网络出版时间:2026-05-11 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.11.016

冻融条件下坡面水沙过程与速效氮磷流失的时滞效应

成玉婷[1],王子阳[1],张祎[1],郝书豪[2],李鹏[2],徐国策[2],党小虎[1]
(1 西安科技大学 地质与环境学院,陕西 西安 710054;2 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

[摘 要] 【目的】研究冻融条件下坡面水沙过程和速效氮磷流失规律,以揭示两者之间的时滞效应,为坡面水-土-养分流失防治提供重要的参考依据。【方法】通过室内模拟降雨和冻融试验,分析不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融(FTS)坡面径流和泥沙中速效氮(AN)和速效磷(AP)的迁移规律及流失途径,阐明冻融作用下坡面水沙过程与速效氮磷流失的时滞效应。【结果】冻融作用明显延长了坡面达到稳定入渗所需的时间,影响了坡面产流产沙过程。当初始含水量为30%时,冻融坡面总产流量最大,但是总产沙量相对较小。两种处理坡面下AN和AP随径流和泥沙的流失比例在不同初始含水量下具有明显差异,但是主要流失途径均以径流为主。未冻融坡面AN流失与产流量保持同步;而在冻融坡面,当初始含水量为10%时,AN流失与产流过程存在45 min的滞后;当初始含水量为30%时,滞后时间缩短至30 min。【结论】冻融作用改变了坡面速效氮磷迁移与产流过程的时滞效应,对速效磷流失与产沙过程的响应影响不显著。

[关键词] 坡面水沙过程;有效氮;有效磷;冻融作用;时滞效应;黄土高原
[中图分类号] S157 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)11-0170-11

Time-lag effect of runoff-sediment process and available nitrogen and phosphorus loss under freeze-thaw conditions

CHENG Yuting[1], WANG Ziyang[1], ZHANG Yi[1], HAO Shuhao[2],
LI Peng[2], XU Guoce[2], DANG Xiaohu[1]
(1 *College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shannxi* 710054, *China*;
2 *School of Water Resources and hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi* 710048, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to investigate the slope runoff-sediment processes and the patterns of available nitrogen (AN) and phosphorus (AP) loss under freeze-thaw conditions, in order to reveal the time-lag effect between them, and to provide an important reference for soil and water conservation and prevention of nutrient loss during the freeze-thaw period on the Loess Plateau. 【Method】 Indoor simulated rainfall and freeze-thaw experiments were conducted to analyze the migration patterns and loss pathways of AN and AP in runoff and sediment under different initial water content conditions for two slope treatments: unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS). And the time-lag effect between slope runoff-sediment processes and available nitrogen-phosphorus loss under freeze-thaw was clarified. 【Result】 Freeze-thaw significantly prolonged the time required for the slope to reach stable infiltration and affected the slope runoff and sediment yield processes. When the water content was 30%, the total runoff of FTS slope was the highest, but the total sedi-

[收稿日期] 2025-09-05 [修回日期] 2025-10-29
[基金项目] 国家自然科学基金项目(42167007)
[作者简介] 成玉婷(1987—),女,陕西渭南人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事水土保持和生态修复研究。E-mail:chengyutingstar@163.com

ment yield was relatively low. Under different water content conditions, significant difference was observed in the ratios of AN and AP lost via runoff and sediment in LS and FTS treatments, with the runoff being the main loss pathway in both cases. Freeze-thaw altered the time-lag effect between available nitrogen migration and runoff processes on slopes. AN loss in LS slope occurred synchronically with runoff, while in FTS slope, there was a 45-minute lag between AN loss and runoff processes under the water content condition of 10%. And the lag time was shortened to 30 minutes under the water content condition of 30%.【Conclusion】Freeze-thaw altered the time-lag effect between the migration of available nitrogen and phosphorus on slopes and the runoff generation process, but showed no significant effect on that between available phosphorus loss and the sediment yield process.

Key words: slope runoff-sediment process; available nitrogen; available phosphorus; freeze-thaw action; time-lag effect; Loess Plateau

季节性冻融是全球中高纬度和高海拔地区及部分温带地区普遍存在的现象,我国受冻融作用影响的地区面积占全国国土面积的54%,主要分布在黄土高原地区和东北黑土地区[1]。土壤在寒冷气候条件下发生周期性冻结与融化[2],显著改变了土壤渗透能力、结构稳定性和生物化学过程[3],从而影响土壤的抗蚀能力和养分固持能力,加速沟道侵蚀的发展,改变区域土壤侵蚀和养分流失格局[2-3],未来气候变化会显著增加土壤侵蚀并加速沉积物沉积和养分释放,而冻融作用在这个过程中扮演着至关重要的角色[4]。氮磷是土壤养分的重要成分,也是植物生长发育所需的营养元素,在生态系统和农业方面有着非常重要的地位[5]。冻融通过破坏土壤团聚体结构,影响了土壤孔隙度和黏聚力等物理性质,使土壤水分运移路径、微生物群落结构和功能发生改变,加速了不同形态氮素和磷素的释放与转化,导致有效氮磷等养分随径流、土壤水分和热量运动而迁移,直接影响土壤有效养分的供给和氮磷循环过程,对土壤生态系统及农业发展产生深远的影响[6]。季节性冻融引起的土壤环境变化影响了坡面水沙过程与氮磷迁移的响应过程,受到了国内外学者的广泛关注[7-9]。然而目前关于冻融坡面土壤养分的研究大多集中在东北地区,对黄土高原地区水土流失与养分迁移的关系认识还不够深入,黄土高原不仅是我国水土流失最严重的地区之一,也是典型的中度季节性冻融区,研究冻融作用下坡面水-土-养分流失问题,对黄土高原水土保持和生态修复具有重要意义[10-12]。冻融条件下,受土壤冻结层阻隔、融雪入渗滞后性等因素的影响,径流-泥沙峰值与速效氮磷流失峰值存在时间错位,具有一定的时滞效应,但是现有的研究对水沙过程和氮磷流失在时间上的同步性研究较少,尤其是冻融作用下,土壤侵蚀过程和氮磷流失过程的时滞效应尚缺乏定量解析。

因此,本研究以黄土为对象,通过室内冻融和模拟降雨试验,观测不同土壤初始含水量条件下坡面产流、产沙特征以及速效氮、速效磷的流失规律,识别降雨过程中径流、泥沙和氮磷流失之间的突变时间,分析水沙过程与速效氮和速效磷流失的时滞效应,并剖析其原因,旨在量化冻融条件下坡面水沙和氮磷流失在时间上的响应机制,阐明冻融作用下坡面水沙过程与速效氮和速效磷流失的时滞效应,为防治冻融期坡面土壤养分流失以及精准预测非点源污染提供参考。

1　材料与方法

1.1　材 料

供试土壤为西安郊区的黄土,土壤质地属于粉(砂)壤土,与黄土高原典型流域坡面土壤质地相同,土壤粒径组成为黏粒(<0.002 mm)占1.36%,粉粒(0.002~0.02 mm)占59.99%,沙粒(≥0.02~2.0 mm)占38.65%;土壤体积质量为1.25 g/cm^3。将供试土壤风干,除去植物根系和块石等杂物,并过孔径10 mm的筛备用。

模拟降雨装置采用西安理工大学水资源研究所研制的针管式降雨装置(图1-A),采用长×宽×高=0.9 m×0.45 m×0.15 m的木质土槽收集径流(图1-B),雨滴发生器采用针管均匀排列组合而成,具体结构见图1-C和图1-D。采用超低温冰箱(长×宽×高=1.15 m×0.72 m×0.85 m)进行冻融,冻结温度为-40~-10 ℃。

1.2　试验设置

根据黄土高原典型流域坡面土壤含水量监测值和土壤田间持水量值,本试验设定5个土壤初始

含水量(质量含水量,下同),分别为10%,15%,20%,25%,30%,在分析数据时将土壤初始含水量归为低含水量(10%,15%)和高含水量(20%,25%,30%)两组。

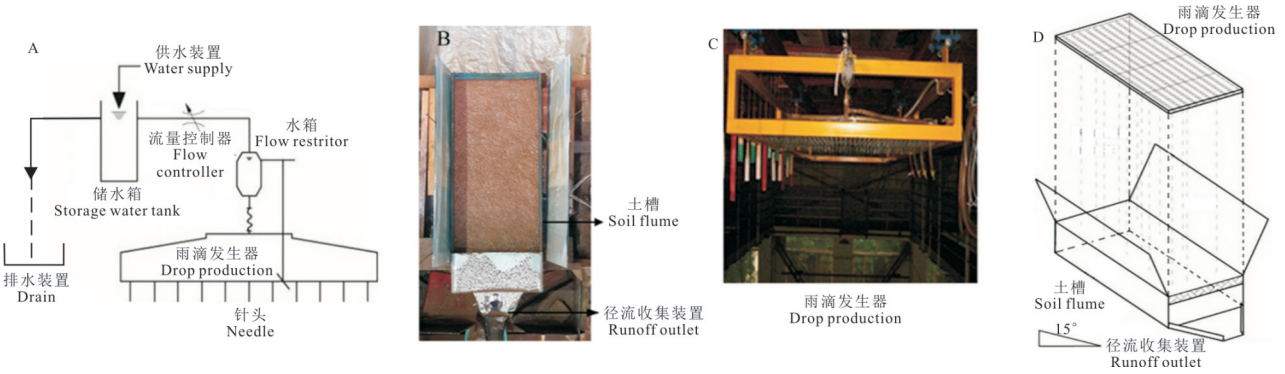


图1 降雨装置结构及其工作示意图

Fig. 1 Structure and working schematic diagram of rainfall device

本试验在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室进行,共设计两组试验:一组是未冻融的黄土坡面(LS)模拟降雨试验,一组是冻融坡面(FTS)模拟降雨试验。根据黄土高原典型流域土壤温度监测数据设置冻融温度和时间,冻融坡面模拟降雨试验开始前将土槽放入温度为-20 ℃的冰箱冷冻12 h,然后将其放在18 ℃下解冻12 h,之后开始模拟降雨试验。

根据黄土高原地貌特征和多年降雨特征,模拟降雨试验土槽坡度设置为15°,降雨强度为(0.9±0.05)mm/min,降雨均匀度在80%以上;产流开始后,降雨历时60 min,每场试验3次重复。产流开始后,每隔1 min用塑料桶收集1次出水口处的浑水样品,静置24 h后过滤,分离径流和泥沙样品,统计坡面产流时间、产流量和产沙量;同时,选取间隔5 min的径流和泥沙样品,采用碳酸氢钠浸提法测定速效磷(AP)含量,用氯化钾浸提法测定速效氮(AN)含量。

1.3 数据分析

1.3.1 *产流率及产沙率计算* 坡面产流率的计算公式如下:

$$q_r = q/1\,000\,st。 \tag{1}$$

式中:q_r为产流率,L/(m²·min);q为产流量,mL;s为模拟降雨面积,m²;t为产流时间,min。

坡面产沙率的计算公式如下:

$$S_t = S/st。 \tag{2}$$

式中:S_t为产沙率,g/(m²·min);S为产沙量,g。

1.3.2 *速效氮(磷)流失率、流失量及流失比例计算* 径流中养分流失率及流失量的计算公式如下:

$$L_i = C_i \times Q_i; \tag{3}$$

$$R_i = C_i \times Q_i/1\,000\,s。 \tag{4}$$

式中:L_i为第i分钟的速效氮(磷)流失量,mg;C_i为第i分钟的速效氮(磷)质量浓度,mg/L;Q_i为第i分钟的产流量,mL;R_i为第i分钟的速效氮(磷)流失率,mg/(m²·min)。

速效氮(磷)流失比例的计算公式如下:

$$P_R = L_R/L_T \times 100\%。 \tag{5}$$

式中:P_R为径流中速效氮(磷)流失比例,%;L_R为径流中速效氮(磷)流失量,mg;L_T为次降雨过程中速效氮(磷)总流失量,mg。

泥沙中速效氮(磷)流失量、流失率和流失比例的计算方法同公式(3)、公式(4)和公式(5)。

1.3.3 *Pettitt检验法* 利用Pettitt检验法确定坡面水沙过程和氮磷流失在时间序列上的突变点。使用Mann-Whitney的统计量$U_{t,N}$来检验一个总体$x(t)$同一时间序列的两个样本$x_1, x_2, \cdots, x_t$和$x_{t+1}, x_{t+2}, \cdots, x_N$,统计量$U_{t,N}$的计算公式如下:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{i=1}^{N} \mathrm{sgn}(x_t - x_i),$$

$$t = 2, \cdots, N。 \tag{6}$$

式中:t为分割点,即最可能的突变点;N为时间序列长度;sgn为符号函数,当$x_t - x_i > 0$时,sgn=1;当$x_t - x_i = 0$时,sgn=0;当$x_t - x_i < 0$时,sgn=-1。

若存在t时刻,满足$k_{t,N} = \max|U_{t,N}|$,$1 \leqslant t \leqslant N$,则其统计量的累积概率$P$为:

$$P(k_{t,N} \leqslant \alpha) \approx 1 - 2\exp\left(\frac{-6k_{t,N}^2}{N^3 + N^2}\right)。 \tag{7}$$

式中:α为置信度。

若累积概率P值越接近1,则存在突变点的趋势越明显。若$P<0.95$,则表示未发生突变现象;当$0.95 \leqslant P < 0.99$,表示存在显著突变点;当$P \geqslant 0.99$,表示存在极显著突变点。

1.3.4　双累积曲线检验　利用双累积曲线确定径流泥沙与氮磷流失响应关系的突变点,双累积曲线的斜率发生突变点所对应的时间就是两个变量累积关系出现突变的时间。

1.3.5　Pearson's 时滞性检验　利用 Pearson's 相关性分析水沙过程与氮磷流失的滞后时间,对同一个时间点的产流产沙量与氮磷迁移量进行相关性检验,若检验结果显著,则产流产沙量与氮磷迁移量之间的滞后时间为 $5\times M$ min,其中 M 最大为时间序列的长度减 1;若检验结果一直不显著,则两者之间无相关性。

检验显著性水平的 R 值可由下式计算:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\overline{X}\right)\left(Y_i-\overline{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\overline{X}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i-\overline{Y}\right)^2}}。\tag{8}$$

式中:X_i 为第 i 分钟的氮(磷)迁移量,$\overline{X}$ 为氮(磷)平均流失量;Y_i 为第 i 分钟的产流量(产沙量),$\overline{Y}$ 为平均产流量(产沙量);n 为时间长度。

2　结果与分析

2.1　冻融条件下坡面产流产沙过程分析

不同初始含水量条件下未冻融坡面(LS)和冻融坡面(FTS)产流率随时间变化的特征如图 2 所示。图 2 表明,两种处理坡面的径流动态均遵循对数函数关系,呈现初期快速增长继而逐渐趋稳的典型特征。LS 处理产流率在降雨 15 min 后达到稳定状态,而 FTS 处理则需延后至 30 min 才能达到稳定,表明冻融作用显著延长了坡面达到稳定入渗所需的时间。当土壤初始含水量为 30% 时,两种处理坡面均出现了最大稳定产流率和产流量,其中 LS 处理平均稳定产流率为 0.43 L/(m²·min),60 min 径流量为 24.33 mm;FTS 处理平均稳定产流率为 0.45 L/(m²·min),60 min 径流量为 24.80 mm;当土壤初始含水量为 20% 时,稳定产流率最小,其中 LS 处理平均稳定产流率为 0.37 L/(m²·min),FTS 处理为 0.36 L/(m²·min)。在低含水区和高含水区,LS 处理产流率均随着初始含水量的增加而升高,其中高含水区产流率(y)与土壤初始含水量(x)关系为 $y=0.375\,3x+13.18$,$R^2=0.99$;低含水区产流率(y)与土壤初始含水量(x)关系为 $y=0.326\,6x+18.44$,$R^2=1$。在高含水区,FTS 处理产流率随着初始含水量的增加而升高,产流率(y)与土壤初始含水量(x)的关系为 $y=0.690\,2x+4.021$,$R^2=0.99$;在低含水区,产流率随着含水量的增加而降低,二者呈负相关关系。

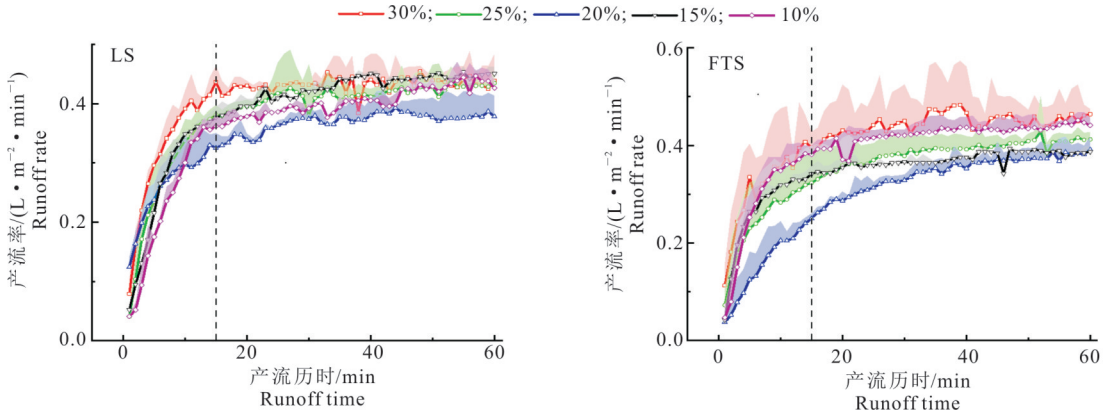


图 2　不同初始含水量条件下未冻融坡面(LS)和冻融坡面(FTS)的产流率变化特征

Fig. 2　Runoff rate variation characteristics on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

不同初始含水量下两种处理坡面产沙率随时间变化的特征见图 3。从图 3 可以看出,LS 处理下产流 0~10 min,产沙率急剧上升,当初始含水量为 10% 时,产沙率增长速率最快,达到 0.95 g/min。当初始含水量为 30% 时,60 min 总产沙量明显高于其他含水量处理;而初始含水量为 15% 时产沙率最低,60 min 总产沙量为 315.83 g/m²(表 1)。LS 处理在高含水区产沙率与初始含水量呈显著正相关($R^2=0.99$),但在低含水量区则呈负相关。

从图 3 还可以看出,相较于 LS 处理,FTS 处理产沙动态总体更为平缓。除了初始含水量 10% 的坡面,其余坡面的产沙率均表现为缓慢增加并最终达到稳定状态,且达到稳定所需时间延长至 30~40 min,说明冻融作用改变了坡面土壤微结构,延长了泥沙与径流输移的响应过程。由不同处理坡面的产流时间、总产流量和总产沙量(表 1)可知,当初始

含水量为10%时,60 min总产沙量达到最大值,为739.89 g/m²;当初始含水量为20%时,60 min总产沙量最低,为244.34 g/m²。

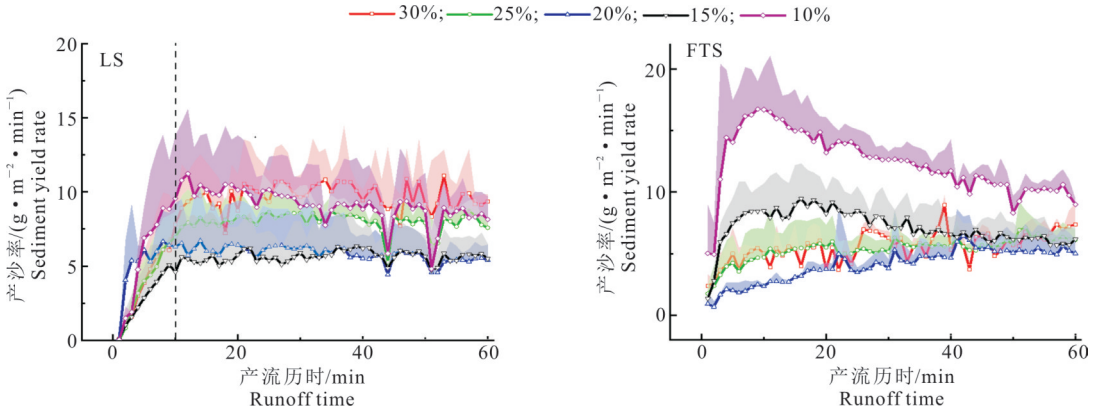


图3 不同初始含水量条件下未冻融坡面(LS)和冻融坡面(FTS)产沙率的变化特征

Fig. 3 Sediment yield rate variation characteristics on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

表1 不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融坡面(FTS)的产流时间、总产流量和总产沙量

Table 1 Runoff initiation time, total runoff volume, and total sediment yield on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

处理 Treatment	土壤初始含水量/% Soil initial water content	产流时间/min Runoff time	总产流量/mm Total runoff volume	总产沙量/(g·m⁻²) Total sediment yield	处理 Treatment	土壤初始含水量/% Soil initial water content	产流时间/min Runoff time	总产流量/mm Total runoff volume	总产沙量/(g·m⁻²) Total sediment yield
LS	30	2.67	24.33	535.42	FTS	30	2.97	24.80	332.71
	25	2.57	22.79	447.39		25	2.82	21.13	321.25
	20	4.41	20.57	347.33		20	5.74	17.90	244.34
	15	5.27	23.34	315.83		15	6.26	20.68	426.47
	10	4.73	21.71	519.03		10	4.58	23.34	739.89

从表1还可以看出,对于LS处理,高含水量(25%~30%)减少了土壤水分达到饱和状态的时间,坡面产流时间比低含水量条件下(10%~15%)明显提前,从而增加了坡面径流的冲刷能力。虽然初始土壤高含水量缩短了坡面产流时间,延长了径流对坡面的冲刷时间,但是在低含水量条件下,坡面总产沙量反而比高含水量明显增加,尤其是在初始含水量为10%时,冻融坡面总产沙量比高含水量条件下增加了1倍多。

2.2 冻融条件下坡面速效氮和速效磷流失特征及途径分析

不同初始含水量条件下未冻融(LS)、冻融坡面(FTS)径流和泥沙中速效氮(AN)与速效磷(AP)流失率的变化见图4和图5。图4和图5表明,土壤初始含水量对2种坡面径流和泥沙中速效氮磷的流失率有明显影响。产流过程中,当土壤初始含水量达到30%时,两种处理坡面径流中AN和AP流失率均较高,因为在高含水量下,土壤入渗能力降低,饱和导水率下降,促使降雨初期快速产流,表层土壤中AN和AP迅速溶解于径流中并随之流失,导致高含水量条件下径流中养分流失量占总流失量的60%以上(表2)。不同初始含水量坡面速效氮磷随泥沙迁移的过程呈现出相反的特征。当初始含水量为10%时,未冻融坡面泥沙中的速效氮磷流失率均明显高于其他处理;当初始含水量为15%时,冻融坡面泥沙中的AN流失率均明显高于其他处理;当初始含水量为10%时,冻融坡面泥沙中的AP流失率明显高于其他处理。这是因为在低含水量条件下,土壤的入渗速率较高,溶解态氮磷随水分入渗并吸附在泥沙颗粒表面,最终随着侵蚀泥沙流失。

不同初始含水量条件下未冻融(LS)、冻融坡面(FTS)径流和泥沙中的速效氮磷流失比例见表2。从表2可以看出,未冻融坡面速效氮磷主要随径流流失,其中AN和AP随径流流失的比例分别达38.64%~83.85%和41.31%~82.46%,说明径流是控制速效氮磷迁移的主导因子。冻融作用显著改变了AN的流失比例,比如,在初始含水量为10%时,冻融坡面径流中AN流失比例较未冻融坡面增

加了 37.71%($P<0.01$),而在初始含水量 30% 时　　该比例下降了 15.62%。

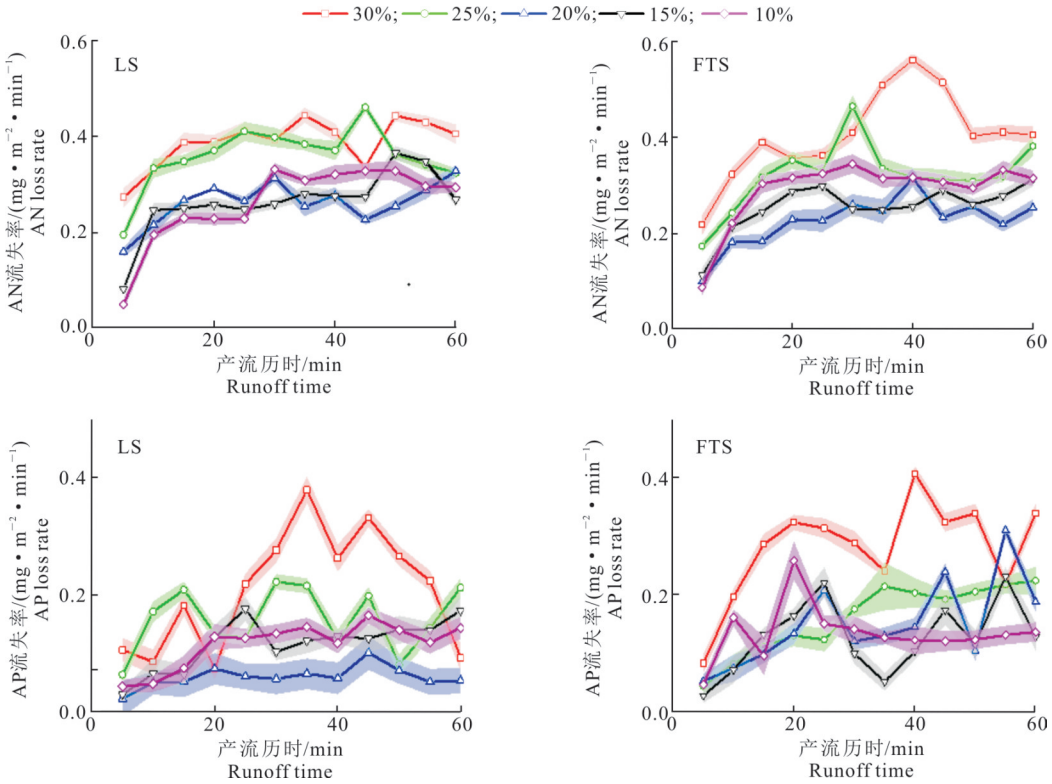


图 4　不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融坡面(FTS)径流中速效氮(AN)与速效磷(AP)流失率的变化

Fig. 4　Runoff-associated AN and AP loss rates on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

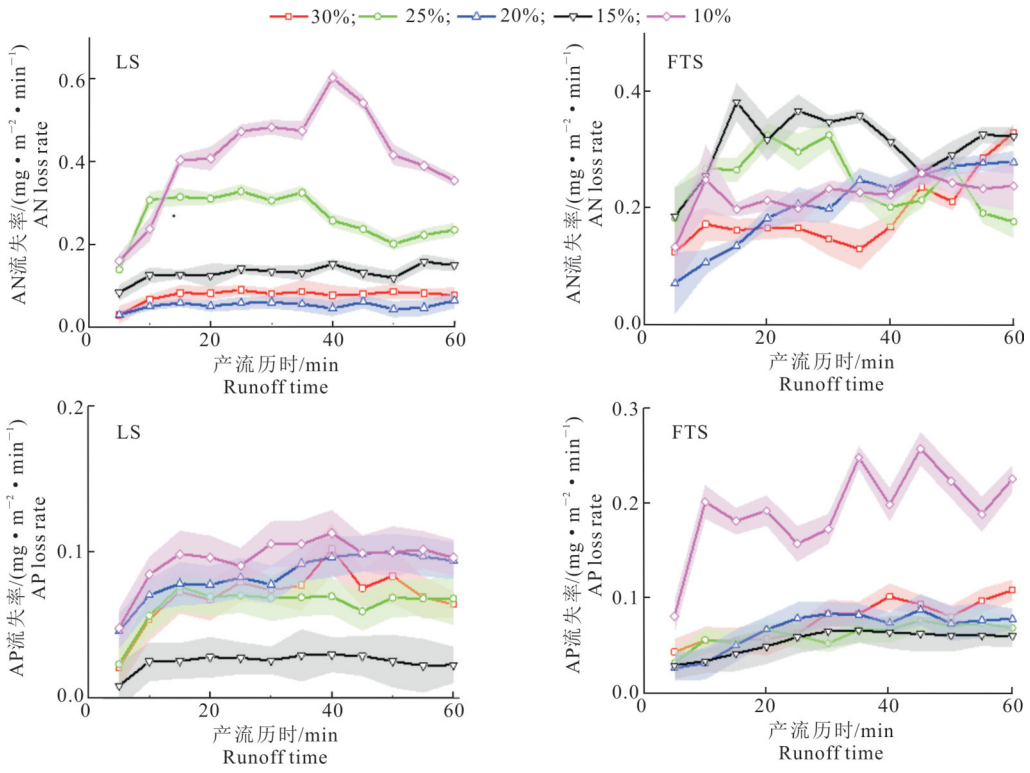


图 5　不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融坡面(FTS)泥沙中速效氮(AN)与速效磷(AP)流失率的变化

Fig. 5　Sediment-associated AN and AP loss rates on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

表2 不同初始含水量条件下未冻融(LS)、冻融坡面(FTS)径流和泥沙中的速效氮磷流失比例

Table 2 Runoff-associated and sediment-associated AN and AP loss rate on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

处理 Treatment	土壤初始含水量/% Soil initial water content	径流 Runoff		泥沙 Sediment		处理 Treatment	土壤初始含水量/% Soil initial water content	径流 Runoff		泥沙 Sediment	
		AN流失比例/% AN loss proportion	AP流失比例/% AP loss proportion	AN流失比例/% AN loss proportion	AP流失比例/% AP loss proportion			AN流失比例/% AN loss proportion	AP流失比例/% AP loss proportion	AN流失比例/% AN loss proportion	AP流失比例/% AP loss proportion
LS	30	83.80	74.89	16.20	25.11	FTS	30	70.71	78.33	29.29	21.67
	25	60.00	71.25	40.00	28.75		25	59.89	71.89	40.11	28.11
	20	83.85	41.31	16.15	58.69		20	56.23	68.78	43.77	31.22
	15	63.47	82.46	36.53	17.54		15	47.89	69.61	52.11	30.39
	10	38.64	54.84	61.36	45.16		10	53.21	40.80	46.79	59.20

在初始含水量20%条件下,冻融坡面径流中AP流失比例较未冻融坡面增加了66.5%;在低含水量条件下径流中AP流失比例较未冻融坡面有所降低,降低比例为13.16%~25.60%。随着径流中速效氮磷流失比例的变化,泥沙中AN和AP的流失的比例也发生了相应的变化。综上,径流为两种坡面速效氮磷流失的主要途径。

2.3 冻融条件下坡面水沙过程与速效氮磷迁移的突变特征分析

2.3.1 坡面水沙过程的突变特征 通过Pettitt检验法对坡面间隔5 min产流产沙过程的变异点进行检验,识别径流和泥沙在流失过程中的突变时间,结果见图6。图6表明,在产流过程中,未冻融坡面初始含水量为30%时不存在突变时间,其余初始含水量条件下均存在突变时间;而在5种初始含水量条件下,冻融坡面均存在突变点,突变时间为30 min。产沙过程中,5种初始含水量条件下未冻融坡面均不存在突变时间;冻融坡面仅在高初始含水量条件下存在突变时间。

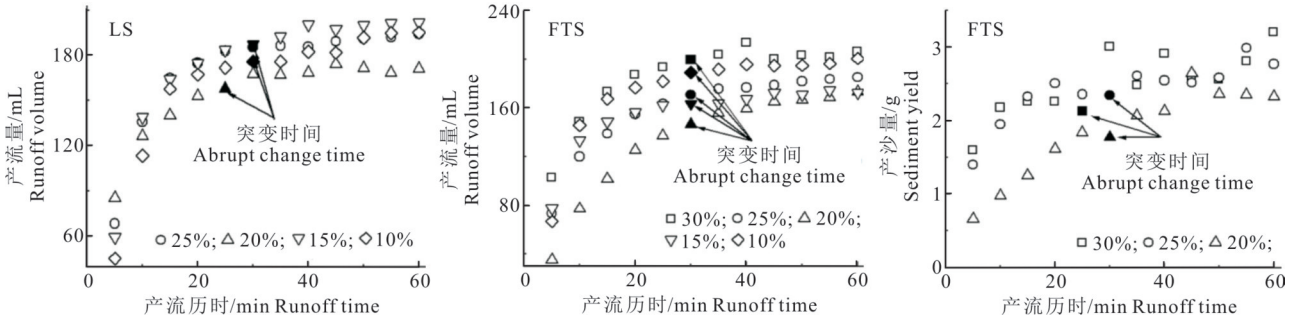


图6 不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融坡面(FTS)水沙过程的突变时间

Fig. 6 Abrupt change time of runoff and sediment process on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

2.3.2 坡面速效氮磷迁移的突变特征 不同初始含水量条件下坡面累积产流量和累积产沙量与径流中累积速效氮磷流失量的关系见图7和图8。从图7可以看出,未冻融处理下,径流中累积AN流失量与累积产流量的关系式斜率于特定时间发生跃变,当初始含水量为15%时,30 min后斜率增加20%;当初始含水量为10%时,25 min后斜率增加20%。表明低含水量条件下,径流中AN流失的突变时间集中于产流后的25~30 min。未冻融处理下,当初始含水量为25%和30%时,累积AP流失量与累积产流量的关系在30 min时均发生突变,其关系式斜率增幅分别达25%和50%,明显高于AN的变化幅度。

图8显示,未冻融处理下,泥沙中累积AN和累积AP流失量与累积产沙量的关系式均在30 min时发生突变,这个时间与试验过程中坡面细沟侵蚀发育的时间一致,细沟侵蚀发生在产流开始后的30 min,表明侵蚀地貌发育对速效氮磷的流失过程有一定的影响,当细沟网络形成后,泥沙输移能力增强,导致速效氮磷的流失也呈现非线性增长。

图7和图8显示,冻融处理下,累积AN流失量与累积产流量的突变时间与初始含水量密切相关。当初始含水量为25%和30%时,径流中AN迁移的突变时间分别为25和30 min;当初始含水量为20%

时,突变时间延迟至 40 min。对于径流中累积 AP 迁移过程,当初始含水量为 25% 和 30% 时,突变时间均为 30 min;当初始含水量为 20% 时,突变时间延后至 35 min;当初始含水量为 15% 和 10% 时,突变时间则提前至 25 min。冻融处理下,泥沙中累积 AN 和累积 AP 流失量与累积产沙量的关系式均在 25～30 min 发生了突变。

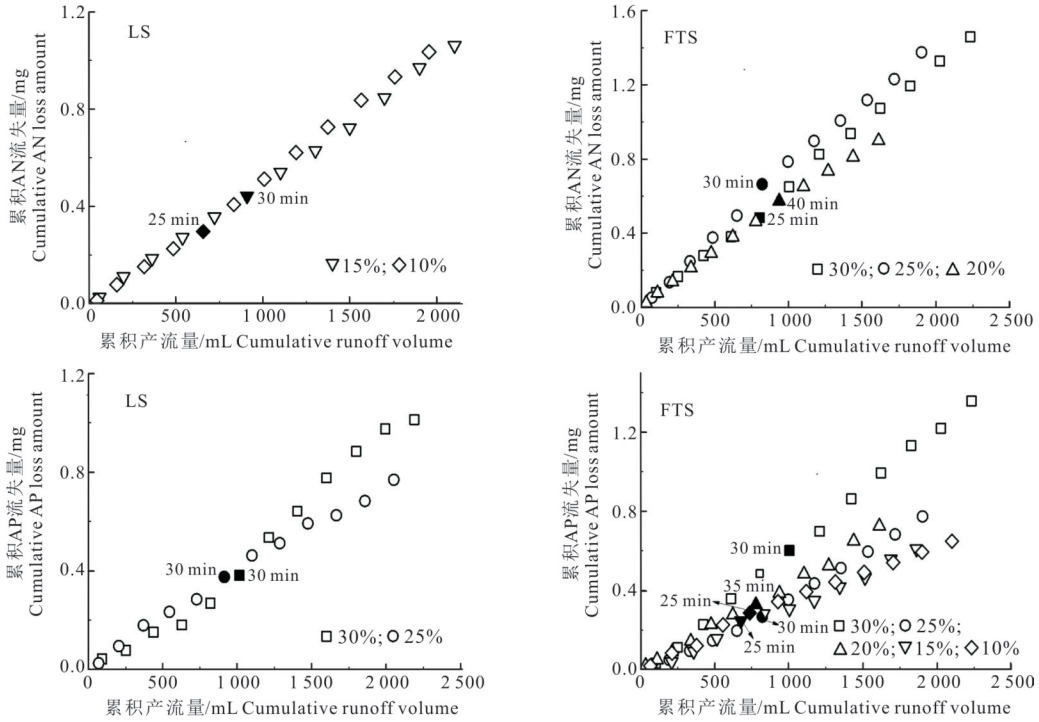


图 7　不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融坡面(FTS)速效氮磷流失量随径流迁移的突变时间

Fig. 7　Abrupt change time of runoff-associated AN and AP loss on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

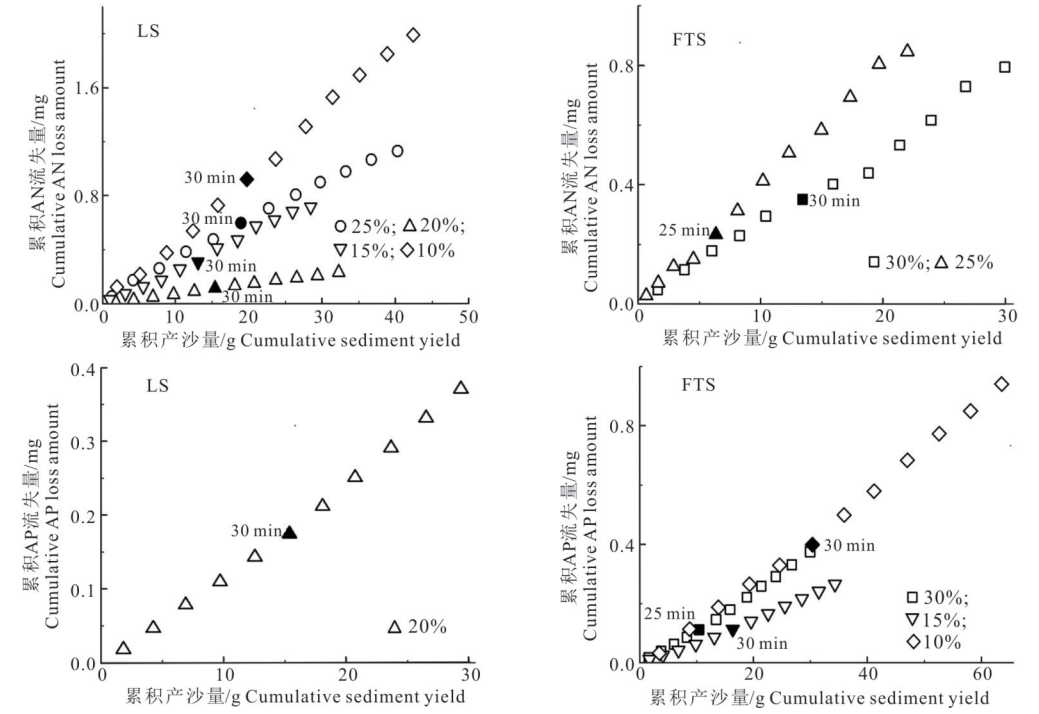


图 8　不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融坡面(FTS)速效氮磷流失量随泥沙迁移的突变时间

Fig. 8　Abrupt change time of sediment-associated AN and AP loss on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

2.4 冻融条件下坡面水沙过程与速效氮磷迁移的时滞效应分析

为了进一步分析产流量与径流中氮磷迁移之间的关系,采用Pearson's相关性检验计算了氮磷迁移量对产流产沙的时滞效应,结果见图9。

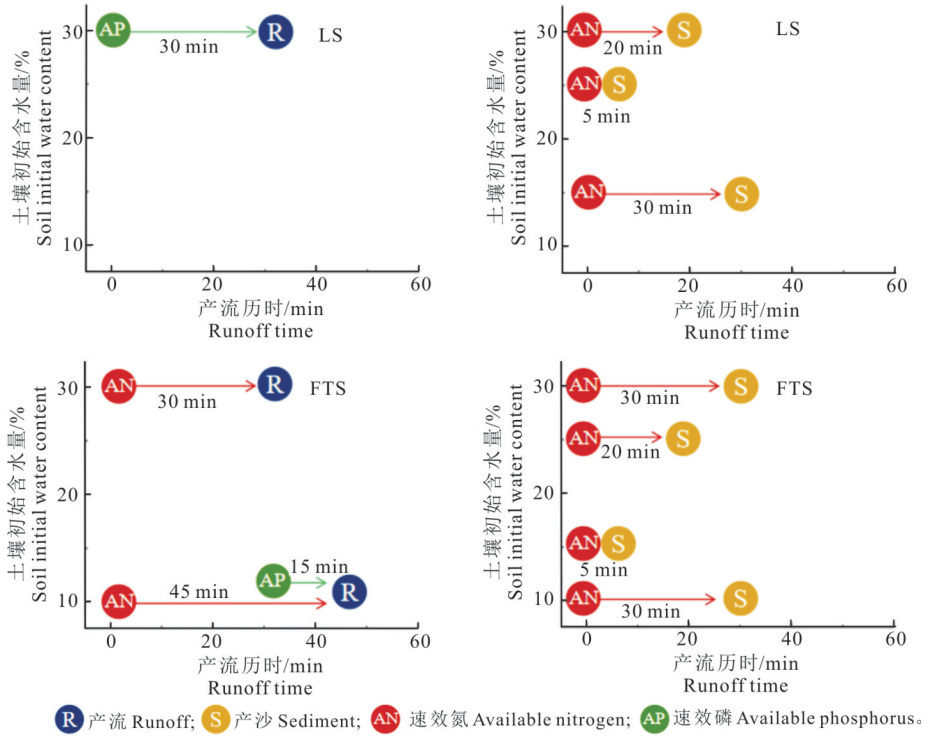


图9 不同初始含水量条件下未冻融(LS)和冻融坡面(FTS)产流产沙与速效氮磷迁移的时滞效应

Fig. 9 Time-lag effect of runoff-sediment process and AN and AP loss on unfrozen-thawed slope (LS) and frozen-thawed slope (FTS) under different initial water content conditions

图9表明,未冻融坡面AN流失与产流量实时同步,不存在时滞效应,但与产沙量存在5~30 min滞后响应;AP则仅在初始含水量为30%时与产流量存在30 min时滞,而与产沙过程完全同步。冻融条件下,AN与产流的时滞响应与含水量相关,当初始含水量为10%时,AN与产流量存在45 min时滞;当初始含水量为30%时,滞后时间缩短至30 min;AN与产沙的时滞时间随初始含水量变化波动于5~30 min。冻融坡面AP流失与产沙过程保持同步性,但与产流的滞后时间在初始含水量为10%时延长至15 min。这表明冻融作用通过改变土壤水力传导特性,削弱了AN迁移对产流的实时敏感性,却未显著干扰AP与产沙的耦合关系。

3 讨 论

3.1 土壤水分与冻融作用对坡面水沙和氮磷迁移过程的双重影响

冻融与土壤水分的耦合作用对坡面土壤物理特性和水力特性具有双重影响[13-14],当含水量较低时,土壤具有较高的水分吸附能力,冻结过程中水分以冰晶形式存在于土壤孔隙中,冰晶的膨胀导致土壤结构发生破碎,此时土壤的应力-应变关系曲线为弱软化性,具有明显的剪切面,从而增加了土壤侵蚀量[15-16]。冻融作用下,土壤侵蚀存在临界含水量阈值,本研究发现坡面水沙过程与速效氮磷迁移的临界含水量值是20%,与前人研究结果[17]一致,也与黄土应力-应变曲线的阈值一致[13]。当土壤初始含水量高于该阈值时,融冰水引发的土壤液化现象会降低土壤的抗侵蚀能力,但此时需要更大的径流能量才能驱动土壤颗粒运移[18]。本研究中,冻融条件下,初始含水量为30%时总产流量最大,但还未达到驱动大规模液化后土壤运移的临界值,因此坡面侵蚀不严重,总产沙量反而较低。

本研究对土壤含水量和冻融作用在速效氮和速效磷流失途径中的影响权重进行多因素方差分析,发现冻融作用对AN流失率的影响显著,其权重为25.2%;而对AP无显著影响,其权重仅为0.4%。土壤初始含水量对AN和AP流失的影响权重分别为69.7%和71.1%,显著高于冻融作用的影响权重,因此,当初始含水量从10%增至30%时,未冻融坡面径流中AN流

失占比增加幅度达116.87%,冻融坡面增加幅度仅为32.88%。总体来说土壤含水量对径流泥沙中氮磷流失的影响显著大于冻融作用,这与前人的研究结果[19]一致,主要作用机制为:土壤含水量通过调控坡面产流与入渗的动态平衡以及溶解态氮磷的释放速率,从而影响土壤中速效氮磷的流失比例及迁移途径。

3.2　土壤侵蚀与氮磷迁移的时滞效应

坡面速效氮与速效磷的迁移过程与产流产沙存在非线性时滞效应,当累积产流产沙量与速效氮磷流失量呈单一线性关系时,表明速效氮磷的迁移主要受实时产流和产沙过程驱动,而当线性关系的斜率在特定时间发生偏转时,则表明在降雨径流的驱动下,坡面微地形变化对速效氮磷的迁移过程产生了影响,导致速效氮磷迁移与水沙过程不同步。研究表明,30 min为细沟侵蚀发育的临界时间,随着细沟的发育,径流汇聚和泥沙输移过程受到影响,导致水土界面氮素和磷素的释放通量发生改变,在微地形发育和氮磷释放通量增加的双重作用下,水沙过程和速效氮磷迁移的同步关系发生了变化[20-21],本研究发现冻融坡面该关系发生突变的时间在25~45 min,这与冻融作用下土壤结构的变化有关。本研究中,冻融坡面AP流失与产沙过程保持同步,而AN流失与产沙过程存在一定的时滞效应,尤其是在冻融条件下更明显。这种差异主要与土壤中磷素形态及其在不同载体的释放过程有关[22],坡面土壤中AP主要吸附于细颗粒物表面,其释放过程更依赖于泥沙输移过程中的物理剥离作用,冻融作用破坏了土壤团聚体结构,使土壤中的磷从不稳定形态转变为活性形态[23],在降雨径流的驱动下,大部分以颗粒态通过坡面径流流失,小部分以溶解态通过壤中流流失[24]。坡面速效氮主要是以溶解态随径流运移,因此在未冻融时其迁移过程与产流保持同步,但是冻融作用影响了速效氮在径流与泥沙之间的转化过程,使速效氮的迁移路径同时受径流以及泥沙吸附-解吸过程的影响,因此在冻融条件下速效氮与产流产沙过程均存在时滞效应。本研究结果为冻融期黄土高原面源污染模型构建提供了关键参数依据,比如在速效氮迁移模型中可考虑引入时滞函数;同时也为冻融期土壤氮磷等养分流失防治提供决策依据[25]。

4　结　论

冻融作用与土壤初始含水量对速效氮磷的流失途径存在双重调控作用,土壤初始含水量对坡面AN和AP流失的影响明显高于冻融作用。未冻融处理下AN流失与坡面产流过程同步,AP流失与坡面产沙过程同步,均不存在时滞效应。不同初始含水量条件下,AN流失与产沙过程存在5~30 min滞时,AP流失仅在土壤初始含水量为30%时与产流过程存在30 min滞后时间。冻融条件下,当土壤初始含水量由10%增加为30%时,AN流失与产流过程的滞后时间由45 min缩短至30 min;AN流失与产沙过程的滞后时间随初始含水量变化波动于5~30 min。两种处理坡面下,AP流失与产沙过程均同步,不存在时滞效应。冻融作用使坡面径流与速效氮磷的非线性响应过程变得复杂,且对AP流失与产流的关系影响较大,对AP流失与产沙过程的影响不显著。

[参考文献]

[1] ZHANG S L, WANG X R, XIAO Z L, et al. Quantitative studies of gully slope erosion and soil physiochemical properties during freeze-thaw cycling in a Mollisol region[J]. Science of The Total Environment, 2020, 707: 136191.

[2] ZUO Y T, MENG F X, LI T X, et al. Effect of biochar application on freezing-thawing deformation of farmland soil during freeze-thaw cycling[J]. Geoderma, 2022, 405: 115510.

[3] 陈仕媛,马岚,杨浩宇,等. 冻融循环对不同砾石含量土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J]. 生态学报,2025,45(14):6719-6729.
CHEN S Y, MA L, YANG H Y, et al. Effect of freezing and thawing on the stability and erodibility of soil aggregates with different gravel contents[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(14): 6719-6729.

[4] LIU C X, WANG Y Q, CHEN H H, et al. High level of winter warming aggravates soil carbon, nitrogen loss and changes greenhouse gas emission characteristics in seasonal freeze-thaw farmland soil[J]. Science of The Total Environment, 2023, 905: 167180.

[5] KIM Y J, HYUN J, MICHELSEN A, et al. Key determinants of soil labile nitrogen changes under climate change in the Arctic: a meta-analysis of the responses of soil labile nitrogen pools to experimental warming and snow addition[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 494: 153066.

[6] WEI X, HUANG C H, WEI N, et al. The impact of freeze-thaw cycles and soil moisture content at freezing on runoff and soil loss[J]. Land Degradation & Development, 2019, 30(5): 515-523.

[7] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报,2022,36(2):1-12.
ZHANG G H, YANG Y, LIU Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of North-

east China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):1-12.

[8] ZHAO Z F,ZHANG H L,DUAN Y S,et al. Varieties of P fractions in biochar-amended reconstructed soils as impacted by freeze-thaw interference[J]. Journal of Environmental Management,2024,366:121839.

[9] WANG Y,XIAO Z L,AURANGZEIB M,et al. Effects of freeze-thaw cycles on the spatial distribution of soil total nitrogen using a geographically weighted regression Kriging method[J]. Science of The Total Environment,2021,763:142993.

[10] 孙宝洋,吴志广,李占斌,等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(11):57-65.
SUN B Y,WU Z G,LI Z B,et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(11):57-65.

[11] 安小兵,郑粉莉,王雪松,等. 冻融作用对东北黑土区坡耕地土壤微生物养分限制的影响[J]. 应用生态学报,2024,35(10):2744-2754.
AN X B,ZHENG F L,WANG X S,et al. Impacts of freeze-thaw process on soil microbial nutrient limitation in slope farmlands of the Chinese Mollisol region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(10):2744-2754.

[12] 石默杰,杨光,薛艳春,等. 黄土丘陵沟壑区降雨特征对不同土地利用类型坡面产流产沙的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(10):101-109,118.
SHI M J,YANG G,XUE Y C,et al. Effects of rainfall characteristics on slope sediment yield of different land use types in Loess Hilly and Gully Region[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2024,52(10):101-109,118.

[13] 吕倩俐,张艳阳,张天栋,等. 不同冻融循环次数及含水率条件下伊犁地区黄土力学强度损伤特性[J]. 工程地质学报,2023,31(4):1269-1281.
LÜ Q L,ZHANG Y Y,ZHANG T D,et al. Change of mechanical strength of loess in Ili region under different freeze-thaw cycles and moisture contents[J]. Journal of Engineering Geology,2023,31(4):1269-1281.

[14] 罗宣兵,李清林,陈文娟,等. 不同含水率-冻结温度-骆驼刺根系含量下砂土冻融变形规律研究[J]. 岩土力学,2025,46(4):1174-1186.
LUO X B,LI Q L,CHEN W J,et al. Freeze-thaw deformation pattern of sandy soil under different moisture contents,freezing temperatures,and *Alhagi sparsifolia* root contents[J]. Rock and Soil Mechanics,2025,46(4):1174-1186.

[15] 杨浩宇,马岚,陈仕媛. 北方土石山区冻融与水力复合作用对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2024,38(5):92-101.
YANG H Y,MA L,CHEN S Y. Effects of freeze-thaw and hydraulic compound action on soil erosion in northern rocky mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(5):92-101.

[16] 张茜,马仁明,贾燕锋,等. 冻融对典型黑土团聚体输移破碎特征的影响[J]. 应用生态学报,2024,35(5):1275-1282.
ZHANG X,MA R M,JIA Y F,et al. Effect of freeze-thaw cycles on aggregate breakdown of typical black soil during transportation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(5):1275-1282.

[17] 王辉,王全九,邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报,2008,24(5):65-68.
WANG H,WANG Q J,SHAO M A. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(5):65-68.

[18] CHENG Y T,LI P,XU G C,et al. Effects of dynamic factors of erosion on soil nitrogen and phosphorus loss under freeze-thaw conditions[J]. Geoderma,2021,390:114972.

[19] 张博,刘会敏,毕鑫宇,等. 不同含水量及冻结温度对黑土冻融循环过程有机碳矿化的影响[J]. 水土保持学报,2024,38(4):55-62.
ZHANG B,LIU H M,BI X Y,et al. Effects of different moisture content and freezing temperature on organic carbon mineralization during freeze-thaw cycles in black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(4):55-62.

[20] 朱启明,齐小倩,刘俊娥,等. 黄土高原土壤细沟输沙能力对坡度和流量的响应[J]. 水土保持学报,2025,39(4):168-176.
ZHU Q M,QI X Q,LIU J E,et al. Response of rill sediment transport capacity to slope gradient and flow rate for soils on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(4):168-176.

[21] 谭青芳,陈峰庭,黄钰涵,等. 饱和黄绵土坡面细沟侵蚀微地形变化及其对水力学特征参数的响应[J/OL]. 土壤学报,2024:1-11.(2024-12-05)[2025-09-01]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20241204.1136.002.html.
TAN Q F,CHEN F T,HUANG Y H,et al. Change of rill erosion microtopography on saturated loess slope and its response to hydraulic parameters[J/OL]. Acta Pedologica Sinica,2024:1-11.(2024-12-05)[2025-09-01]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20241204.1136.002.html.

[22] LI Y X,WANG L X,ZHANG S Q,et al. Freeze-thaw cycles increase the mobility of phosphorus fractions based on soil aggregate in restored wetlands[J]. CATENA,2022,209:105846.

[23] WANG Z,LI T X,LIU D,et al. Research on the adsorption mechanism of Cu and Zn by biochar under freeze-thaw conditions[J]. Science of The Total Environment,2021,774:145194.

[24] 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,2021,29(1):128-140.
DENG F B,BAO X L,LIANG C,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.

(责任编辑:李小平)