

多年冻土区活动层土壤粒度垂向分异的冻融驱动机制：研究进展与展望

邢颖

哈尔滨师范大学地理科学学院，黑龙江 哈尔滨

收稿日期：2026年2月6日；录用日期：2026年3月3日；发布日期：2026年3月13日

摘要

冻融循环是塑造多年冻土区地表过程的核心物理营力，活动层土壤粒度垂向分异直接决定寒区土壤水热与力学特性，深刻影响区域水文过程、生态系统稳定性及工程基础设施安全。针对当前冻融驱动土壤粒度垂向分异的研究成果分散、缺乏多尺度多过程系统整合框架的问题，本文系统梳理了国内外相关野外观测、室内模拟的研究进展，厘清了该过程的典型现象、分异模式、核心驱动机制与关键控制因素。当前学界已形成一些核心共识，但在微观机制主导性权重、微观界面过程定量描述、多过程耦合模型构建、长期演化规律预测等方面仍存在显著争议与认知瓶颈。本文构建了冻融驱动粒度垂向分异的多尺度多过程整合分析框架，阐述了未来研究需突破的核心难题，以期为寒区冻土退化风险评估、生态环境保护及工程安全维护提供理论支撑。

关键词

冻融循环，土壤粒度，垂向分异，迁移机制，多年冻土区

Freeze-Thaw Driving Mechanism of Vertical Differentiation of Soil Particle Size in the Active Layer of Permafrost Regions: Research Progress and Prospects

Ying Xing

College of Geographic Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: February 6, 2026; accepted: March 3, 2026; published: March 13, 2026

Abstract

Freeze-thaw cycle is the core physical agent that shapes surface processes in permafrost regions. The vertical differentiation of soil particle size in the active layer directly determines the hydrothermal and mechanical properties of soil in cold regions, and exerts a profound impact on regional hydrological processes, ecosystem stability, and the safety of engineering infrastructure. Aiming at the current problems that the research results on freeze-thaw-driven vertical differentiation of soil particle size are scattered and lack a systematic multi-scale and multi-process integrated framework, this paper systematically reviews the research progress of relevant field observations and laboratory simulations at home and abroad, and clarifies the typical phenomena, differentiation patterns, core driving mechanisms and key controlling factors of this process. At present, the academic community has reached some core consensuses, but there are still prominent controversies and cognitive bottlenecks in aspects including the dominance weight of microscopic mechanisms, quantitative description of microscopic interface processes, construction of multi-process coupling models, and prediction of long-term evolution laws. This paper constructs a multi-scale and multi-process integrated analytical framework for freeze-thaw-driven vertical differentiation of soil particle size, and elaborates the core scientific problems to be broken through in future research, so as to provide theoretical support for risk assessment of permafrost degradation, ecological environment protection, and engineering safety maintenance in cold regions.

Keywords

Freeze-Thaw Cycle, Soil Particle Size, Vertical Differentiation, Migration Mechanism, Permafrost Region

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与科学意义

多年冻土是全球冰冻圈系统的核心组成部分，在我国青藏高原、东北大小兴安岭等区域广泛分布。多年冻土的分布特征受气候条件在三度空间的变化所制约，在气候变暖与人类工程活动加剧的双重背景下，全球多年冻土除了周期性冻融循环外，总体呈退化趋势[1]。研究显示多年冻土的升温和融化将持续响应气候变化并可能加速[2]，而近三十年来多年冻土区活动层厚度确实积极响应气候变暖，随气温升高而增加[3]，虽然区域差异明显，但是也引发了一系列生态环境与工程安全问题。多年冻土区的活动层作为每年发生季节冻结与融化的土层，是冻土系统中物质运移、能量交换最活跃的核心区域。多年冻土的存在放大了气候的水热特性，也使植被对多年冻土区环境变化的响应更为敏感[4]。土壤粒度组成作为寒区土壤最核心的物理属性之一，它直接决定了土壤的孔隙结构、比表面积与孔隙连通性，进而从多维度调控冻土系统的演化过程。

在多年冻土区，冻融循环是塑造近地表土壤环境最基本、最频繁的物理营力。大量研究证实，冻融循环是驱动土壤颗粒发生选择性迁移、在垂向剖面上形成分异的核心动力，而粒度分异形成的剖面结构又会反向调控冻融过程的水热输运特征，形成动态反馈循环。经过冻融循环后，由机械作用所致土壤结构发生了显著变化[5]。土壤冻融作用的交替收缩与膨胀可改变团聚体的结构与组成，影响土壤结构和水

分分布特征[6],冻融交替还通过改变土壤的理化性质影响氮素在土壤中的迁移与转化,进而影响陆地生态系统氮循环[7]。冻融过程及其格局变化可能对草地生态系统服务功能发挥及高寒区生态环境产生不容忽视的重要作用[8]。虽然季节性冻融循环最初仅限于沙层,但解冻锋面现已抵达不稳定的富含冰的淤泥层,由此看来永久冻土退化对道路堤岸下沉也有一定的影响[9]。因此,需要厘清冻融循环驱动活动层土壤粒度垂向分异的机制,进一步揭示冻土结构演化规律,预测冻土退化响应,为防控寒区生态与工程风险提供科学基础。

1.2. 研究现状与综述必要性

自20世纪60年代起,国内外学者就已关注到寒区冻融过程中土壤颗粒的迁移与分选现象,历经数十年发展,相关研究已从早期的剖面现象描述,逐步发展到室内模拟的机制解析、多场耦合模型的构建与预测阶段。已有研究总结了土壤-植被-水文耦合过程的空间升尺度方法和建模方法以及不同尺度上典型的耦合过程与机制[10]。目前针对冻融循环与土壤粒度分异的关联研究已取得丰富成果,但针对冻融循环如何驱动颗粒在垂向剖面上发生系统性迁移与分异这一核心科学问题,现有研究仍呈现显著的分散化特征,尚未形成统一的理论体系:一是研究对象单一化,缺乏对多过程耦合作用的系统分析;二是研究尺度脱节,微观机制与宏观现象之间的尺度转换关系不清晰;三是研究成果区域化,现有案例多集中在青藏高原、东北冻土区、北极苔原等典型区域,缺乏跨区域的共性机制提炼与分异特征对比;四是理论体系不完善,现有研究尚未构建能够整合多尺度观测、耦合多物理过程、区分不同环境下主导机制演变的综合性理论框架。本文旨在对分散的研究进展进行系统汇总整合、明晰当前共识、厘清关键争议,为深入理解冻融区地表过程、评估冻土退化生态与工程风险提供基础。

2. 冻融作用下土壤粒度垂向分异的典型现象与分异模式

2.1. 典型分异现象

1) 活动层底部细粒物质富集。在全球多年冻土区,均观测到粘粒、粉粒等细颗粒在活动层底部与多年冻土上限交界处的相对富集现象。

2) 表层土壤粗化与粗化层发育。在反复的冻融沉降与水分选择性迁移作用下,粘粒、粉粒等细颗粒被持续从表层土壤中迁出,而砾石、砂粒等抗搬运能力更强的粗颗粒在表层相对残留,形成粗化层。该现象在青藏高原冻融过程存在单向融化,双向冻结特征区域[11],以及东北大兴安岭西麓的多年冻土区尤为显著。

3) 剖面内多层细粒夹层发育。在水热条件复杂、冻结过程不稳定的活动层剖面中,常出现多层级的细粒夹层结构,这类夹层多为粉粒-粘粒富集层,与砂质土层交替分布,形成分层结构。

2.2. 主流分异模式

综合全球多年冻土区的野外观测与室内模拟结果,可将冻融驱动的土壤粒度垂向分异归纳为3种主流模式。

1) 表层粗化-中层均质-底部细化模式。其剖面特征为:表层土壤因细颗粒垂向迁出与风蚀协同作用发生粗化;中部土层受自上而下与自下而上的双向冻融作用,土体被充分扰动混合,颗粒级配相对均质;底部在多年冻土上限附近形成稳定的细粒富集层。

2) 多层细粒夹层模式。其核心特征是剖面内发育多层韵律式分布的细粒夹层,分异结构的复杂程度与冻融循环的波动幅度直接相关。

3) 整体均质化模式。当表层土壤经历高频次冻融交替时,土体受到强烈的扰动与混合冻融沉降产生的剪切作用打破了原始的沉积层理与颗粒分选特征,使整个活动层剖面的颗粒级配趋向均质。

3. 分异过程的关键控制因素与实验证据

1) 实验证据：一是长期野外定位观测，作为验证冻融循环驱动粒度分异的核心依据。青藏高原冻土定位观测站的连续监测数据证实了冻融循环驱动下表层粗化、底部细化的分异过程；以及建立基于移动平均模型和年变化的 InSAR 多年冻土监测方法确定硬化地表改变了多年冻土对气候的反馈机制[12]。在东北大兴安岭多年冻土区的连续观测也得到了一致结论，且发现分异速率与活动层冻融循环次数、年最大冻结深度呈显著正相关，为冻融循环的驱动作用提供了多尺度的佐证。二是室内模拟实验证据，室内冻融模拟实验通过控制单一变量，利用土壤结构分形特征有效指示其水力性质[13]，揭示了各因素对分异过程的影响机制。目前，冻融研究以室内模拟为主，与野外实际冻融过程差异较大。因此，后续机理研究应通过室内模拟与野外实测相结合[14]。

2) 关键控制因素：综合现有研究成果，可将冻融驱动粒度垂向分异的关键控制因素归纳为三大类，共同决定了分异过程的强度、速率与最终模式。一是能量因素，温度梯度的强度与方向直接决定了冻结速率、未冻水迁移的驱动力大小与方向，进而控制颗粒运移的通量与路径。不同冷端温度作用对水汽迁移变化和冻胀变形有显著影响[15]。同时，冷端冻结温度的数值对非饱和土柱的顶部位移也存在影响[16]。二是物质因素，初始土壤质地决定了颗粒的可运移性，研究证明，土壤饱和导水率存在垂向变异性[17]，而含水量则决定了颗粒运移的介质丰度。三是边界与环境因素。上覆压力会抑制冻胀变形与孔隙发育，削弱水分迁移与颗粒运移的通道，从而降低分异强度；植被覆盖通过调控地表温度、土壤含水量与侵蚀强度，间接影响冻融分异过程；地形坡度则会改变土壤水分的侧向运移，对垂向分异过程产生叠加影响。

4. 冻融驱动粒度垂向分异的核心机制与整合分析框架

冻融驱动的土壤粒度垂向分异，并非单一机制作用的结果，而是多物理过程、多驱动机制在不同时空尺度下耦合作用的产物。

4.1. 核心驱动机制

1) 未冻水迁移的颗粒携带机制。水分迁移是颗粒运移最直接的载体。由于土壤孔隙间冰晶膨胀，推动土壤颗粒运移，导致土壤孔隙度增加，容重随之降低[18]。冻结过程中，冻结锋面附近存在持续的温度梯度与水势梯度，土壤孔隙中的未冻水会在水势差驱动下，沿颗粒表面的未冻水膜向冻结锋面定向迁移，粘粒、粉粒等细颗粒会悬浮于未冻水中，随水分同步发生运移，最终在冻结锋面处被截留、富集。

2) 冻胀 - 融沉的土体扰动与筛分机制。冻胀融沉产生的力学扰动，为颗粒运移创造了孔隙通道与空间条件，同时通过力学筛分作用加剧了颗粒的垂向分异[19]。

3) 冰晶生长的颗粒筛选机制。冰晶体本身的生长行为，直接参与了土壤颗粒的物理分选，是冻融过程中颗粒垂向分异的重要机制。

4.2. 多尺度多过程整合分析框架

基于上述典型现象、控制因素与核心机制，可以构建出冻融驱动多年冻土区活动层土壤粒度垂向分异的多尺度多过程整合分析框架。

该框架的核心逻辑为：微观界面过程是分异的内在基础，介观孔隙过程是分异的传输纽带，宏观剖面演化是分异的最终表现，三个尺度通过水 - 热 - 力 - 颗粒迁移的耦合过程实现关联，不同冻融阶段、不同环境条件下，各机制的主导性发生动态演替。在微观界面尺度，核心过程是颗粒 - 冰 - 水三相界面的相互作用，该尺度决定了颗粒运移的内在潜力，是整个分异过程的物理基础；在介观孔隙尺度，核心过程是孔隙内的水分迁移、颗粒悬浮运移、冻胀融沉引发的孔隙结构演变，该尺度是微观界面效应向宏

观现象传递的核心纽带；在宏观剖面尺度，核心过程是多机制耦合作用下的颗粒垂向分异与剖面结构演化，是微观与介观过程长期累积的最终表现。在一次完整的冻融循环中，不同阶段的主导机制存在显著的动态演替。不同环境条件下，三类机制会发生竞争或协同作用，最终形成不同的分异模式。

5. 研究共识与核心争议

5.1. 研究共识

1) 冻融循环是驱动多年冻土区土壤粒度垂向分异的关键营力。周期性冻融循环能显著改变土壤颗粒的原始排列，驱动土壤颗粒发生定向垂向迁移与重新分布，这一过程是寒区地表过程的重要组成部分。

2) 未冻水迁移是颗粒运移的核心载体。无论何种具体机制，土壤颗粒的定向运移都必须以液态水为介质，未冻水的流动是细颗粒得以悬浮、携带并发生定向迁移的根本前提。

3) 温度梯度与初始水分条件是主要外部控制因素。温度梯度的强度与方向影响着水分与颗粒迁移，土壤初始饱和度决定了可用于迁移的水分介质丰度，两者共同控制了粒度分异过程的强度、速率与最终模式。

5.2. 核心学术争议

在核心共识之外，当前学界在分异过程的微观机理、多过程耦合、长期演化等深层问题上，仍存在显著的学术争议。一是不同微观机制的主导性权重，比如一些不同机制在分异过程中的贡献权重、竞争与协同关系，仍缺乏清晰的定量界定。二是微观界面过程的定量描述，微观力如何参数化并整合到宏观连续介质模型中，是目前理论建模的瓶颈之一。三是长期演化与终极状态的预测。冻融循环驱动的粒度分异是一个持续演化的过程，当前的研究多关注短期或有限次数的循环效应。长期来看这种模式如何随气候变化而变化的研究不足。四是生物与非生物过程的相互作用。冻土区的植物根系、微生物活动会显著改变土壤结构和胶结状况。不同植被类型土壤碳、氮含量也对冻融作用的响应存在一定的差异[20]，这些生物过程如何与物理的冻融分异过程相互作用，二者的相对重要性等，对于这方面的研究刚刚起步。

6. 结论与展望

6.1. 结论

本文系统梳理了多年冻土区活动层土壤粒度垂向分异的冻融驱动机制相关研究进展，主要结论如下：

1) 冻融循环驱动的活动层土壤粒度垂向分异，是多年冻土区普遍存在的地表过程，主要表现为活动层底部细粒富集、表层土壤粗化、剖面内多层细粒夹层发育三类典型现象，可归纳为表层粗化 - 中层均质 - 底部细化、多层细粒夹层、整体均质化三种主流分异模式。

2) 粒度分异过程的核心控制因素可分为能量驱动因素、物质基础因素、边界与环境因素三大类，其中温度梯度与初始含水量是决定分异强度与模式的核心外部因子。

3) 未冻水迁移的颗粒携带机制、冻胀 - 融沉的土体扰动与筛分机制、冰晶生长的颗粒筛选机制，是驱动粒度垂向分异的三项核心机制，分异过程是多机制在不同环境条件下耦合或竞争的产物，不同冻融阶段各机制的主导性存在动态演替。

4) 当前学界已形成冻融循环是核心营力、未冻水迁移是核心载体等核心共识，但在微观机制主导性权重、微观过程定量描述与尺度转换、长期演化规律、生物 - 非生物过程相互作用等方面仍存在显著争议，诸多关键科学问题亟待突破。

6.2. 未来研究展望

为深化对冻融驱动粒度分异过程的理解，提升其定量预测能力，未来研究应重点围绕以下四个方向

开展突破：第一，强化微观界面过程的定量观测与解析，突破微观机理量化的瓶颈。第二，构建多机制耦合的定量预测模型。厘清不同机制的竞争与协同关系，建立不同环境条件下主导机制的定量判据，实现分异过程的定量预测。第三，开展长期演化规律的野外观测与模拟研究。依托多年冻土区长期定位观测站野外观测，研究分异过程的长期演化规律与稳定状态，明确气候变化背景下分异过程的演化趋势。第四，结合寒区生态保护与工程建设需求，量化粒度分异对区域水文过程、生态系统稳定性、工程基础设施安全的影响，建立基于粒度分异的冻土退化风险、工程病害风险评估方法，为寒区生态环境保护与工程安全维护提供科学支撑。

参考文献

- [1] 邱国庆, 程国栋. 中国的多年冻土——过去与现在[J]. 第四纪研究, 1995(1): 13-22, 97.
- [2] Smith, S.L., O'Neill, H.B., Isaksen, K., Noetzli, J. and Romanovsky, V.E. (2022) The Changing Thermal State of Permafrost. *Nature Reviews Earth & Environment*, **3**, 10-23. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00240-1>
- [3] 罗栋梁, 金会军, 吴青柏, 等. 天然状态下多年冻土区活动层厚度研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2023, 45(2): 558-574.
- [4] 刘锐, 臧淑英, 赵林, 等. 30 kaBP 以来大兴安岭漠河盆地多年冻土区气候与环境变化[J]. 地理学报, 2024, 79(9): 2280-2296.
- [5] Zhang, Z., Ma, W., Feng, W., Xiao, D. and Hou, X. (2016) Reconstruction of Soil Particle Composition during Freeze-Thaw Cycling: A Review. *Pedosphere*, **26**, 167-179. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(15\)60033-9](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(15)60033-9)
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 杜子银. 冻融作用对高寒草地土壤理化和生物学性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 1054-1061.
- [9] Fortier, R., LeBlanc, A. and Yu, W. (2011) Impacts of Permafrost Degradation on a Road Embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, **48**, 720-740. <https://doi.org/10.1139/t10-101>
- [10] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105-2138.
- [11] 李子康, 姚济敏, 陈杰, 等. 青藏高原唐古拉多年冻土区地表——活动层水热过程观测与数值模拟[J/OL]. 冰川冻土: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/62.1072.P.20260130.1003.004>, 2026-02-24.
- [12] 于雯燕, 蒋弥, 程晓. 时序 InSAR 形变推断俄罗斯新乌连戈伊区域多年冻土冻融变化[J]. 地球物理学报, 2025, 68(12): 4560-4572.
- [13] 戴磊, 王贵玲, 何雨江. 基于分形理论研究土壤结构及其水分特征关系[J]. 地球科学, 2021, 46(9): 3410-3420.
- [14] 孙宝洋, 李占斌, 肖俊波, 等. 冻融作用对土壤理化性质及风水蚀影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(1): 337-347.
- [15] 李成艳, 张玉芝, 蒋薇, 等. 冻结过程中非饱和粗粒土水汽迁移及变形演化数值模拟研究[J]. 冰川冻土, 2024, 46(2): 592-601.
- [16] 刘恩龙, 尹霄, 张冲, 等. 冻融作用下非饱和土热水力耦合数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 953-960.
- [17] 刘星廷, 乔江波, 杨涛, 等. 毛乌素沙地不同土地利用方式下土壤饱和和导水率垂向分布特征[J]. 地球环境学报, 2024, 15(4): 665-674.
- [18] 王洋, 刘景双, 王全英. 冻融作用对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1269-1274.
- [19] 王自力, 李金峰, 滕继东, 等. 基于未冻水膜压力判据的冻土水热力耦合冻胀模型研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 997-1007.
- [20] 鲁博权, 臧淑英, 孙丽. 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.