

蚯蚓粪对黄土区坡耕地径流产沙和硝态氮流失特征的影响

邵凡凡，吴军虎

(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,西安 710048)

摘要：蚯蚓粪对土壤入渗和水稳性团聚体组成均有显著影响,通过在黄土区空闲农田坡耕地试验小区采用混施和层施的方式分别施入 0,200,400,600,800 g/m² 5 个不同梯度的蚯蚓粪,研究其对降雨条件下坡面径流泥沙和养分流失的调控作用。结果表明:(1)2 种施加方式均有效延缓了产流起始时间,且层施 800 g/m² 处理下的产流起始时间较 CK 推迟了 3.88 min,延缓效果最为明显;(2)层施 800 g/m² 处理下可以显著减小产流前期的径流增大速率,并推迟进入稳定入渗阶段的时间,累积径流量随时间的变化均可以很好地用幂函数描述;(3)混施和层施 800 g/m² 的 2 种处理下,稳定产沙率分别较 CK 显著减小 79.61% 和 86.74%;累积泥沙量随时间变化均可以用幂函数描述,且初始产沙率均随蚯蚓粪施加量的增大呈显著减小趋势。(4)较混施而言,层施可以显著减小径流中硝态氮的浓度,且施加量越大,效果越明显。总之,蚯蚓粪施入均会对黄土区空闲坡耕地水土养分流失起到一定的调控作用,当施加量较大且施加方式为层施时,可以起到良好的保水控沙控肥效果。

关键词：蚯蚓粪；产流产沙；黄土坡地；人工模拟降雨；土壤改良剂；硝态氮

中图分类号：S157.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2020)01-0071-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.011

Earthworm Casts on Sediment Yield and Nitrate Nitrogen
Loss with the Runoff in Slope Farmland of Loess Area

SHAO Fanfan, WU Junhu

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The application of earthworm casts has significant effects on soil infiltration and aggregate composition. This study was carried out in the test area of the idle farmland of the loess area. Earthworm casts were applied in two methods: (A) earthworm casts mixed with the soil of the (0—5 cm) surface layer and (B) mulched 5 cm of soil layer after broadcast application of earthworm casts. Different levels of earthworm casts were designed to study on sediment yield and nitrate nitrogen loss with the runoff under rainfall conditions. The results showed that: (1) Both application methods effectively delayed the time of runoff occurring. The time of runoff occurring under layer application of 800 g/m² was delayed by 3.88 min compared with CK, and the delay effect was the most obvious. (2) The layer application of 800 g/m² could significantly reduce the rate of runoff increase in the early stage and delay the time of entering the stable stage. The variation of cumulative runoff with time could be well described by a power function. (3) Under the mixed application and layer application at 800 g/m², the sediment yield in the stable phase was significantly reduced by 79.61% and 86.74% than CK. The accumulated sediment yields could be well described by the power function with the time, and the initial sediment yield was significantly reduced with the increase of the amount of earthworm casts. (4) Mixed application could significantly reduce the nitrate concentration in runoff. When the amount of application was large and the application method was layer application, it could play a good role to prevent the sediment and chemical solute loss with runoff.

Keywords: earthworm casts; runoff and sediment yield; loess slope; artificial rainfall; soil amendment; nitrate nitrogen

收稿日期:2019-07-26
资助项目:国家自然科学基金项目(51239009);西北旱区生态水利工程国家重点实验室科研项目(2016ZZKT-9);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS096)
第一作者:邵凡凡(1995—),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事农业水土资源与生态环境研究。E-mail:shaoffan@126.com
通信作者:吴军虎(1974—),男,陕西铜川人,教授,硕士生导师,主要从事农业生态环境和水文水资源研究。E-mail:wujunhu@126.com

我国约 70% 的坡耕地面积分布在西北黄土高原地区^[1],虽然近年来通过实施坡改梯、退耕还林还草等一系列改良举措已经大幅改善了坡耕地耕作环境^[2],但受地形地貌等因素的制约,尚存大面积的坡耕地未能得到整改;同时由于黄土高原地区特殊的土壤质地,使得坡耕地在降雨条件下极易产生径流并携带大量的泥沙和养分,从而对当地的生态环境带来严重的农业面源污染^[3-4]。如今,土壤侵蚀退化已经成为全球性严重的环境问题,在农耕大国的中国,该问题尤为突出^[5],如何调控水土养分流失造成的土壤退化和水体环境污染成为农业领域的研究重点,只有掌握土壤养分培护方法,提高土壤质量,才能更好地养护、培育土壤肥力,增产增收,进而有效地减少水土流失和生态破坏。近年来,大量专家学者采用植被、碎石等覆盖以及施加土壤改良剂等措施针对这一问题展开了丰富的研究,并取得一定成效。杨建霞等^[6]通过对 5°~25°坡耕地径流小区产流产沙规律进行研究,结果表明,不同因素对产流产沙的影响序列分别为产流时,坡度>耕作措施>植被;产沙时,耕作措施>坡度>植被;马星等^[7]研究发现,短历时、大雨强的降雨是造成紫色土区坡耕地水土流失的主要降雨类型,且径流深和冲刷量随坡度的增大而增加;裴峥等^[8]研究表明,采用 1.0 g/m²聚丙烯酰胺(PAM)和 200 g/m²磷石膏(PG)混施可以达到最佳的蓄水减沙效果;王丽等^[9]研究了 5°, 15°, 25°坡度水平下 PAM 对黄土高原沟壑区黑垆土坡地土壤侵蚀及氮磷流失情况的影响,结果表明,施加 PAM 后增加了 5°和 15°坡面的总产流量,却减少了 25°坡面的总产流量,且显著减少 5°, 15°, 25°坡面磷流失总量;周蓓蓓等^[10]研究结果表明,纳米碳对水土流失调控效果较合适的质量分数为 0.5%,在黄土区土壤中施加纳米碳并提高施入纳米碳的比例,对于该地区水土流失的治理具有积极作用。

随着农业科技的发展,蚯蚓粪作为一种传统而又高效的土壤改良剂,其价值也越来越被更多的人认识到。蚯蚓粪作为天然的有机肥料,绿色无害,可以促进植物茁壮生长,培肥固土,有效解决大量耕地贫瘠退化的棘手问题。吴军虎等^[11]研究表明,施加蚯蚓粪可以大幅提高土壤中水稳性团聚体的数量,提高土壤抗水蚀能力,同时提高土壤入渗能力,可以起到土壤扩蓄增容的效果;Jouquet 等^[12]研究表明,有机碳和氮的矿化随着蚯蚓粪总粒径的增加而增加;Chaoui 等^[13]研究表明,与常规堆肥和合成肥料相比,蚯蚓粪是植物营养素的有效来源,并且它不会使土壤产生盐分胁迫;Park 等^[14]研究表明,蚯蚓粪的改良可以刺激垃圾填埋场覆土甲烷的氧化能力;李彦需等^[15]研究表明,蚯蚓粪覆盖可以有效抑制土壤蒸发,提高土壤持水能力。本文基于野

外人工模拟降雨试验,通过在黄土区空闲农田坡耕地修设降雨小区,通过混施和层施 2 种施加方式施入不同含量蚯蚓粪,初步研究蚯蚓粪对黄土区坡耕地径流产沙和硝态氮流失的调控作用,以期缓解黄土区水土养分流失现状提供一种有效改良措施。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 5 月在中国科学院水利部水土保持研究所武黄土高原农业生态试验站担水沟流域野外模拟降雨小区(35°12'N, 107°10'E)进行,海拔为 1 200 m,气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 9.1℃,年平均降水量 580 mm,土壤为粉砂质壤土,母质为深厚的中壤质马兰黄土。无霜期 171 d,地下水位 50~80 m,无灌溉条件,属典型的旱作雨养农业区。

1.2 试验设计

试验小区土壤和供试蚯蚓粪具体特性参数见表 1,试验用蚯蚓粪(*Earthworm casts*)为“大平 2 号赤子爱胜”蚯蚓(*Eisenia foetida*)所产,选购自淮安松裕农业科技有限公司。试验用地为多年撂荒地,为了便于控制和减小环境影响因素,本次模拟降雨试验的小区设置尺寸为 1.0 m×1.0 m,坡度为 15°;结合当地农民施肥习惯以及吴军虎等^[11]通过室内团聚体试验和土柱一维垂直入渗试验所得到的结论,考虑到大量蚯蚓粪的施入会引起混合土层的容重变化,并会造成不同程度的土体膨胀,为了尽可能地消除以上影响因素对试验结果的干扰,本研究共设置 5 种施加量梯度,即:0, 200, 400, 600, 800 g/m²,并将其按照 2 种不同的施加方式施入土壤中,分别模拟撒施后翻耕和撒施后覆土,具体施加方法为:A 混施,表层 0—5 cm 土壤与蚯蚓粪混合;B 层施,将表层 5 cm 土层取出置于一旁,将蚯蚓粪按设定施加量撒施均匀后将表层 5 cm 土壤回填。为了保持试验操作过程的一致性,不施加蚯蚓粪的对照组 CK 同样重复以上操作步骤,试验共计 10 个处理,每个处理 2 次重复。

蚯蚓粪铺设完毕后,为使得蚯蚓粪与土壤充分结合,并发挥其生物化学特性,以 15 mm/h 雨强在每个小区进行预降雨,直至小区表面开始产生径流时立即使用塑料布对小区表面进行覆盖并停止降雨,将其静置 30 天后开始正式试验。采用西安理工大学自主研发的针孔式人工模拟降雨装置^[10](图 1)进行降雨试验,有效降雨面积为 1.0 m²;经过测试:该套人工降雨器的平均雨滴直径为 1.5 mm,降雨均匀度在 80% 以上,雨滴终速符合天然降雨特征。根据试验区多年短历时大雨强的暴雨实测资料,设计降雨强度为 55 mm/h,降雨历时 60 min。

表 1 试验区土壤和供试蚯蚓粪理化特性

供试材料	颗粒组成/%			容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)
	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.02 mm)	砂粒 (0.02~2 mm)				
粉砂质壤土	8.56	81.31	10.13	1.35	9.2	1.20	0.82
蚯蚓粪	20.79	57.70	21.51	0.70	320.0	13.16	11.38

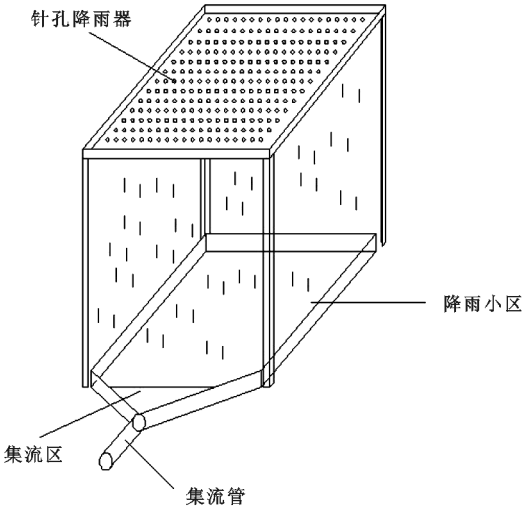


图 1 针孔式降雨器示意

1.3 试验测定及数据分析

开始产流后按照前 10 min 为 2 min/次和 10 min 以后为 5 min/次的频率用量筒承接出口处径流并记录其读数,通过对收集的径流进行过滤风干称重的方式测定径流泥沙含量。径流中硝态氮浓度使用 Smart Chem 450 全自动间断化学分析仪测定。

本研究中采用坡面入渗率对产流条件下的入渗过程进行近似描述^[16-17]:

$$i(t)=(p\cos\alpha-\frac{R(t)}{A})$$

(1)

式中: i 为 t 时刻的平均入渗率(cm/min); p 为降雨强度(cm/min); α 为小区坡度,15°; R 为 t 时刻的径流量(cm³/min); A 为小区面积(cm²)。

试验中数据均为 2 次重复的平均值,使用 Excel 2016 和 Origin 2017 软件进行数据分析和图表绘制。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓粪施加对产流起始时间的影响

恒定雨强下雨水的迁移一般为超渗产流过程,即当雨强大于土壤入渗能力时,超渗部分水量开始以积水形式向微地形低洼地聚积,当积水量大于微地形的拦蓄能力时开始以表面径流的形式排出。在这一过程中,雨强、土壤容重、坡度、下垫面条件、土壤前期含水率以及人为作用等因素均会对产流起始时刻产生不同程度的影响。本研究在试验前期通过静置多日以减小人工扰动的影响,并在降雨前期测定 0—20 cm 土层的剖面含水率,消除较大含水率差异,仅考虑蚯蚓粪施加量和施加方式对产流起始时间的影响^[18-19]。

由图 2 可知,2 种施加方式下产流起始时间均随蚯

蚓粪施加量的增大而呈向后推移趋势;相同蚯蚓粪施加量下,层施较混施的产流起始时间均有不同幅度的后移。进一步分析可知,0—5 cm 混施蚯蚓粪依次分别较 CK 推迟 0.33,0.58,0.92,3.40 min,层施后覆盖 5 cm 土层依次分别较 CK 推迟 1.33,1.67,2.00,3.88 min。这可能是因为层施状态时上部的土层和蚯蚓粪层形成明显的分层结构,在基质势差的作用下,入渗水到达土层和蚯蚓粪层交界处时并不会迅速向下移动,而是在上层土壤中聚积,当交界面处势能相同时,水分开始进入蚯蚓粪层并随着蚯蚓粪颗粒的膨胀而大量涌入,从而使得上层土壤中在相同时间较混施状态下积聚更多水分,从而也比混施较晚开始产流^[11]。同时说明随着蚯蚓粪施加量的增大,可以大幅提高土壤入渗能力和土体储水容量,降雨前期更多雨水通过下渗的方式进入土体中,进而使得产流时间逐渐向后推移。

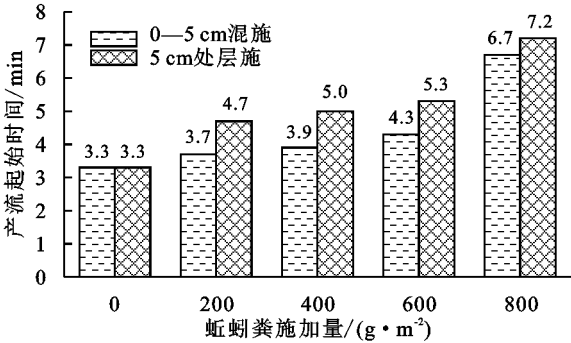


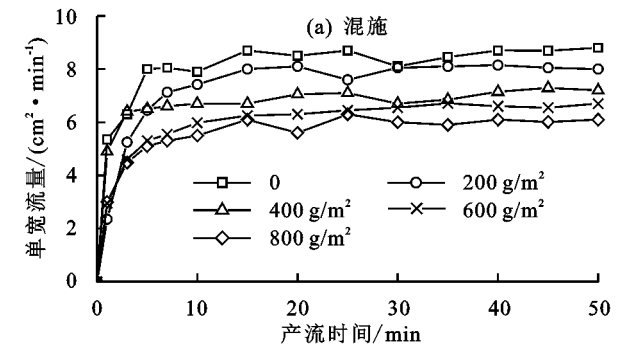
图 2 不同施加方式下的产流起始时间

2.2 蚯蚓粪施加对产流过程的影响

自然降雨条件下空闲坡耕地的径流通常由上方来水和降雨超渗产流 2 部分组成^[20]。但在小区尺度下,由于 2 种过程同时作用会引起较大试验结果误差以及多重因素作用下并不利于对其径流过程作用机理的研究^[21]。本文在没有上方来水作用的简单模拟降雨试验条件下,通过改变蚯蚓粪的施加方式和施加量,来研究施加蚯蚓粪对各次降雨事件下的径流随时间变化过程的影响作用。

由图 3 可知,产流初期的单宽流量均在较短时间内迅速增大,而后进入稳定产流阶段;混施不同含量蚯蚓粪处理下稳定产流时期的单宽流量随时间变化趋势呈较大差异,且随着施加量的增大而减小,较 CK 而言,依次分别减小 6.75%,17.76%,23.06%,29.19%。这说明混施蚯蚓粪可以有效地增加混合土体孔隙数量以及土壤持水性能,从而增加土壤入渗能力,削减稳定产流时期的单宽流量,起到土壤扩蓄增

容的作用;较 CK 和混施处理相比较,层施处理下均减缓了产流前期单宽流量的增大速率,使得其更晚进入稳定产流阶段,从而在一定程度上削减了单宽流量



峰值,起到良好的减流消能作用,层施各处理下稳定产流阶段的单宽流量较 CK 依次分别减小 11.94%, 15.52%, 21.10%, 29.31%。

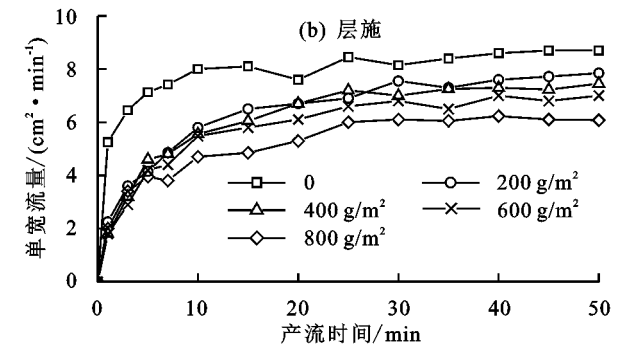


图 3 蚯蚓粪施加量对单宽流量的影响

为了进一步分析蚯蚓粪施加对径流的调控作用,采用幂函数对产流过程中累积径流量随时间的变化过程进行描述,由表 2 可知,幂函数可以很好地拟合累积径流量随时间的变化过程, R^2 均大于 0.99。幂函数表达式中系数描述了产流初始时刻的产流速率,指数描述了蚯蚓粪对径流量的增大作用,即指数越小,增大的速率就越慢,反之则越快;2 种施加方式下,系数均随蚯蚓粪施加量的增大而减小,而指数的差异则较大,混施处理下,指数呈先减小后增大趋势,而层施处理下,指数随蚯蚓粪施加量的增大呈增大趋势;以施加量为 800 g/m^2 为例,2 种施加方式下的初始产流率均较对照组有不同程度的减小,且层施处理下的减小作用最强,说明层施蚯蚓粪覆土可以显著增大土壤的入渗速率,增加土体赋存水分的空间容量,对降雨过程中坡耕地径流冲刷起到很好地优化调控作用。

过程;混施蚯蚓粪处理在初期和稳定阶段的入渗率均大于 CK,且随着施加量的增大稳定入渗率亦越大,层施处理在初期入渗率的衰减速率均较为缓慢;以 2 种施加方式下 800 g/m^2 施加量为例,进一步分析可以看出,混施状态下在产流 15 min 左右便进入稳定入渗阶段,而层施状态下推迟至 25 min 左右才进入稳定入渗阶段,且稳定阶段的入渗率保持在 $0.027\text{~}5\text{ cm/min}$ 左右,这与径流变化过程较为一致。

表 2 累积径流量和时间关系的幂函数拟合

施加方式	施加量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	幂函数 表达式	R^2
0—5 cm 混施	0	$y=343.2x^{1.2501}$	0.9945
	200	$y=303.0x^{1.2462}$	0.9972
	400	$y=328.5x^{1.2101}$	0.9928
	600	$y=258.8x^{1.2342}$	0.9981
	800	$y=200.4x^{1.2984}$	0.9934
5 cm 处层施	0	$y=336.9x^{1.2431}$	0.9949
	200	$y=177.2x^{1.3432}$	0.9991
	400	$y=166.0x^{1.3540}$	0.9987
	600	$y=153.1x^{1.3592}$	0.9984
	800	$y=128.6x^{1.3860}$	0.9959

注: y 为累积产流量(cm^3); x 为产流时间(min)。

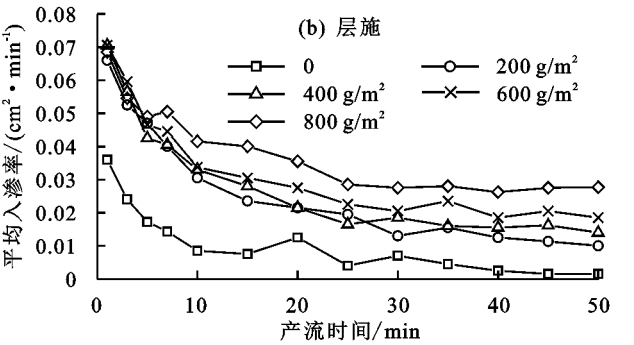
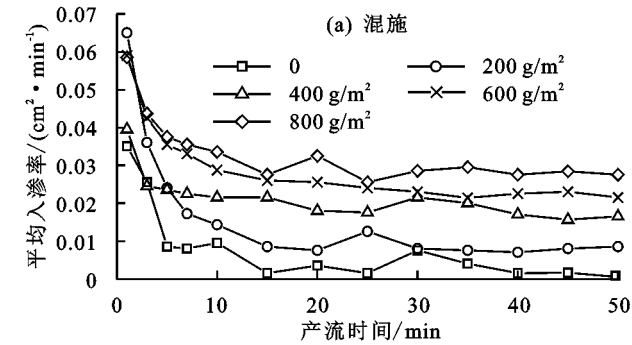


图 4 蚯蚓粪施加量对平均入渗率的影响

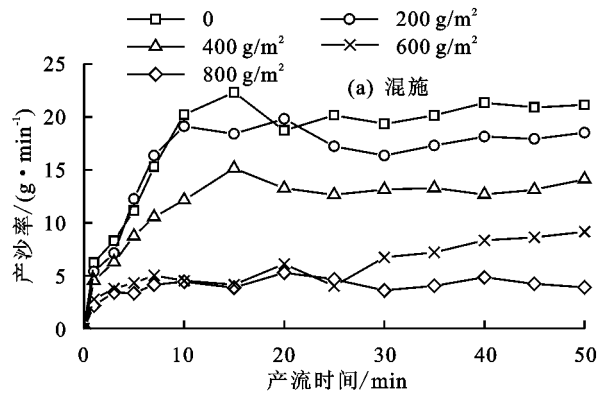
2.3 蚯蚓粪施加对产沙过程的影响

降雨过程中雨滴溅蚀和径流冲刷引起表层土壤颗

粒脱落随径流向下游输移;降雨初期,由于坡面未能形成积水,土壤侵蚀主要由雨滴击溅而引起,加之土体疏

松,土体颗粒大量在表层分散,径流形成后这部分土壤颗粒率先随径流输出;随着降雨过程的推移,在径流的剪切作用下,土壤侵蚀主要以面蚀为主^[22-23]。

本文从径流携沙量入手来研究蚯蚓粪施加对侵蚀产沙过程的影响。由图 5 可知,不同处理下,产沙量随时间的变化均呈先增大后保持微小幅度波动变化趋势;与 CK 相比较,2 种施加方式均可以有效减少径流携沙量,且随着施加量的增大而显著减小;进一步分析可以看出,混施和层施各处理下,稳定阶段的产沙率分别较 CK 显著减小 13.96%~79.61% 和 22.99%~86.74%,这说明在混施状态下,蚯蚓粪中大量的有机质和菌丝粘结土壤颗粒使土壤团聚体结



构更为稳定,防止土壤结构水蚀崩解而被径流冲刷,这与吴军虎等^[11]的室内团聚体试验结论较为一致;层施状态下,蚯蚓粪层的存在极大提高了上部 0—5 cm 土壤的含水量,同时赋予混合体结构更强的入渗能力,再加之蚯蚓粪本身就具有较强保水作用,使得产流过程需要更长时间进入稳定状态,而这一过程中,雨滴的打击在一定程度上使得土壤表层形成稳定的保护层,削减了表面径流量以及水流侵蚀动能,进而显著减小了径流携沙量,起到良好的保水固土作用,进一步说明径流动能和雨滴击打是引起土壤侵蚀的主要方式,故从增加入渗的角度对土壤进行扩蓄增容改良,可以大幅减小径流泥沙量。

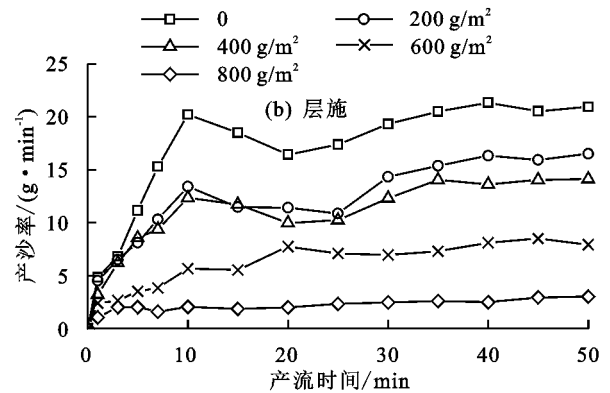


图 5 蚯蚓粪施加量对产沙率的影响

为了进一步分析蚯蚓粪施加对泥沙的调控作用,采用幂函数对产沙过程中累积产沙量随时间的变化过程进行描述。由表 3 可知,幂函数可以很好地拟合累积产沙量随时间的变化过程, R^2 均大于 0.99。系数均随蚯蚓粪施加量的增大而显著减小,说明施加蚯蚓粪可以显著减小初始产沙率,这与前述初始产流率规律较为一致;混施状态下指数呈先增大后减小趋势,而层施处理则呈波动减小状态,且随着蚯蚓粪施加量的增大,减小的幅度也越大,这与产流过程拟合规律相异,这可能的原因是径流产沙过程受降雨前期影响较大,施加蚯蚓粪后随着初始产流时间的推迟,雨滴击打使得土层表面结构更为紧致,大量的土壤黏粒随着入渗水向下移动,土壤表层经过反复的破坏重塑过程,再加之稳定阶段的径流量较小,水流冲刷的影响作用也显著减小,从而使得产沙率的增大速率也较 CK 有不同程度减小。

2.4 蚯蚓粪施加对径流硝态氮迁移的影响

养分在土壤中的移动过程主要受土体孔隙结构和土壤中水分的运移控制,而在降雨产流过程中,不可避免地有大量溶解态的养分会通过径流输出,降低耕地肥力^[24-25]。本研究以硝态氮为例,来揭示降雨过程中蚯蚓粪施加处理下养分随径流流失的规律。由图 6 可知,总体而言,硝态氮浓度均呈前期迅速减小,后期呈波

动缓慢减小状态。与前述产流产沙过程所不同的是,2 种施加方式下径流中硝态氮浓度随时间的变化呈现出完全不同的规律,混施状态下,施加蚯蚓粪处理较 CK 相比均不同程度地增加了径流中硝态氮浓度,且随着施加量的增大呈增大趋势,说明蚯蚓粪中本身含有大量的有机质和养分,在 0—5 cm 混施处理下,蚯蚓粪中大量养分溶于入渗水中,并通过水动力弥散和雨滴击打等形式进入径流中输出,从而增加了径流中硝态氮浓度;层施状态下,在产流前 25 min 内,施加蚯蚓粪处理的径流硝态氮浓度均小于 CK,且随着蚯蚓粪施加量的增大而减小,而在产流 25 min 之后,施加蚯蚓粪处理下的径流硝态氮浓度开始出现不同幅度的增大,而后保持波动稳定状态,可以看出稳定状态下的径流硝态氮浓度与蚯蚓粪施加量呈正相关关系,均略大于 CK,这说明层施处理下,当蚯蚓粪层上部土体处于饱和状态时,在浓度梯度的作用下,蚯蚓粪中大量养分开始向上部土层扩散,而后进入径流中流失。

由图 7 可知,硝态氮含量随产流时间推移呈先迅速增大至峰值后开始减小至稳定阶段;混施状态下,施加蚯蚓粪处理所达到的峰值含量大小不一,这可能是由于开始产流时间、径流量以及本身所含硝态氮浓度的多重因素作用下所导致的,而后稳定状态的硝态氮含量均随蚯蚓粪施加量的增加呈增大趋势,这与前

述浓度变化较为一致;层施状态下,施加蚯蚓粪处理均显著减小了前期硝态氮含量所达到的峰值,说明开始产流时间越长,硝态氮会随入渗水而迁移至更深层土壤,表层土壤硝态氮浓度开始减小,从而导致输出硝态氮含量也必然有所减小;在产流 25 min 左右时,由于 5 cm 位置处蚯蚓粪层的补给作用,硝态氮含量开始出现一定程度的增加趋势,进一步说明浓度梯度和水动力弥散作用是产流后期径流中硝态氮的主要补给方式。以产流 50 min 时,2 种不同施加方式的硝态氮流失总量为例,定量评价 2 种施加方式下不同蚯蚓粪施加量下的硝态氮流失规律;在混施状态下,其流失总量依次分别为 10.45,21.21,22.86,24.48,26.98 mg;层施状态下,其流失总量依次分别为 10.17,6.41,5.98,4.84,4.91 mg;可以看出,层施方式下可以显著减小径流中硝态氮

流失量,当施加量为 600 g/m²时,层施较混施的硝态氮流失总量减少 19.64 mg,减小了 80.23%。

表 3 累积泥沙量和时间关系的幂函数拟合

施加方式	施加量/(g·m ⁻²)	幂函数表达式	R ²
0—5 cm 混施	0	$y=3.5939x^{1.4606}$	0.9963
	200	$y=3.2466x^{1.4673}$	0.9936
	400	$y=2.7256x^{1.4244}$	0.9957
	600	$y=1.7061x^{1.3178}$	0.9962
	800	$y=1.4692x^{1.3012}$	0.9931
5 cm 处层施	0	$y=3.5123x^{1.4624}$	0.9950
	200	$y=2.7289x^{1.4143}$	0.9967
	400	$y=2.1691x^{1.4617}$	0.9927
	600	$y=1.2438x^{1.4345}$	0.9996
	800	$y=0.7523x^{1.2973}$	0.9907

注:y 为累积产沙量(cm³);x 为产流时间(min)。

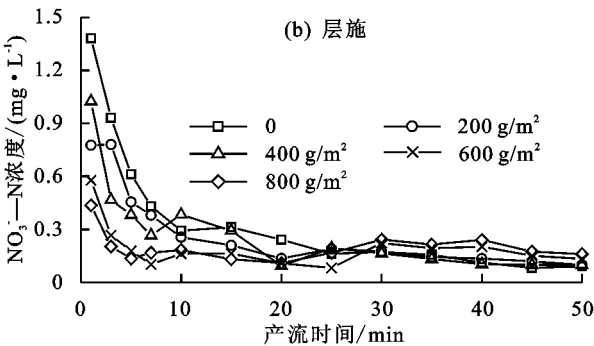
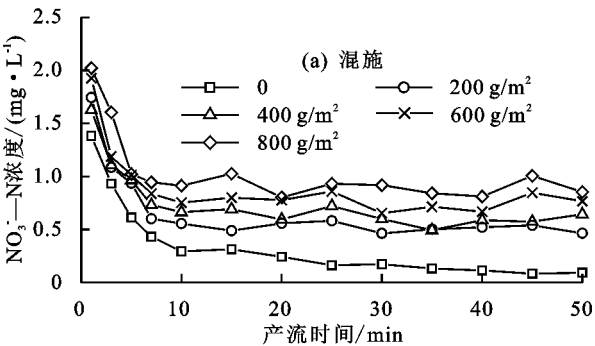


图 6 蚯蚓粪施加量对径流中 NO₃⁻-N 浓度的影响

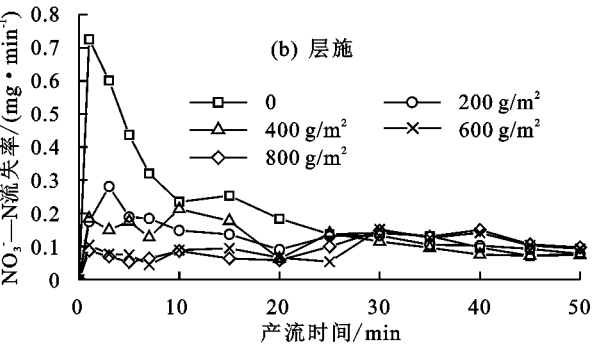
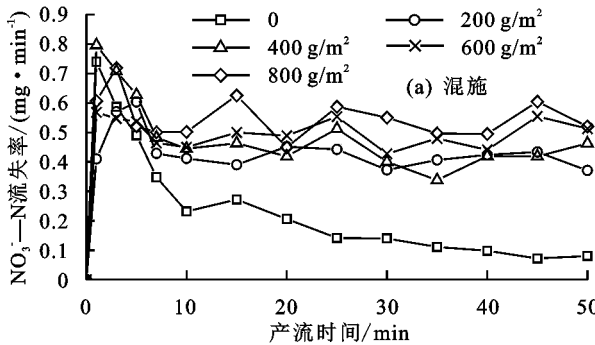


图 7 蚯蚓粪施加量对径流中 NO₃⁻-N 流失率的影响

3 结 论

(1)混施和层施均显著延缓了产流起始时间,其中层施 800 g/m²处理下的产流起始时间较 CK 推迟了 3.88 min,延缓效果最为明显。

(2)不同施加方式下,稳定产流阶段的单宽流量均小于 CK,且随着施加量的增大呈减小趋势;较混施相比较,层施均有效延缓了前期单宽流量的增大速率;各处理下的累积径流量随时间变化均可以用幂函数很好地描述,且层施对初始产流率的抑制效果最强;以 2 种施加方式下 800 g/m²施加量为例,混施下在产流 15 min 左右便进入稳定阶段,而层施下推迟至 25 min 左右才进入稳定阶段,且稳定阶段的入渗率保持在 0.027 5 cm/min 左右。

(3)混施和层施各处理下,稳定阶段的产沙率分别较 CK 显著减小 13.96%~79.61%和 22.99%~86.74%;且累积泥沙量随时间的变化规律均可以用幂函数很好地描述,R²均大于 0.99,且初始产沙率均随蚯蚓粪施加量的增大呈减小趋势。

(4)混施处理下均不同程度增大了径流中硝态氮的浓度;而层施下则很好地抑制了硝态氮的流失,当施加量为 600 g/m²时,层施较混施的硝态氮流失总量减少 19.64 mg,减小了 80.23%。

参考文献:

[1] 于国强,李占斌,鲁克新,等.黄土高原小流域次降雨侵蚀产沙分段预报模型研究[J].土壤学报,2010,47(4): 604-610.

[2] 覃超,吴红艳,郑粉莉,等.黄土坡面细沟侵蚀及水动力学参数的时空变化特征[J].农业机械学报,2016,47(8):146-154.

[3] 赵光旭,王全九,张鹏宇,等.短坡坡长变化对坡地风沙土产流产沙及氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):13-18.

[4] 杨阳,朱元骏,安韶山.黄土高原生态水文过程研究进展[J].生态学报,2018,38(11):4052-4063.

[5] 李洪清.黄土高原地区水土流失问题[J].工程建设与设计,2016(18):97-99.

[6] 杨建霞,雷孝章,邱景,等.5°~25°坡耕地径流小区产流产沙规律[J].中国水土保持科学,2008,6(增刊 1):30-34,53.

[7] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.

[8] 裴峥,段喜明,侯礼婷.施加 PAM 和 PG 对坡地产流产沙的影响研究[J].中国水土保持,2017(4):59-62,69.

[9] 王丽,王力,王全九.PAM 对不同坡度坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].环境科学学报,2015,35(12):3956-3964.

[10] 周蓓蓓,陈晓鹏,吕金榜,等.纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J].农业工程学报,2017,33(2):116-124.

[11] 吴军虎,邵凡凡,刘侠.蚯蚓粪对土壤团聚体组成和入渗过程水分运移的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):81-87.

[12] Jouquet P, Thi P N, Hong H N, et al. Laboratory investigation of organic matter mineralization and nutrient leaching from earthworm casts produced by *Amyntas khami* [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1):24-30.

[13] Chaoui H I, Zibilske L M, Ohno T. Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2):295-302.

[14] Park S, Lee I, Cho C, et al. Effects of earthworm cast and powdered activated carbon on methane removal capacity of landfill cover soils [J]. *Chemosphere*, 2008, 70(6):1117-1123.

[15] 李彦需,邵明安,王娇.蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程的影响[J].土壤学报,2018,55(3):633-640.

[16] 张佳崎,马悦,张瑞芳,等.不同种植模式和坡度对片麻岩山坡地氮素流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):8-13.

[17] Kumar R, Srivastava R S A K. Conservation efficiency of five common riparian weeds in movement of soil, water and phosphorus [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1992, 29(3):737-744.

[18] 张慧芸,章慧,董艳,等.基于重标极差(R/S)和小波分析的黄土坡耕地产流产沙特征研究[J].土壤学报,2017,54(6):1345-1356.

[19] Tao W H, Wang Q, Lin H. An approximate solution for describing surface runoff and sediment transport over hillslope [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558:496-508.

[20] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.

[21] Yang T, Wang Q, Su L J, et al. An approximately semi-analytical model for describing surface runoff of rainwater over sloped land [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30:1-14.

[22] Mahmoodabadi M, Sajjadi S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion [J]. *Geomorphology*, 2015, 253:159-167.

[23] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454/455(3):123-130.

[24] 吴军虎,朱端端,王海洋,等.不同腐殖酸类对黄土坡面侵蚀和养分流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):24-29.

[25] 胡梓超,周蓓蓓,王全九.模拟降雨条件下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):1-6.

(上接第 70 页)

[17] 周俊.海螺沟冰川退缩迹地风化:成土过程与土壤磷形态研究[D].北京.中国科学院研究生院,2014.

[18] 邱陆畅,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.

[19] 孙蓓婷,高超,张燕.基于加权 Topsis 法综合评价典型滩涂围垦区土壤质量演变[J].中国生态农业学报,2018,26(2):284-293.

[20] 张丽萍,朱大奎,杨达源.长江三峡坝区花岗岩风化壳化学元素迁移特征[J].地理学报,2001,56(5):515-522.

[21] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.

[22] 庞奖励,张卫青,黄春长,等.渭北高原土地利用变化对土壤剖面发育的影响:以洛川—长武塬区耕地转为苹果园为例[J].地理学报,2010,65(7):789-800.

[23] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云,等.风蚀水蚀交错区黄土粘土矿物特征及环境意义[J].水土保持学报,2015,29(1):159-162.

[24] 杨慧.植物对金属离子胁迫的响应机制研究[D].北京.中国科学院研究生院,2010.

[25] 温美丽,杨龙,王钧,等.南岭森林的土壤保持功能[J].林业与环境科学,2018,34(2):127-134.