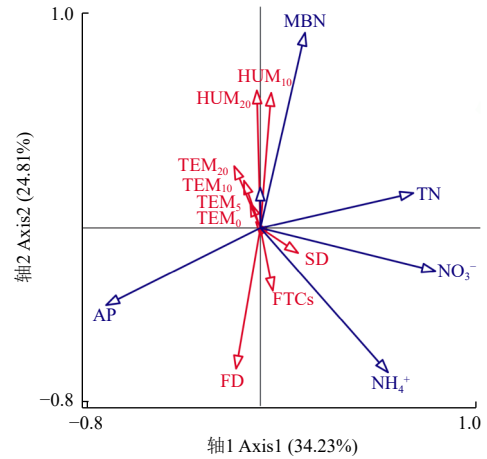


图7 不同处理下有效氮磷与环境因子的关系

Fig.7 Relationship between available nitrogen, phosphorus and environmental factors under different treatments

图7可以直观显示出增温处理下土壤有效氮磷与环境因子之间的关系,各个环境因子到响应变量的截距反映了对响应变量的解释量大小,其中土壤温度、含水率、冻融循环次数、积雪深度以及冻结深度等各项因子对土壤有效氮磷的影响程度均有一定的解释率(其中0 cm土壤温度由于波动较大,对其他因子无显著影响)。20 cm土壤温度、10 cm土壤温度和积雪深度在所有环境因子中所分配的解释率最大,即条件效应,分别为21.7%、16.8%和15.6%。

由图8可知,不同处理下土壤氮磷比的动态变化特征差异显著。增温处理中土壤有效氮磷比($\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$)/AP在冻融期和融化期均显著低于对照组土壤,而在初冬期和冻结期,2种土壤氮磷比差异性不显著,增温组土壤有效氮磷比值由初冬期0.48下降至融化期0.25;对照组土壤有效氮磷比值由初冬期0.48上升至融化期0.95,冬季增温导致土壤有效氮磷比显著降低331.82%。土壤全氮比(TN/TP)可以明显看出,增温作用对土壤全氮磷比有显著削减作用,增温组土壤全氮磷比呈明显下降趋势,比值由初冬期3.53下降至融化期2.74,而对照组土壤全氮磷比呈上升趋势,比值由初冬期3.30上升至融化期4.18,整个试验期后,增温组土壤全氮磷比显著降低41.05%。

表4相关性分析结果显示,土壤有效氮磷比和全氮磷比与冻融循环次数均呈显著正相关。土壤全氮磷比与各层土壤温度、20 cm土壤含水率、冻融循环次数呈显著负相关($P < 0.05$),与积雪深度呈极显著正相关($P < 0.01$)。

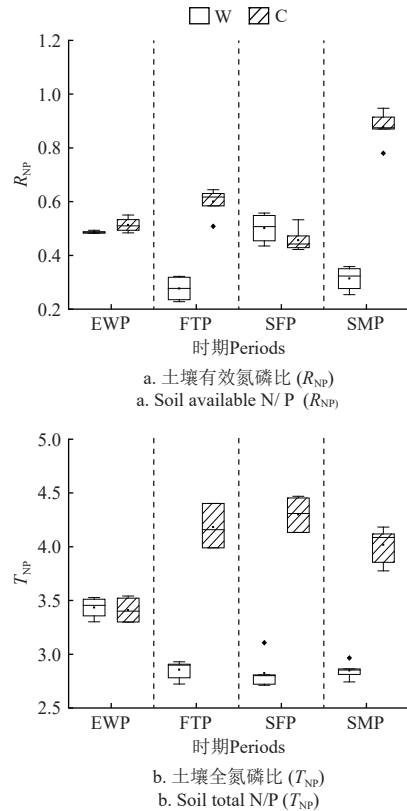


图 8 不同处理下土壤氮磷比变化特征

Fig.8 Variation characteristics of soil N/P under different treatments

表 4 不同处理下土壤氮磷比与环境因子的关系

Table 4 Relationship between soil nitrogen phosphorus ratio and environmental factors under different treatments

| 指标 Index | $\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_3^--\text{N}$ | AP | R_{NP} | TN | TP | T_{NP} |
|-------------------|---|---------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| TEM ₀ | 0.30* | -0.01 | 0.27 | -0.15 | 0.25 | -0.35* |
| TEM ₅ | 0.23 | -0.05 | 0.22 | -0.15 | 0.27 | -0.36* |
| TEM ₁₀ | 0.16 | -0.10 | 0.16 | -0.16 | 0.28 | -0.36* |
| TEM ₂₀ | 0.06 | -0.16 | 0.08 | -0.20 | 0.24 | -0.38* |
| HUM ₁₀ | -0.08 | -0.57** | 0.07 | 0.06 | 0.17 | -0.01 |
| HUM ₂₀ | -0.25 | -0.61** | -0.09 | -0.19 | 0.23 | -0.32* |
| FTCs | 0.32* | -0.03 | 0.31* | -0.42* | -0.05 | -0.40* |
| SD | -0.13 | 0.24 | -0.17 | 0.41* | -0.42* | 0.68** |
| FD | 0.02 | 0.49** | -0.10 | -0.06 | -0.13 | 0.02 |

注：*表示在 0.05 级别（双尾）具有显著相关性，**表示在 0.01 级别（双尾）具有极显著相关性。

Note: * means the correlation is significant at 0.05 level（two-tailed）, and ** means the correlation is extremely significant at 0.01 level（two-tailed）

3 讨 论

3.1 冬季增温对东北农田黑土环境因子的影响

本文结果表明：冬季增温首先作用于表层土壤使土壤温度在各时期均有显著提升，增温幅度可以保持在 5℃左右，进而导致增温组表层土壤在整个试验期内无积雪覆盖。同时，增温组土壤表面无积雪，使得土壤表层温度波动较大，从而导致土壤冻融循环频次的增加，进而

产生相应的生化反应，最终可能致使土壤养分的流失^[21]。此外，许多学者持有不同观点，有相关研究表明气候变暖导致土壤积雪变薄，保温作用随之减弱，从而导致土壤温度和含水率降低^[25]。本试验采用红外辐射加热器模拟未来气候变暖，结果表明：红外加热对冬季土壤含水率有促进作用，就时期来看，在初冬期、冻融期、冻结期和融化期前段均显著增加土壤含水率；在融化期末端，冬季增温显著降低土壤含水率；除融化后期，增温组土壤含水率大于自然组的原因可能是智墒测定的土壤含水率是代指未冻结水，冬季增温使土壤温度提升，未冻水含量也随之增多，致使土壤水分有效性增强^[26]。而到了融化后期，土壤温度大于 0℃，土壤中的水分均为未冻结水，增温条件下土壤温度更高，大量水分蒸发，再加之冬季增温条件土壤冻融循环频次增强，土壤物理结构大幅破坏，入渗量也随之增加，最终使融化期后期土壤含水率显著降低。冬季增温对土壤水热状态的变化会改变土壤各项理化性质，动植物和微生物的活动也会受到影响，最终影响土壤养分的动态变化^[24]。

3.2 增温条件对东北农田黑土有效氮素的影响

土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 对整个氮素循环过程、调节土壤生态系统活性氮库以及维持大气中氮素平衡具有重要意义^[5]。本研究结果表明，土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度与冻融循环次数、温度和含水率有显著相关性。冻融期，对照组土壤显著增加了 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度，土壤中一部分微生物由于冻融作用死亡裂解，释放出营养物质和易降解的有机质，增加土壤中有效氮素浓度^[11]；另一部分没有死亡的微生物利用死亡微生物的残体作为基质，刺激其微生物活性，有利于可溶性有机氮的矿化^[27]。在冻结期，增温组土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 浓度增加，原因在于冬季增温提高了不同深度的土壤温度、含水率，相较于对照组，给予土壤各类微生物和酶更适宜的生活环境，使其得到更好的发挥^[28]。融化期，冬季增温显著降低了 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度，这与前人研究得出结果完全相反^[29]，造成这一现象的原因可能有以下 3 点：1）冻融循环作用可以破坏土壤团聚体结构，导致土壤晶格和胶体的突然释放，显著增加土壤有效氮素的淋溶风险，导致土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的流失^[30]；2）由于在早春，增温组的地面已经有作物生长，作物生长发育需要吸收土壤中的有效氮素，导致融化期土壤 NH_4^+-N 浓度大幅下降。3）土壤在较低温度冻结时，融化后的矿化速率会明显增加，进而增加对照组土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的浓度^[31]。因此，相较于对照组，增温组土壤经过整个冬季之后，土壤中损失大量 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 。本研究还发现不同处理中土壤 NO_3^--N 浓度始终高于 NH_4^+-N 浓度，这是由于土壤 NH_4^+-N 仅能在较低温度土壤中进行积累，而温度升高对土壤硝化作用产生一定促进作用，使得本研究中土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 转化受较大影响^[30]。

本次试验中，冬季增温降低了土壤 TN 的浓度，这表明冬季增温会加快冬季土壤氮循环^[32]，从而增加增温组土壤中更多的氮损失。不同冬季环境条件下土壤全氮

含量差异在融化期最为显著,增温有利于植物对氮的吸收,进而导致土壤全氮的进一步减少^[33]。土壤 MBN 浓度随土壤含水率的升降而变化,这与冗余分析结果保持一致,即土壤 MBN 浓度与土壤含水率呈显著正相关关系,与冻融循环次数呈显著负相关关系,室内冻融模拟试验也发现了相似的现象,随着冻融循环次数的递增,土壤 MBN 表现为先增加后减少的趋势,且冻融温差越大 MBN 减少幅度也相应越大^[34],这与本研究的发现基本吻合。在冻结期,土壤大量水分冻结,可利用水急剧降低,当水分不足时,土壤微生物可能会休眠、活性降低甚至死亡,导致分解能力降低或停止^[35],而冬季增温导致土壤含水率显著高于对照组土壤,进而使 MBN 在冻结期显著高于对照组;土壤融化时,土壤含水率明显升高。可利用的水分和通气程度相应增加,为微生物修复受损和大量生长创造了必要条件,土壤微生物浓度急剧上升^[36]。并且相较于增温处理,对照组土壤冻结期温度较低,受冻结作用死亡的微生物细胞增多,进而释放出更多碳、氮等物质,为残余微生物提供大量的营养物质^[37],由此可能导致对照组土壤 MBN 浓度显著高于增温组。上述结果表明,增温处理可以通过控制土壤温湿度来调节土壤氮素的矿化作用,进而影响土壤有效氮素的浓度^[9]。

3.3 增温条件对东北农田黑土有效磷素的影响

磷素是维持作物生长发育的必要养分,同时,磷素的淋溶可通过地表径流、渗透淋溶等方式进入地下水,威胁着地下水安全,造成环境污染^[7]。本研究结果表明,冬季增温显著增加了土壤 AP 浓度,其主要原因可能在于增温带来冻融循环次数增加所导致,冗余分析结果表明 AP 浓度与冻结深度和冻融循环次数呈显著正相关关系(图 7),本研究结果与这与钱多等^[38]的研究一致。可能的原因有 3 点:1) 冬季增温导致冻融循环次数增多,进而提高了土壤的渗水性和释水性,土壤对磷的吸附量降低,促进了磷元素的释放,增加了 AP 的溶解^[39],包含在土壤矿物颗粒和吸附在土壤胶体上的磷在随水分迁移的过程中发生了形态转换^[5];2) 由于土壤冻结作用,破坏土壤团聚体结构^[26],导致土壤微生物细胞破裂,细胞中的营养物质被释放到土壤中,同时土壤温度降低和水解作用的相互影响下,进一步矿化为 AP^[7];3) 冬季增温直接增加土壤中磷酸酶的活性,促进土壤有机磷的矿化作用^[14]。对于土壤 TP 浓度的变化,土壤融化阶段,增温组土壤中固态水融化,表层土壤水分趋于饱和状态,土壤含水率的增加为养分的淋溶提供了载体^[40],同时,含水率增加导致表层土壤暂时出现厌氧状态,促进了土壤 TP 释放到土壤溶液和孔隙水的过程^[41]。SARDANS 等^[42] 研究表明,变暖增加了土壤磷酸酶的活性,导致土壤 TP 浓度的下降。以上均加剧了冬季增温处理下土壤 TP 的损失^[38]。

3.4 增温条件对东北农田黑土氮磷耦合的影响

植物氮磷比是植物生长过程是否受限的一个重要指标,而土壤作为植物生存的主要物质基础,自身氮磷的耦合情况与植物氮磷比密切相关^[43]。因此,土壤氮磷比

可以作为评估生态系统健康的有效指标^[44]。本研究中结果表明,冬季增温显著降低土壤有效氮磷比和全氮磷比。有效氮磷比与冻融循环次数呈显著正相关,但冻融循环次数对土壤($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 铵态氮和硝态氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 浓度的影响程度高于速效磷;全氮磷比与积雪深度呈极显著正相关,表明积雪深度对全氮和全磷浓度的影响程度不一致,这与 JIAO 等^[45] 研究结果基本符合,增温显著降低有效氮磷比和全氮磷比。同时,氮磷耦合机制不仅受氮、磷自身浓度的影响,还受周围环境因子的作用,如土壤温度、土壤含水率、冻融循环次数、积雪深度等^[43],土壤氮、磷素对冬季增温的不同响应机制改变了耦合关系。冬季增温下土壤氮磷比的减少,代表铵态氮与硝态氮和速效磷以及全氮和全磷之间的耦合机制因冬季增温而减弱,这表明氮素成为土壤中的限制性养分,黑土区农田土壤中氮素流失问题严重。

4 结 论

本文通过对东北农田黑土进行冬季增温试验,探究模拟气候变暖对土壤有效氮、磷的影响。研究结果表明:

1) 冬季增温对东北农田黑土的温度和含水率有较大影响,冬季增温使冬季土壤水分可利用性增强,而加剧了融化后期,即初春期的干旱化,从而带来了积雪覆盖状况及土壤冻融态势的变化,同时使冻结时间点推迟,融化时间点提前,增加了冻融循环次数。

2) 经过整个试验期的冬季增温作用下,黑土区土壤养分大量流失,其中土壤铵态氮、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、全氮、微生物量氮和全磷浓度均受温度影响而受到不同程度的降低。但冬季增温导致土壤速效磷浓度显著增加 25.54%,磷素通过地表径流,渗透淋溶等方式形成淋溶现象造成水体富营养化和地下水受到污染。

3) 冬季增温深刻影响了东北农田黑土氮、磷有效性,土壤氮、磷耦合作用因冬季增温处理而削弱,耦合机制的破坏可能对东北地区生态系统产生负面影响。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Britain: Cambridge University Press, 2021.
- [2] KREYLING J. Winter climate change: A critical factor for temperate vegetation performance[J]. *Ecology*, 2010, 91(7): 1939-1948.
- [3] 成玉婷, 李鹏, 徐国策, 等. 冻融条件下土壤可蚀性对坡面氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 141-149.
CHENG Yuting, LI Peng, XU Guoce, et al. Effect of soil erodibility on nitrogen and phosphorus loss under condition of freeze-thaw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(24): 141-149. (in Chinese with English abstract)
- [4] PENG X Q, FRAUENFELD O W, CAO B, et al. Response of changes in seasonal soil freeze/thaw state to climate change from 1950 to 2010 across china[J]. *Journal of Geophysical*

- Research:Earth Surface*, 2016, 121(11): 1984-2000.
- [5] 赵强, 吴从林, 王康, 等. 季节性冻融区农业土壤矿质氮有效性变化规律原位试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 140-146.
ZHAO Qiang, WU Conglin, WANG Kang, et al. In situ experiment on change law of soil mineral nitrogen availability in seasonal freezing agricultural areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 140-146. (in Chinese with English abstract)
 - [6] FREPPAZ M, WILLIAMS B L, EDWARDS A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1): 247-255.
 - [7] 邓芳博, 鲍雪莲, 梁超, 等. 冻融交替对农田氮磷淋溶影响的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1): 128-140.
DENG Fangbo, BAO Xuelian, LIANG Chao, et al. A review of the freeze-thaw cycling effect on arable soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 128-140. (in Chinese with English abstract)
 - [8] 居雯雯, 邵梦璇, 刘海军, 等. 地面灌溉和滴灌下覆膜对土壤盐分和氮素空间分布的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(Supp.): 68-75.
JU Wenwen, SHAO Mengxuan, LIU Haijun, et al. Effects of film mulching on the spatial distribution of salinity, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in soil under surface and drip irrigations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 68-75. (in Chinese with English abstract)
 - [9] 赵长盛, 胡承孝, 黄魏. 华中地区两种典型菜地土壤中氮素的矿化特征研究[J]. 土壤, 2013, 45(1): 41-45.
ZHAO Changsheng, HU Chengxiao, HUANG Wei. Mineralization characteristics of nitrogen in two typical vegetable soils in central China[J]. Soils, 2013, 45(1): 41-45. (in Chinese with English abstract)
 - [10] COUGHENOUR M B, CHEN D X. Assessment of grassland ecosystem response to atmospheric change using linked plant-soil process models[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 802-827.
 - [11] LI Y, QING Y X, LYU M K, et al. Effects of artificial warming on different soil organic carbon and nitrogen pools in a subtropical plantation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 124: 161-167.
 - [12] CHEN Y, FENG J, YUAN X, et al. Effects of warming on carbon and nitrogen cycling in alpine grassland ecosystems on the Tibetan Plateau: A meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2020, 370: 114363.
 - [13] WANG W, LI Y, GUAN P, et al. How do climate warming affect soil aggregate stability and aggregate-associated phosphorus storage under natural restoration?[J]. *Geoderma*, 2022, 420: 115891-115902.
 - [14] RUI Y, WANG Y, CHEN C, et al. Warming and grazing increase mineralization of organic P in an alpine meadow ecosystem of Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Plant and Soil*, 2012, 357(1/2): 73-87.
 - [15] HAN C, GU Y, KONG M, et al. Responses of soil microorganisms, carbon and nitrogen to freeze thaw cycles in diverse land-use types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 124(6): 211-217.
 - [16] 申静霞, 袁秀锦, 李迈和, 等. 土壤温度和水分变化对川西云杉幼苗氮和磷浓度的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 31-41.
SHEN Jingxia, YUAN Xiujin, LI Maihe, et al. Effects of soil temperature and moisture on nitrogen and phosphorus contents in picea balfouriana seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(4): 31-41. (in Chinese with English abstract)
 - [17] 毛超, 漆良华. 森林土壤氮转化与循环研究进展[J]. 世界林业研究, 2015, 28(2): 8-13.
MAO Chao, QI Lianghua. Research advances on nitrogen transformation and cycling in forest soil[J]. *World Forestry Research*, 2015, 28(2): 8-13. (in Chinese with English abstract)
 - [18] 胡钰, 香宝, 刘玉萍, 等. 交替冻融对东北地区典型土壤氮磷浓度的影响[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(4): 333-338.
HU Yu, XIANG Bao, LIU Yuping, et al. Freeze-thaw cycle effects on nitrogen and phosphorus content in typical soils of Northeast China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(4): 333-338. (in Chinese with English abstract)
 - [19] 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 Ning, SHI Peili. 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. (in Chinese with English abstract)
 - [20] 郑恩楠, 朱银浩, 胡建宇, 等. 水肥耦合对水稻生长土壤呼吸与无机氮的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 272-279.
ZHENG Ennan, ZHU Yin hao, HU Jianyu, et al. Coupling of water and fertilizer methods on growth of rice, soil respiration and inorganic nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 272-279. (in Chinese with English abstract)
 - [21] 王子龙, 王凯, 姜秋香, 等. 黑土表层有效养分浓度和酶活性对雪被去除的季节性响应[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 111-118.
WANG Zilong, WANG Kai, JIANG Qiuxiang, et al. Seasonal response of available nutrient content and enzyme activity in black soil surface to snow removal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2022, 38(2): 111-118. (in Chinese with English abstract)
 - [22] 王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 等. 气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1967-1978.
WANG Zilong, LIU Chuanxing, JIANG Qiuxiang, et al. Effects of climate warming on the key process and index of black soil carbon and nitrogen cycle during freezing period[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1967-1978. (in Chinese with English abstract)
 - [23] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.

- [24] 张园, 袁凤辉, 王安志, 等. 2001—2018 年长白山自然保护区生长季 NDVI 变化特征及其对气候变化的响应 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1213-1222.
ZHANG Yuan, YUAN Fenghui, WANG Anzhi, et al. Variation characteristics of NDVI and its response to climatic change in the growing season of Changbai Mountain Nature Reserve during 2001 and 2018[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1213-1222. (in Chinese with English abstract)
- [25] HARDY J P, GROFFMAN P M, FITZHUGH R D, et al. Snow depth, soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 151-174.
- [26] 陈有超, 鲁旭阳, 李卫朋, 等. 藏北典型高寒草原土壤微气候对增温的响应[J]. 山地学报, 2014, 32(4): 401-406.
CHEN Youchao, LU Xuyang, LI Weipeng, et al. Response of soil microclimate to warming in alpine steppe, Northern Tibetan Plateau[J]. Mountain Research, 2014, 32(4): 401-406. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王丽芹, 齐玉春, 董云社, 等. 冻融作用对陆地生态系统氮循环关键过程的影响效应及其机制[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3532-3544.
WANG Liqin, QI Yuchun, DONG Yunshe, et al. Effects and mechanism of freeze-thawing cycles on key processes of nitrogen cycle in terrestrial ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3532-3544. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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浓度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 518-523.
YU Jitong, TAO Jiahui, MA Xiaofan, 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. (in Chinese with English abstract)
- [29] 周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 1-6.
ZHOU Wangming, WANG Jinda, LIU Jingshuang, et al. Effects of freezing and thawing on dissolved organic carbon and nitrogen pool and nitrogen mineralization in typical wetland soils from San jiang plain, Heilongjiang[J]. China Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [30] DECAI G, LEI Z, JUN L, et al. Responses of terrestrial nitrogen pools and dynamics to different patterns of freeze - thaw cycle: A meta - analysis[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(6): 2377-2389.
- [31] SCHMIDT S K, LIPSON D A. Microbial growth under the snow: Implications for nutrient and allelochemical availability in temperate soils[J]. *Plant and Soil*, 2004, 259(1): 1-7.
- [32] BAMMINGER C, POLL C, MARHAN S. Offsetting global warming-induced elevated greenhouse gas emissions from an arable soil by biochar application[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(1): 318-334.
- [33] SCHIMEL J P, BILBROUGH C, WELKER J M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(2): 217-227.
- [34] ZHANG Q F, XIE J S, LYU M K, et al. Short-term effects of soil warming and nitrogen addition on the N: P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* in subtropical regions[J]. *Plant and Soil*, 2017, 411(1/2): 395-407.
- [35] CLARK J S, CAMPBELL J H, GRIZZLE H, et al. Soil microbial community response to drought and precipitation variability in the Chihuahuan Desert[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 57(2): 248-260.
- [36] 李越, 李根东, 陈志君, 等. 基于氮收支平衡的河套灌区春小麦农田灌溉和施氮策略[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 61-72.
LI Yue, LI Gendong, CHEN Zhijun, et al. Irrigation and N application strategies for spring wheat fields in the Hetao irrigation district based on N balance s[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2022, 38(17): 61-72. (in Chinese with English abstract)
- [37] SHARMA S, SZELE Z, SCHILLING R, et al. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(3): 2148-2154.
- [38] 钱多, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融作用对棕壤磷素吸附-解吸特性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 279-283.
QIAN Duo, FAN Haoming, ZHOU Lili, et al. Effect of freezing and thawing on phosphorus adsorption and desorption characteristics in brown earth[J]. Journal Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 279-283. (in Chinese with English abstract)
- [39] TIMMONS D R, LATTERELL J J, HOLT R F. Leaching of crop residues as a source of nutrients in surface runoff water[J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(5): 1367-1375.
- [40] SHEN Q, WANG X, QU F, et al. Responses of soil total phosphorus to freeze and thaw cycles in a Mollisol watershed[J]. *Geoderma*, 2020, 376: 114571.
- [41] MARANGUIT D, GUILLAUME T, KUZYAKOV Y. Effects of flooding on phosphorus and iron mobilization in highly weathered soils under different land-use types: Short-term effects and mechanisms[J]. *Catena*, 2017, 158: 161-170.
- [42] SARDANS J, J. PEÑUELAS, ESTIARTE MPEÑUELAS, ESTIARTE M. Warming and drought alter soil phosphatase activity and soil P availability in a Mediterranean shrubland[J]. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 227-238.
- [43] MEI L, YANG X, ZHANG S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate phosphorus limitation by reducing plant N: P ratios under warming and nitrogen addition in a temperate meadow ecosystem[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 686: 1129-1139.
- [44] ZHANG N, GUO R, SONG P, et al. Effects of warming and nitrogen deposition on the coupling mechanism between soil nitrogen and phosphorus in Songnen Meadow Steppe, northeastern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 96-104.
- [45] JIAO F, SHI X R, HAN F P, et al. Increasing aridity, temperature and soil pH induce soil C-N-P imbalance in grasslands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19601.

Effects of winter warming on the nitrogen and phosphorus availability of black soil in Northeast farmland

WANG Zilong, SUN Qiuyu, JIANG Qiuxiang^{*}, LIU Chuanxing, CHEN Haohui, SHAN Jiaxun, WANG Kai

(*School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China*)

Abstract: Soil's physical and chemical properties have greatly changed the soil nutrient with the increasingly severe global warming in recent years. As the largest grain reserve base in China, the farmland black soil in Northeast China can depend mainly on climate warming. The increase in winter temperature can lead to some change in the soil moisture, the number of freeze-thaw cycles, snow depth, and freezing depth, particularly in the accumulation and release of soil available nitrogen and phosphorus. The purpose of this study is to clarify the response of nitrogen and phosphorus in the black soil of farmland in Northeast China to global warming. A total of 12 plots were divided in the field test, where 6 plots were subject to the treatment of temperature increasing, and 6 plots were the control treatment. Two types of treatments were used for the field in situ experiments. The infrared radiation warming technology was used to simulate climate warming. Field experiments were then conducted to measure the soil environmental factors, including the concentration of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, microbial biomass nitrogen, available phosphorus, and total phosphorus during the 6-month experimental period. A systematic analysis was made to explore the impact of temperature rise on the availability of nitrogen and phosphorus in the black soil of farmland. The results showed that the heating treatment significantly increased the soil temperature, soil humidity, and the number of freeze-thaw cycles. At the same time, the heating treatment with no snow cover on the soil surface delayed the freezing time, and then advanced the melting time, compared with the control. In addition, the heating treatment significantly reduced the concentration of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen, microbial biomass nitrogen, and total phosphorus, whereas, the content of soil available phosphorus significantly increased by 25.54 % ($P < 0.05$). There was a decrease in the ratio of the soil's available nitrogen and phosphorus, while the ratio of the total nitrogen and phosphorus in the soil under the warming group. Compared with the control, the soil available nitrogen: available phosphorus ratio, and the soil total nitrogen: total phosphorus ratio decreased by 331.82% and 41.05%, respectively ($P < 0.05$). Moreover, there was no same correlation between soil available nitrogen and available phosphorus with the environmental factors. A positive correlation was found between the soil's available nitrogen, soil temperature, and the number of freeze-thaw cycles, while there was a significant correlation between the available phosphorus, soil humidity, and freezing depth. The increasing soil temperature at various stages posed a significant impact on the soil's available nutrients during winter warming. Therefore, there was a significant loss of soil available nitrogen during thawing. A significant increase was found in the soil phosphorus, leading to the eutrophication of water bodies and the pollution of groundwater. Winter warming shared a profound impact on the effective terms of soil nitrogen and phosphorus. The heating treatment can be expected to alleviate the coupling effect of soil nitrogen and phosphorus. Particularly, the negative impact was previously found in the coupling mechanism between nitrogen and phosphorus on the ecosystem in Northeast China. The finding can provide a theoretical basis for efficient fertilization and the rational regulation of ecosystems for the better overall quality of farmland black soil in Northeast China in the context of future global warming.

Keywords: temperature; soils; nitrogen; phosphorus; winter warming; northeast; black soil; freeze-thaw cycle