

# 冬灌条件下季节性冻融期农田土壤可培养微生物数量变化及其影响因素<sup>①</sup>

杨跃发<sup>1,2</sup>, 王春霞<sup>1,2\*</sup>, 梁飞<sup>3</sup>, 蓝明菊<sup>1</sup>, 孙开<sup>1,2</sup>

(1 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆石河子 832000; 3 新疆农垦科学院, 新疆石河子 832000)

**摘要:** 为揭示新疆石河子季节性冻融期不同冬灌定额对农田土壤可培养微生物(细菌、霉菌)数量的影响规律, 2021—2022 年通过田间微区试验, 设置了 45、90、135、180 mm 不同的冬灌定额和不灌水对照处理, 对比分析了整个冻融期农田土壤细菌、霉菌数量变化及其影响因素。结果表明: 冻结初期, 细菌数量与土壤含水量和灌水量呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 霉菌数量与土壤 pH 呈显著负相关 ( $P<0.05$ ); 稳定冻结期, 细菌数量与土壤平均温度呈显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与灌水量和土壤含水量呈显著负相关 ( $P<0.05$ ), 而霉菌数量与土壤水、热、盐呈弱相关; 融化期, 细菌和霉菌数量与土壤含水量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 霉菌数量与土壤平均温度呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。整个季节性冻融期细菌相比霉菌数量较多, 细菌在土壤中扮演主要角色, 而充足的降雪使冬灌定额对细菌和霉菌的数量影响不明显。

**关键词:** 季节性冻融期; 细菌数量; 霉菌数量; 土壤水热盐分布; 冬灌定额

中图分类号: S182 文献标志码: A

## Changes of Soil Cultivable Microorganisms in Seasonal Freezing and Thawing Period Under Winter Irrigation and Influencing Factors

YANG Yuefa<sup>1,2</sup>, WANG Chunxia<sup>1,2\*</sup>, LIANG Fei<sup>3</sup>, LAN Mingju<sup>1</sup>, SUN Kai<sup>1,2</sup>

(1 College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2 Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 3 Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** In order to reveal the changes and impacts of the cultivable microorganisms number in farmland soil under different winter irrigation quotas in Shihezi during seasonal freeze-thawing period, a micro-field experiment was conducted during 2021—2022, the quantity changes of soil bacteria and mould and their influencing factors were analyzed under different winter irrigation quotas of 45, 90, 135, 180 mm with no-irrigation as the control during the freezing-thawing period. The results show that in the initial freezing period, the number of bacteria is significantly negatively correlated with soil water content and irrigation amount ( $P<0.05$ ), while the number of mould is significantly negatively correlated with soil pH ( $P<0.05$ ). In the stable freezing period, the number of bacteria is significantly positively correlated with soil average temperature ( $P<0.05$ ) and significantly negatively correlated with irrigation amount and soil moisture content ( $P<0.05$ ); while the number of mould is weakly correlated with soil moisture, temperature and salt. In the thawing season, the numbers of bacteria and mould are negatively correlated with soil water content ( $P<0.01$ ), and the number of mould is significantly positively correlated with soil average temperature ( $P<0.05$ ). Throughout the seasonal freezing-thawing period, bacteria are more dominant than mould, and play a major role in soil, and the effect of winter irrigation quota is not obvious on the numbers of bacteria and mold due to sufficient snowfall.

**Key words:** Seasonal freezing-thawing period; Number of bacteria; Number of mould; Soil water, heat and salt distribution; Winter irrigation quota

①基金项目: 新疆重点产业创新发展支撑计划项目(2021DB012, 2022DB020)和国家自然科学基金项目(U1803244)资助。

\* 通讯作者(410443356@qq.com)

作者简介: 杨跃发(1995—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1131183413@qq.com

我国季节性冻土面积占陆地面积的 53.3%，大部分位于干旱、半干旱地区<sup>[1]</sup>。季节性冻融期土壤经历了冻结初期、稳定冻结期和融化期 3 个阶段，土体内水分体积变化导致土壤水、热、盐运移规律改变<sup>[2-3]</sup>。冬灌后，季节性冻融土壤水、热、盐、pH 等发生显著性的变化。研究表明，冬灌对洗盐改土、消灭病虫害、平衡土壤温度、改善土壤结构和提高作物产量有明显的作用<sup>[4-5]</sup>。土壤微生物种类繁多，分布广，冻融作用下不同的冬灌定额对土壤理化性质的改变，直接或间接地影响土壤微生物的生命活力<sup>[6]</sup>。季节性冻融期是农田休耕期向春播期过渡的关键时期，也是土壤恢复地力的主要时期。土壤细菌生长繁殖能力旺盛，是土壤微生物生命活动的主体和土壤中物质分解的主要参与者，几乎参与了土壤中所有的化学过程，在土壤物质转化过程中扮演着重要的角色<sup>[7]</sup>。土壤霉菌能够利用矿物质和水分，制造有机物，提供植物生长必需的物质和改善土壤质地。季节性冻融过程改变了土壤水、热、盐状况，进而对土壤微生物产生影响。因此，进行不同的冬灌定额对土壤细菌和霉菌的影响研究是必要的。

季节性冻融期，不同冬灌定额条件下，土壤温度、水分、入渗量和蒸发损失量具有很大的差异<sup>[8]</sup>，这些差异对土壤微生物有不同的影响。马晓飞等<sup>[9]</sup>研究表明，随着土壤温度降低，部分微生物死亡，微生物数量下降，但是随着温度升高，死去的微生物残体被幸存的微生物所利用，微生物数量再次增加。但 Sulkava 和 Huhta<sup>[10]</sup>研究表明，土壤在冻结期微生物仍有较高的活性。水分对于微生物也十分重要<sup>[11]</sup>，土壤不同含水率对微生物的影响不同，轻度干旱使土壤微生物数量增加，中度和重度干旱则使土壤微生物数量减少<sup>[12]</sup>。且有研究表明，土壤含水量的变化对土壤真菌的影响显著，对细菌几乎没有影响<sup>[13]</sup>。目前土壤 pH 是公认的对土壤微生物有着关键影响的因素之一<sup>[14-17]</sup>。土壤 pH 不同，对土壤微生物的影响也不同，比如 pH 越高，土壤中细菌数量越多<sup>[13]</sup>。但也有研究表明，土壤中微生物的多样性和微生物的数量与土壤 pH 无显著相关性<sup>[16]</sup>。在稳定冻结期，细菌受土壤理化性质的影响较大；在融化期，细菌未受到任何土壤理化性质的影响<sup>[18]</sup>。综上可知，国内外学者对季节性冻融期土壤细菌的变化研究结论不一，而对霉菌的研究较少，因此研究季节性冻融期土壤环境因子对细菌和霉菌数量的影响非常必要。

新疆位于中国西北地区，冬季季节性冻融过程表现明显。本文以新疆典型季节性冻土区土壤为研究对

象，于 2021 年 10 月至 2022 年 4 月进行不同的冬灌定额处理，研究土壤细菌、霉菌数量变化及其与土壤水、热、盐性质的相关关系，探讨微生物数量随不同冬灌定额变化的特征，以揭示干旱区季节性冻融过程中冬灌调控土壤可培养微生物(细菌、霉菌)生长的作用机理，为当地农民冬灌水量的控制提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于石河子大学灌溉试验站，天山北麓中段，准噶尔盆地南部(85°59'E, 44°19'N)。该区气候干燥，日照时间长达 14 ~ 16 h，平均蒸发量达 1 820.9 mm，冬季为 10 月至来年 3 月，漫长而严寒，降雪频繁，每年最低气温出现在 1 月，属于较典型的季节性冻土区。2021—2022 年季节性冻融期最低气温 -24.9 °C，最高气温 28.1 °C，降雪较往年频繁，最大降雪深度达 240 mm 以上。研究区土壤为砂壤土，0 ~ 20 cm 土壤有机质 25 g/kg，碱解氮 101 mg/kg，有效磷 30.5 mg/kg，速效钾 326 mg/kg；0 ~ 100 cm 土壤平均容重为 1.53 g/cm<sup>3</sup>，土壤饱和含水量为 28.8%，田间质量持水率 21.6%，地下水埋深 9 m 以下。试验期内气温和降水量见图 1。

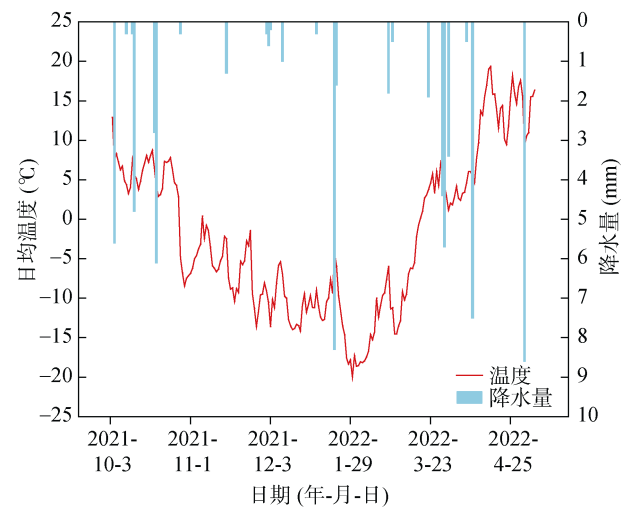


图 1 试验期内气温和降水量变化

Fig. 1 Changes of temperature and precipitation during test period

### 1.2 试验设计

试验区共划分 15 个 2 m×2 m 试验小区，每个小区四周深挖 60 cm，内壁用 PVC 板阻隔，小区间相邻 40 cm，便于取土。每个小区深翻 28 cm，施足底肥，播种 8 行冬小麦。设置 5 个不同的冬灌定额，分别为 0、45、90、135、180 mm，其中 0 mm 为对照

处理,从播种到小麦返青期土壤保持原状,其他处理均采用漫灌控制水量。同时,在每个小区土壤深度 10、25、40、60 cm 处理设温度探头(i500-T 土壤温度记录仪)进行温度数据自动采集。

### 1.3 土壤样品采集

在季节性冻融期的不同阶段,每个样田中随机选取 3 个采样点,用土钻在垂直方向分别取 0~10、10~25、25~40、40~60 cm 的土样。每次下钻前用酒精棉擦拭,取出土后立刻置于封口袋中密封并放于保温箱中带回试验室,及时进行可培养微生物数量(细菌、霉菌)的测定。另外,取部分土样风干、研磨、过筛用于测定土壤其他理化指标。

### 1.4 测定指标及方法

土壤含水量的测定:采用烘干法。

土壤 pH 和含盐量的测定:称取风干土样 5 g 和 50 mL 蒸馏水按 1:5 的比例(*m*:*V*)混合,搅匀,静置 30 min 后,用 pH 计测定 pH;24 h 后通过滤纸提取土壤悬浊液,利用 FE38-Standard 电导率仪测定土壤悬浊液的电导率,并通过试验拟合得到的电导率与

含盐量之间的关系式( $y=3.2759x+1.9026, R^2=0.9278$ , *x* 表示电导率(mS/cm), *y* 表示含盐量(g/kg))计算获得土壤含盐量。

土壤温度的测定:利用 i500-T 土壤温度记录仪监测。

土壤细菌和霉菌数量测定:采用稀释平板法<sup>[19]</sup>。

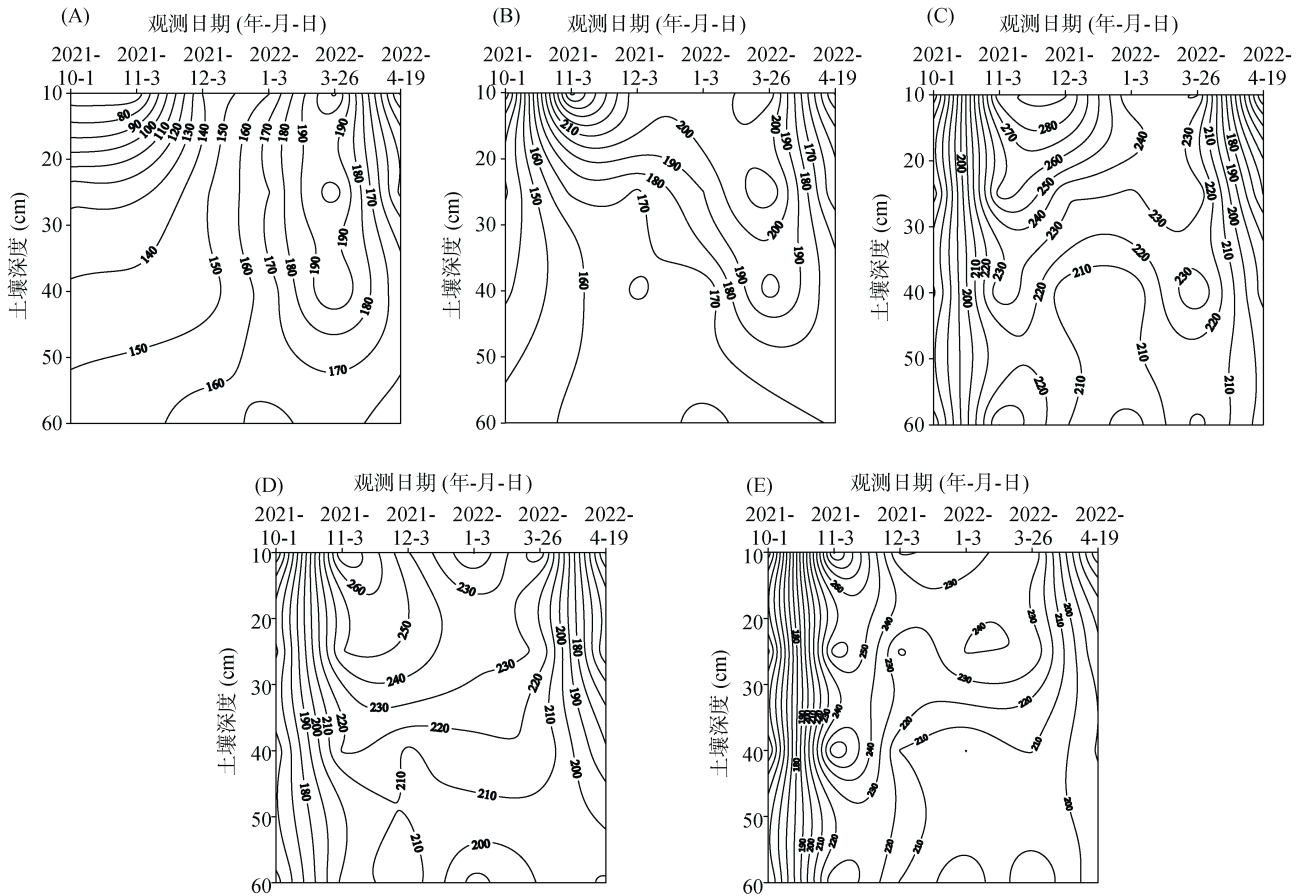
### 1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理,通过 Origin 2021、Canoco5、Surfer12 作图,采用 SPSS 25.0 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 季节性冻融期土壤水、热、盐时空分布特征

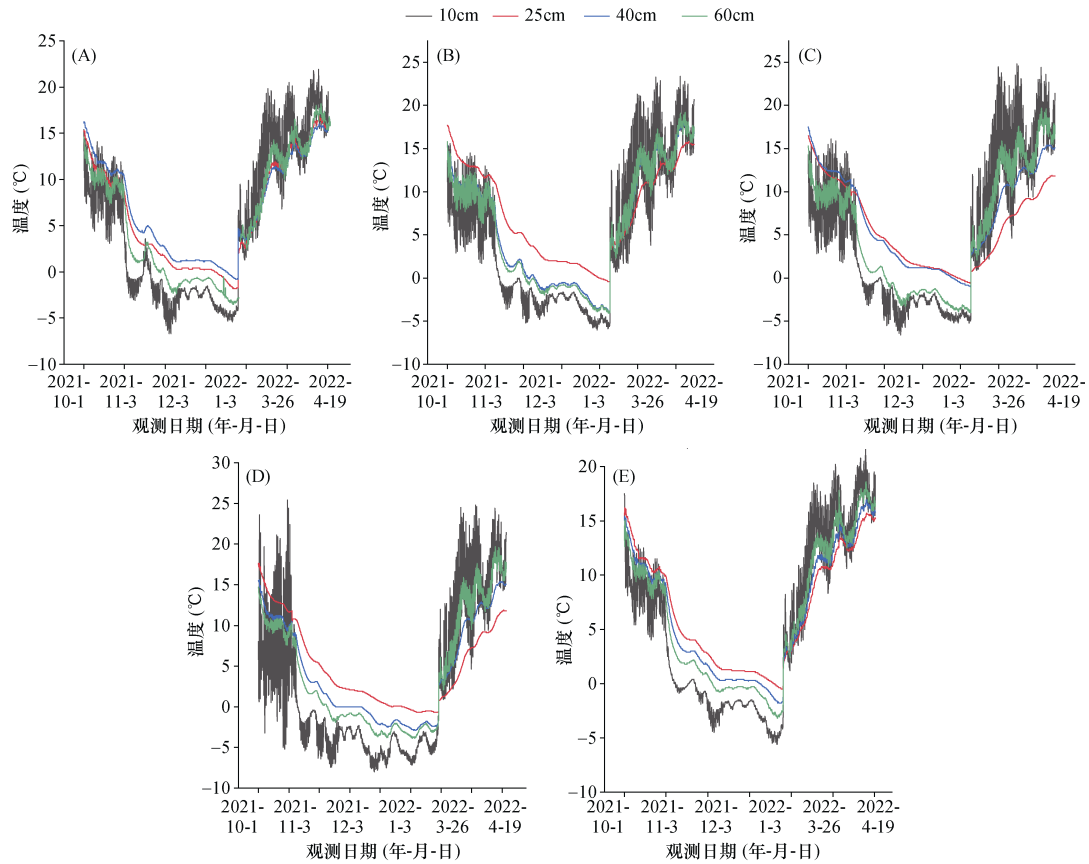
试验区土壤水分主要来源于降雪和灌溉,图 2~图 5 为不同冬灌定额下,土壤水、热、盐及 pH 的时空变化图。由图 2 可知,由于不同的冬灌定额,土壤含水量差异明显,可通过含水量等高线的疏密程度和平缓弯折程度体现。整个冻融期间对照处理等高线疏密均匀,0~25 cm 土层含水量随着深度增加变化梯



(图 A、B、C、D、E 分别表示冬灌定额 0、45、90、135、180 mm, 下同)

图 2 不同冬灌定额下土壤含水量(g/kg)的时空变化

Fig. 2 Temporal and spatial variations of soil water content under different winter irrigation quotas



(每个图中垂直上升线：由于 i500-T 土壤温度记录仪电量耗尽没有记录数据所导致)

图 3 不同冬灌定额下土壤温度的变化

Fig. 3 Changes of soil temperature under different winter irrigation quotas

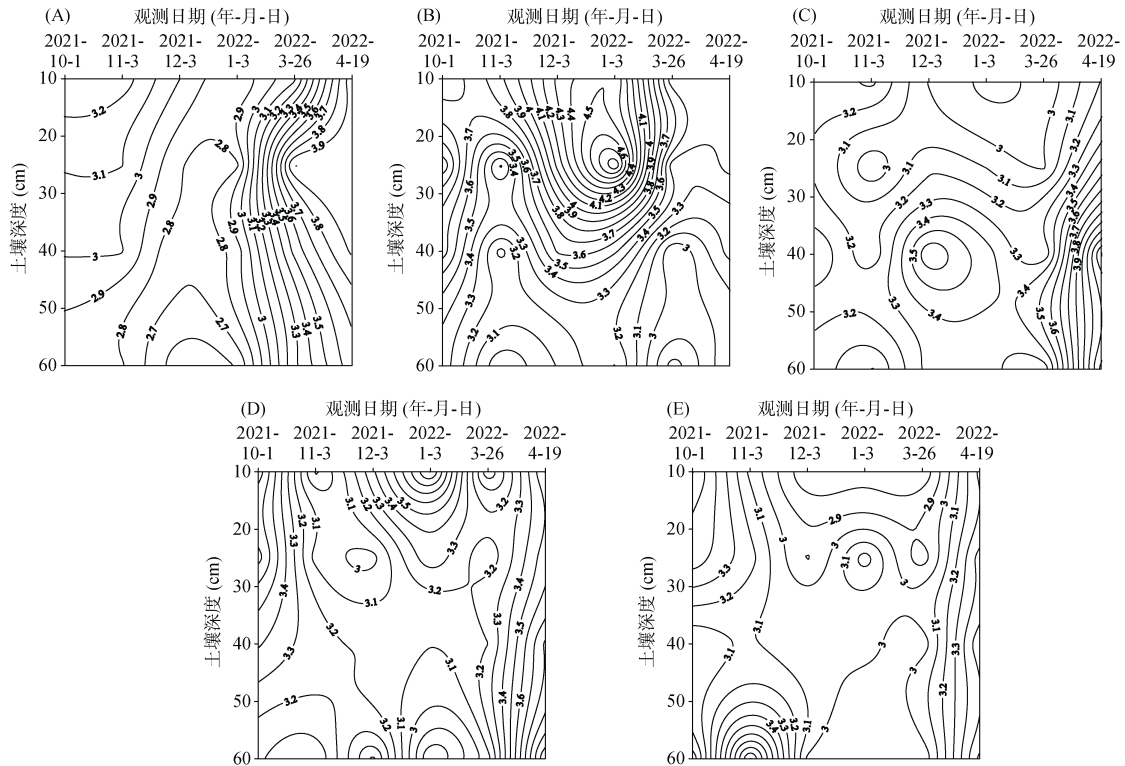


图 4 不同冬灌定额下土壤含盐量(g/kg)的时空变化图

Fig. 4 Temporal and spatial changes of soil salt content under different winter irrigation quotas



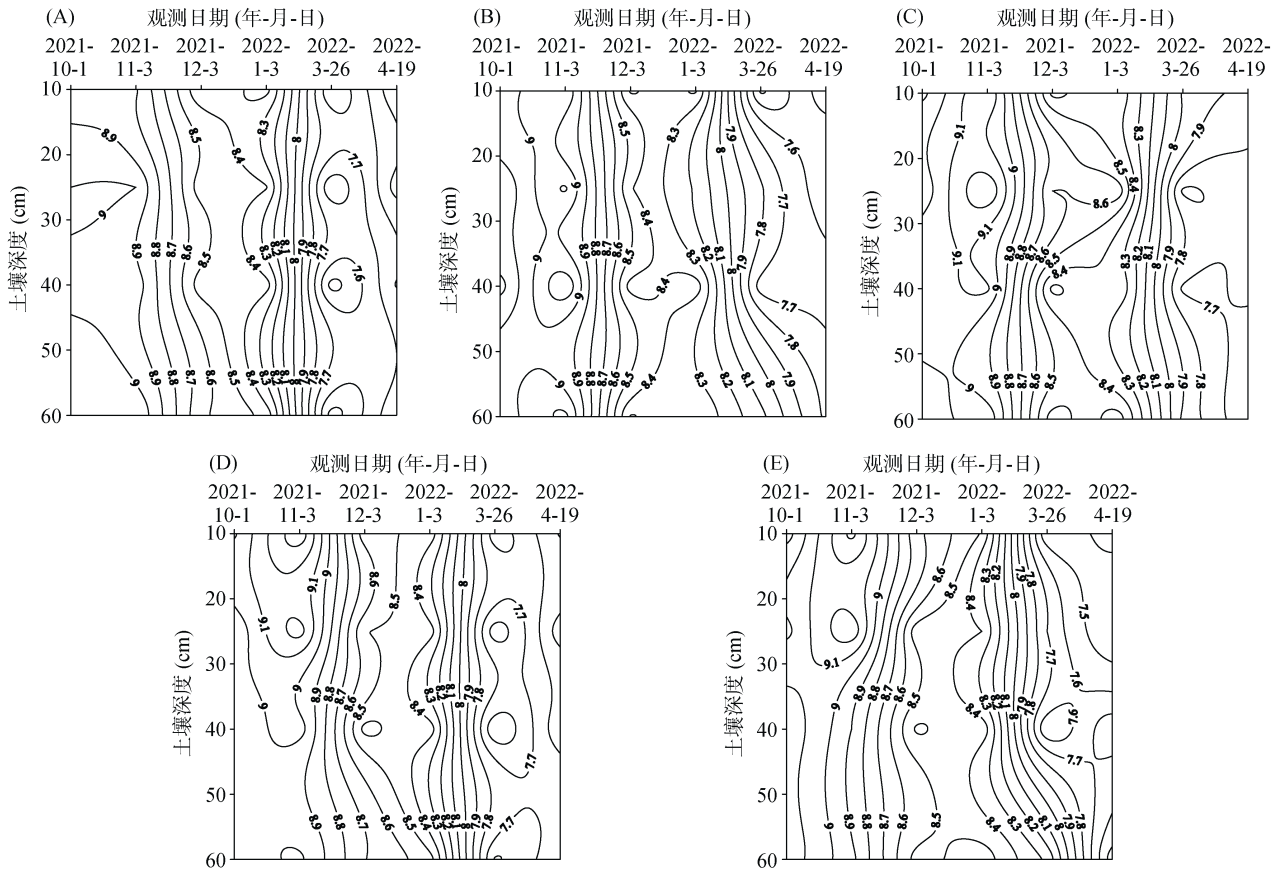


图5 不同冬灌定额下土壤pH的时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial variations of soil pH under different winter irrigation quotas

度大, 25 cm 以下变化梯度小。45 mm 冬灌定额处理样田在冻结初期 0 ~ 25 cm 土层含水量等高线较密, 25 cm 土层以下含水量等高线稀疏; 稳定冻结期 0 ~ 60 cm 土层含水量等高线稀疏; 直到融化期, 0 ~ 25 cm 土层含水量等高线再次变密。90、135、180 mm 冬灌定额处理样田在 10 月至 11 月冻结初期 0 ~ 60 cm 含水量等高线较密、平缓, 反映土壤含水量随着时间的变化其变化梯度较大, 但随着土层深度的变化其变化不剧烈; 稳定冻结期 11 月中旬至 3 月初, 含水量等高线程度稀疏, 直到融化期 4 月再次变密。

季节性冻融期冬灌水量虽有不同, 但土壤温度的变化规律基本一致(图 3)。在冻结初期和融化期, 10 cm 和 60 cm 深度土层的温度波动幅度较大, 25 cm 和 40 cm 深度土层的温度变化幅度较小。冻结初期到稳定冻结期, 对照处理 40 cm 深度土层的温度最高, 10 cm 深度土层在冻结初期偶尔出现温度最高; 其他灌水处理 25 cm 深度土层的温度最高。融化期, 所有处理样田 10 cm 深度土层温度最高, 而 25 cm 深度土层的温度最低。

由图 4 可知, 对照处理样田在 10 月至次年 1 月,

含盐量的等高线较疏且平缓, 这可能是由于冬季蒸发弱, 土壤含盐量的变化相对稳定; 随着时间的推移, 至融化期, 土壤含盐量的等高线变密且曲折, 由于日照时间长, 土壤蒸发量大, 盐分随水分蒸发到土壤表层, 出现很明显的反盐现象。45 mm 和 135 mm 冬灌定额处理在 12 月至次年 1 月的稳定冻结期, 土壤出现明显的返盐现象。在次年 3 月至 4 月融化期, 除 45 mm 冬灌定额处理外, 90、135、180 mm 冬灌定额处理土壤含盐量均随土层深度的增加而增加, 原因为稳定冻结期保持的水分在融化期将盐分淋洗到土壤深层。45 mm 冬灌定额处理灌水量少, 新疆的日照时间长, 蒸发严重, 导致出现较重的表层返盐现象, 不利于来年的春播。

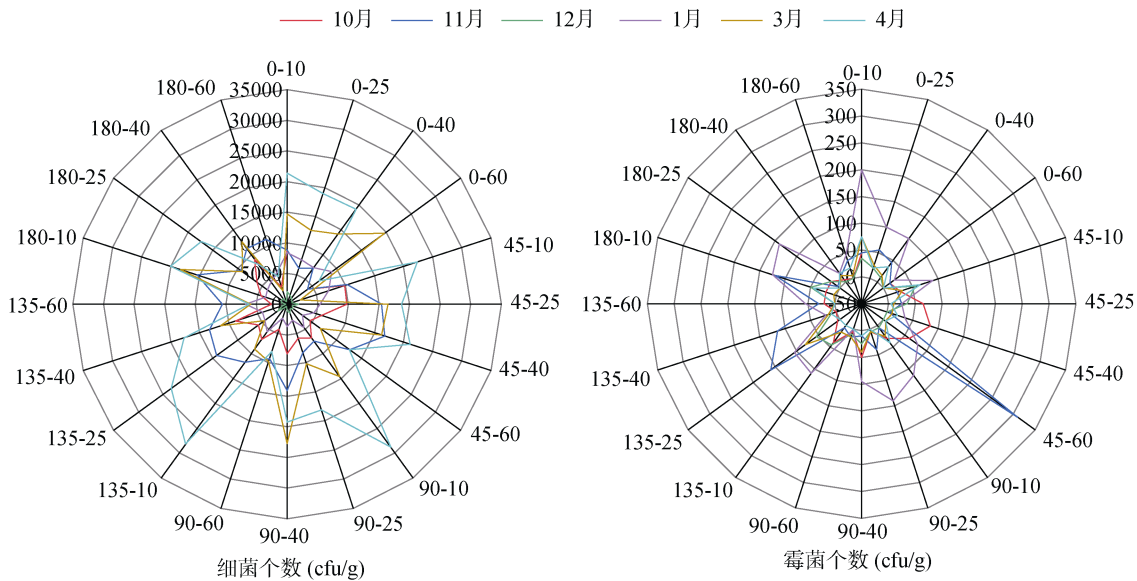
对于土壤 pH, 在整个冻融期间冬灌水量的不同对土壤 pH 的影响不明显, 从等高线图中可以看出, 从冻结初期一直到土壤通融, 各处理土壤 pH 的变化幅度不大(图 5)。

## 2.2 季节性冻融期土壤细菌和霉菌的数量变化特征

土壤复杂的环境条件影响着细菌和霉菌生长,

不同环境因子下细菌和霉菌的数量有着明显的差异。季节性冻融期不同冬灌定额条件下各土层细菌和霉菌的数量如图 6 所示。由图 6 可知,季节性冻融期不同时间各处理的微生物数量明显不同,表现在细菌和霉菌的数量在时间和土层的分布上有着明显的差异。10 月,由于土样为初始土样,每块样田细菌和霉菌的数量变化不明显,差异不大。11 月,由于冬灌水的补给,土壤含水量升高,土壤有了一定的湿度,土壤细菌和霉菌的数量明显增加;土壤细菌的数量最高达约 16 800 cfu/g,霉菌的数量最高达约 350 cfu/g;土壤细菌和霉菌普遍集中在每个处理的 10~25 cm 和 25~40 cm 土层,而土壤霉菌在冬灌定额 45 mm 处理 40~60 cm 土层处出现峰值。在稳定冻结期,12 月土壤细菌和霉菌的数量明显下

降,1 月其数量又有所回升。由于 12 月雪水少,温度达 0℃以下,满足不了微生物的生存要求,大部分微生物死亡,为土壤提供有机质。1 月,新疆降雪增多,积雪覆盖周期长,土壤细菌和霉菌的数量回升,主要集中在 25~40 cm 土层,而 0~10 cm 和 40~60 cm 土层细菌和霉菌的数量增加不明显。融化期,土壤细菌和霉菌的数量变化有着明显的差异,3 月至 4 月,随着时间的推移,温度升高,冻结水融化,土壤细菌和霉菌的数量明显增加,直到土壤完全通融,土壤细菌和霉菌的数量达到峰值;在融化期土壤霉菌相比细菌数量一直下降,说明融化期细菌占主导作用。总体来看,土壤细菌数量在季节冻融期呈现上升-下降-再上升的趋势,土壤霉菌数量呈现下降-上升-再下降的趋势。



(图中外围一圈“-”连线的数字如 0-10 表示“冬灌定额(mm)-土层深度(cm)”)

图 6 冻融期不同冬灌定额处理土壤细菌和霉菌的数量

Fig. 6 Numbers of bacteria and mould under different winter irrigation quotas in freezing-thawing period

### 2.3 土壤细菌和霉菌数量与水、热、盐的关系

微生物的代谢活动与土壤水、热、盐的分布息息相关。冻融期不同阶段土壤细菌和霉菌的数量与土壤水、热、盐的关系特征如图 7 所示。图 7 冗余分析表明,两个维度共同解释了冻融期细菌和霉菌数量变化的 48%。冗余分析中箭头方向相同表示正相关,夹角越小,相关程度越高;箭头方向不同表示负相关,夹角越大,负相关程度越大;夹角为 90°表示无相关性,夹角接近 90°则表示相关性差;投影长度表示相关性大小。整个冻融期, pH 与霉菌数量呈显著正相关,与细菌数量呈显著负相关;含盐量与细菌数量呈显著正相关,与霉菌数量呈显著负相关;灌水量与细菌和

霉菌数量均呈负相关。

土壤细菌和霉菌数量与土壤水、热、盐指标相关性分析结果见表 1。由表 1 可知,季节性冻融期的不同阶段,土壤细菌和霉菌的数量受水、热、盐的制约。冻结初期,10 月(冬灌前),土壤细菌数量与土壤含水量呈显著负相关( $P<0.05$ ),土壤霉菌数量与 pH 呈显著负相关( $P<0.05$ );土壤细菌和霉菌的数量均与土壤含盐量呈显著正相关( $P<0.05$ )。11 月(冬灌后),土壤细菌数量仅与灌水量呈显著正相关( $P<0.05$ ),与其他土壤因素均呈弱的正相关或负相关;土壤霉菌数量与土壤水、热、盐呈弱的正相关或负相关。稳定冻结期,土壤霉菌数量与土壤水、热、盐均呈相对较弱的正相

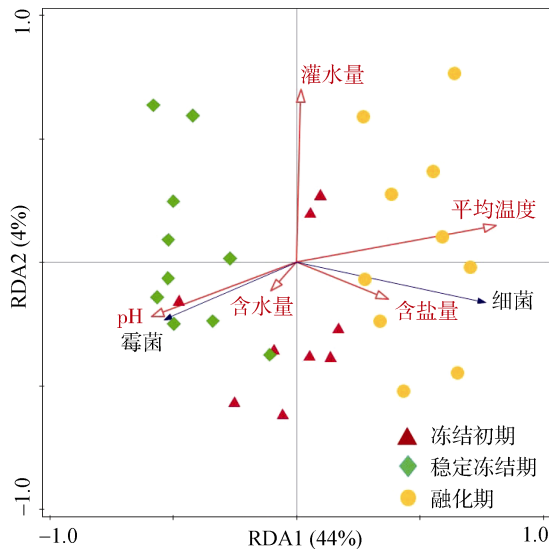


图7 土壤微生物群落结构与土壤环境因子的冗余分析  
Fig. 7 Redundancy analysis (RDA) of relationships between soil microbial community structure and soil environmental factors

表1 土壤细菌和霉菌数量与土壤水、热、盐的相关分析  
Table 1 Simple correlation analysis between numbers of bacteria and mould and soil water, temperature and salt

| 月份  | 种类 | 含水量      | pH      | 平均温度   | 含盐量    | 灌水量      |
|-----|----|----------|---------|--------|--------|----------|
| 10月 | 细菌 | -0.413*  | -0.207  | 0.003  | 0.434* |          |
|     | 霉菌 | -0.049   | -0.482* | 0.073  | 0.429* |          |
| 11月 | 细菌 | 0.259    | 0.302   | 0.237  | 0.092  | -0.386*  |
|     | 霉菌 | -0.088   | 0.082   | 0.229  | -0.181 | -0.10    |
| 12月 | 细菌 | -0.254   | -0.173  | 0.478* | -0.072 | -0.385*  |
|     | 霉菌 | 0.108    | 0.038   | 0.166  | 0.295  | 0.054    |
| 1月  | 细菌 | -0.419*  | -0.210  | -0.180 | -0.145 | -0.550** |
|     | 霉菌 | 0.232    | 0.060   | 0.063  | -0.152 | -0.091   |
| 3月  | 细菌 | -0.089   | -0.272  | -0.131 | 0.094  | -0.315   |
|     | 霉菌 | 0.193    | -0.193  | 0.104  | 0.192  | -0.202   |
| 4月  | 细菌 | -0.767** | 0.367   | 0.076  | -0.295 | -0.159   |
|     | 霉菌 | -0.571** | 0.128   | 0.480* | -0.094 | -0.281   |

注：\*\*为在  $P < 0.01$  水平极显著相关；\*为在  $P < 0.05$  水平显著相关。

关或负相关；而12月土壤细菌数量与土壤平均温度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )，与灌水量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )；次年1月，土壤细菌数量与土壤含水量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )，与灌水量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。融化期，土壤水、热、盐与土壤细菌和霉菌数量相关性变强且显著。3月，土壤经历冻融交替循环，土壤水、热、盐与土壤细菌和霉菌数量呈弱的正相关或负相关；而4月，土壤通融，土壤含水量与土壤细菌和霉菌数量呈极显著的负相关 ( $P < 0.01$ )，土壤平均温度与土壤霉菌数量呈显著的正相关 ( $P < 0.05$ )。

总体来看，对照处理土壤细菌和霉菌的数量主要

受土壤含盐量的影响；冬灌水后，稳定冻结期土壤细菌和霉菌的数量主要受土壤含水量与温度的影响；融化初期至土壤通融，土壤细菌和霉菌的数量主要受土壤含水量的影响。冻结初期和稳定冻结期，冬灌水量对土壤细菌的数量产生了影响，对土壤霉菌的数量影响较弱；融化期，冬灌水量对土壤细菌和霉菌的数量没有影响。

### 3 讨论

#### 3.1 季节性冻融作用下土壤细菌和霉菌数量的差异

季节性冻融作用通过改变土壤物理性质直接影响土壤微生物的活性，冻融作用下不同时期土壤细菌和霉菌数量有明显的差距<sup>[19]</sup>。本试验研究表明，稳定冻结期，温度急剧下降，土壤水分冻结，相比冻结初期土壤细菌和霉菌的数量明显下降，12月土壤细菌和霉菌的数量最少；但是自1月起，随着积雪覆盖的周期增长，细菌和霉菌利用土壤中死亡微生物的残骸提供的有机质生长，其数量有所增加。至土壤融化期，由于表层积雪的融化，温度的升高，腐烂的凋落物质和土壤中的有机质使得土壤细菌和霉菌的数量明显增加，直至增加到峰值，这与章高森<sup>[20]</sup>的研究结论相一致，且随着土壤细菌数量的增加，土壤霉菌的数量明显下降，这对冬小麦的返青有着很大的益处。

#### 3.2 季节性冻融作用下土壤细菌和霉菌数量与土壤水、热、盐的关系

土壤中微生物的生存离不开适宜的水分、温度及营养物质等<sup>[6]</sup>。季节性冻融期间土壤温度、含水量、pH、含盐量等一系列因子的改变对土壤微生物数量的分布产生影响<sup>[21]</sup>。张成芳等<sup>[22]</sup>研究表明，在一定程度上，土壤微生物数量与土壤温度呈正相关；在温度较低的环境里，土壤微生物吸收营养物质的能力减弱，数量下降<sup>[23]</sup>。但是也有研究表明，随着温度的升高，0~30 cm 土层细菌数量一直减少，其中表层的变化最为明显。本试验中，整个季节性冻融期土壤细菌数量的变化较为明显，而土壤霉菌在稳定冻结期和融化期其数量变化较明显，与Zhou等<sup>[24]</sup>的研究结论一致。

土壤含水量的变化对土壤不同微生物的影响也不同<sup>[25]</sup>。有研究发现，土壤细菌吸收营养物质和代谢活动主要靠土壤水膜的运动<sup>[26]</sup>；土壤回湿后，土壤细菌的数量随着时间的变化明显增加<sup>[27]</sup>。本试验中，在11月冬灌后土壤细菌的数量相比灌前明显增加，与上述研究结论一致。融化期，土壤表层的冰雪

融化和下层冻结水的排放,提高了土壤的含水量,有利于土壤微生物的代谢活动和对营养物质的获取,促进其再生长,数量增加<sup>[28]</sup>。本试验中,在通融期土壤细菌的数量明显增加,但是土壤霉菌数量却正好相反,可能由于新疆日照时间长,土壤温度明显升高,霉菌在微生物种群中属于弱势,吸收土壤有机质的能力相比其他微生物较弱,导致其数量下降。

土壤 pH 对不同微生物的影响不同,土壤细菌适合生存在碱性条件下<sup>[13]</sup>,而土壤霉菌适合生存在酸性条件下,本试验的样田土壤偏碱性,土壤霉菌的数量明显较少。有研究认为,在干旱地区土壤细菌与土壤 pH 无显著关系性<sup>[17]</sup>。从表 1 的分析可以看出,本试验中整个冻融期间土壤 pH 与土壤中细菌、霉菌的数量均无显著相关性,与上述研究结论一致。但是从不同学者的研究结果看,土壤 pH 对土壤微生物数量的影响结论尚不明确。

土壤含盐量直接对土壤微生物的活性产生影响,土壤含盐量的升高会导致土壤微生物多样性的减少<sup>[29]</sup>。本试验中,融化期,日照时间长,蒸发量大,盐分表聚,0~10 cm 土层土壤微生物数量相对减少;冻结初期,土壤含盐量与土壤细菌和霉菌的数量呈显著正相关( $P<0.05$ );而稳定冻结期和融化期土壤含盐量与土壤细菌和霉菌的数量无显著相关性( $P>0.05$ )。

#### 4 结论

1) 试验区在季节性冻融期,冬灌水量对土壤 pH 的影响不明显,但是对土壤温度、水分和盐分影响较明显:稳定冻结期土壤最高温度从 25~40 cm 土层变为 10~25 cm 土层;不同处理的土壤含水量在稳定冻结期变化不明显,在融化期土壤含水量明显上升;90 mm 和 135 mm 灌水量下土壤在深层产生积盐,耕作层的含盐量相对较低。

2) 冻结初期,土壤细菌和霉菌的数量增加;稳定冻结期土壤细菌和霉菌的数量减少,但随着降雪量的增加,土壤细菌和霉菌的数量再次增加;融化期,土壤细菌的数量增加到峰值,而土壤霉菌的数量明显下降。季节性冻融期,土壤细菌相比霉菌占主导作用,降雪的增多使冬灌定额对土壤细菌和霉菌的数量没有起到最大作用。

3) 整个冻融期,对照处理土壤细菌和霉菌主要受土壤含盐量的影响;冬灌水后,稳定冻结期土壤细菌和霉菌的数量主要受土壤含水量与温度的影响;融化初期至土壤通融,则主要受土壤含水量的影响。

#### 参考文献:

- [1] 郭志强, 彭道黎, 徐明, 等. 季节性冻融土壤水热耦合运移模拟[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 816–823.
- [2] Chou Y L, Wang L J. Seasonal freezing-thawing process and hydrothermal characteristics of soil on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(11): 3082–3098.
- [3] 韩露, 万忠梅, 孙赫阳. 冻融作用对土壤物理、化学和生物学性质影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 736–742.
- [4] 李晶, 何志斌, 杜军, 等. 冬灌对冻融期干旱区荒漠绿洲农田土壤水热状况的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 105–112.
- [5] 付强, 侯仁杰, 李天霄, 等. 冻融土壤水热迁移与作用机理研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 99–110.
- [6] 田路路, 隗英华, 孙文涛. 冻融作用对土壤微生物的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 438–443.
- [7] 李凤霞. 盐碱地土壤微生物多样性特征研究[M]. 银川: 阳光出版社, 2015.
- [8] 李王成, 冯绍元, 康绍忠, 等. 石羊河中游荒漠绿洲区土壤水分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 138–143, 157.
- [9] 马晓飞, 楚新正, 马倩. 艾比湖地区冻融作用对梭梭群落土壤酶活性及微生物数量的影响[J]. 干旱区地理, 2015, 38(6): 1190–1201.
- [10] Sulkava P, Huhta V. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralisation in boreal forest soil[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 225–239.
- [11] 夏北成. 环境污染生物降解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 179–187.
- [12] 黎雪, 张坐省, 党占平, 等. 干旱对土壤微生物的影响及其与碳动态的关系[J]. 山西农业科学, 2018, 46(3): 402–406.
- [13] 赵林艳, 官会林, 王克书, 等. 土壤含水量对三七连作土壤微生物群落的影响[J]. 生物技术通报, 2022, 38(7): 215–223.
- [14] Högborg M N, Högborg P, Myrold D D. Is microbial community composition in boreal forest soils determined by pH, C-to-N ratio, the trees, or all three?[J]. Oecologia, 2007, 150(4): 590–601.
- [15] Chen D M, Mi J, Chu P F, et al. Patterns and drivers of soil microbial communities along a precipitation gradient on the Mongolian Plateau[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1669–1682.
- [16] Chu H Y, Fierer N, Lauber C L, et al. Soil bacterial diversity in the Arctic is not fundamentally different from that found in other biomes[J]. Environmental Microbiology, 2010, 12(11): 2998–3006.
- [17] Maestre F T, Delgado-Baquerizo M, Jeffries T C, et al. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(51): 15684–15689.



- [18] 秦璐, 吕光辉, 何学敏. 艾比湖地区冻融作用对土壤微生物数量和群落结构的影响[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1590–1599.
- [19] 沈萍, 陈向东. 微生物学实验[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [20] 章高森. 青藏高原多年冻土区微生物多样性及其潜在应用的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [21] 王洋, 刘景双, 王国平, 等. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 91–96.
- [22] 张成芳, 李德生, 魏佳宇, 等. 3种城郊防护林土壤呼吸与温湿度的关系[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 243–249.
- [23] Blume E, Bischoff M, Reichert J M, et al. Surface and subsurface microbial biomass, community structure and metabolic activity as a function of soil depth and season[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 20(3): 171–181.
- [24] Zhou Y, Clark M, Su J Q, et al. Litter decomposition and soil microbial community composition in three Korean pine (*Pinus koraiensis*) forests along an altitudinal gradient[J]. Plant and Soil, 2015, 386(1): 171–183.
- [25] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: Results from a meta-analysis[J]. Ecology, 2012, 93(4): 930–938.
- [26] Evans S E, Wallenstein M D. Soil microbial community response to drying and rewetting stress: Does historical precipitation regime matter?[J]. Biogeochemistry, 2012, 109(1): 101–116.
- [27] Iovieno P, Bååth E. Effect of drying and rewetting on bacterial growth rates in soil[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, 65(3): 400–407.
- [28] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放动态[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 7–12.
- [29] 张丹丹, 郑向群, 李厚禹, 等. 含盐农村生活污水灌溉对土壤微生物的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(8): 1873–1884.