

黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布 及混入土壤对土壤性状的影响

王忠禹¹, 王 兵^{1,2}, 刘国彬^{1,2*}, 刘佳鑫¹, 李兆松¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 黄土丘陵区植被的恢复可能影响枯落物分布特征, 进而对土壤性状产生影响。论文选取刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林、柠条(*Caragana intermedia*)人工林、铁杆蒿(*Artemisia gmelini*)群落和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)群落4种典型植被样地, 研究其枯落物坡面(坡长40~80 m)分布特征及自然条件混入土壤中对土壤理化性状的影响。结果表明: 1) 4种典型植被样地地表枯落物蓄积量(143.89~833.04 g/m²)、盖度(0.36~0.63)和厚度(0.77~2.03 cm)均表现为刺槐人工林>柠条人工林>铁杆蒿群落>白羊草群落; 土壤中枯落物混入量(178.80~657.21 g/m²)和混入深度(1.33~2.29 cm)均表现为刺槐人工林>铁杆蒿群落>柠条人工林>白羊草群落; 土壤中枯落物混入量占枯落物总蓄积量的比例(45.91%~74.02%)表现为铁杆蒿群落>柠条人工林>白羊草群落>刺槐人工林。2) 4种典型植被样地地表枯落物蓄积量和土壤中枯落物混入量均为坡下高于坡上, 受径流冲刷和泥沙分离—输移—沉积过程的影响, 枯落物地表蓄积量和土壤混入量在坡中波动较大; 随枯落物地表盖度的增加, 地表枯落物蓄积量呈指数函数增加($P<0.01$), 且随地表枯落物蓄积量的增加, 土壤中枯落物混入量呈对数函数增加($P<0.01$)。3) 土壤容重、粘结力和水稳性团聚体几何平均直径(*WAS-GMD*)随土壤中枯落物混入量的增大而线性降低($P<0.01$), 土壤有机碳和全氮含量在铁杆蒿群落和白羊草群落中均随土壤中枯落物混入量的增大而线性增加($P<0.05$)。该研究将为评价黄土高原退耕还林还(草)工程生态成效、修正土壤侵蚀预报模型提供重要依据。

关键词: 土壤中枯落物; 枯落物蓄积量; 坡位; 土壤性状; 黄土丘陵区

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2018)11-2020-12

枯落物是生态系统的重要组成部分, 是植物器官枯死后作为分解者的物质和能量来源、维持生态系统功能的所有有机质的总称^[1]。枯落物在生态系统的物质循环、能量流动和信息传递等过程中具有重要作用^[2]。枯落物蓄积量受群落结构、植被类型、空间区域、植被年限等因素的影响, 表现出较强的差异性^[3-6]。大量的研究表明^[7-8], 作为典型的地被物, 地表枯落物具有截留降雨、减缓径流冲刷、降低降水侵蚀力、提高土壤入渗、减少地表水分蒸发、涵养水源的作用; 同时, 其积累和分解为土壤提供大量有机质^[9-10], 促进植物根系发育, 增加土壤孔隙度, 改良土壤结构^[11-13], 对土壤的物理、化学、生物过程产

收稿日期: 2017-11-14; 修订日期: 2018-01-30。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771555); 国家自然科学基金重点项目(41530858); 国家重点研发计划(2016YFC0501703); 陕西省创新人才推进计划—青年科技新星项目(2017KJXX-88)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No. 41771555 and 41530858; National Key R & D Program of China, No. 2016YFC0501703; The Innovative Talents Promotion Plan in Shaanxi Province, No. 2017KJXX-88.]

第一作者简介: 王忠禹(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。E-mail: 15091860140@163.com

***通信作者简介:** 刘国彬(1958-), 男, 研究员, 主要研究方向为流域治理与植被恢复。E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

生重要的影响^[14]。也有研究发现地表枯落物通过降雨击溅、泥沙沉积以及土栖动物活动3种途径进入土体^[15],从而显著提高土壤稳定性、减少水土流失及改善土壤理化性状^[16-17]。

自“退耕还林(草)工程”实施以来,黄土高原丘陵地区约有200万 hm^2 的坡耕地转变为林草地^[18]。随着植被的逐渐恢复,近地表特征发生了显著变化,原先裸露的地表被植物及其枯落物所覆盖。有关植被恢复过程中枯落物蓄积量及其水土保持功能已有大量研究,但多集中于地表枯落物,有关枯落物土壤混入量、坡面分布特征及其对土壤理化性状影响的相关研究较少^[15-17,19]。基于此,本研究选取黄土高原丘陵沟壑区典型林、灌、草植被样地,调查不同立地条件下枯落物地表蓄积量及土壤中混入量,研究枯落物坡面分布特征,分析枯落物混入土壤对土壤理化性状的影响,为评估黄土高原退耕还林还(草)工程生态成效提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究相关试验在陕西省延安市安塞区水土保持综合试验站及纸坊沟流域(36°46′28″~36°46′42″N,109°13′03″~109°16′46″E)进行。研究区属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,多年平均温度为8.8℃,年均降雨量499mm(安塞站,2000—2016年),6—9月降水量占全年降水的70%以上^[20]。主要土壤类型为黄绵土及红胶土,其有机质含量低,土壤结构疏松,极易发生侵蚀。研究区气候属于暖温带半湿润与半干旱过渡区,植被类型为暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原区,常见植被类型以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等为主。

1.2 样地选择

试验于2016年8月中旬进行。依据研究区域植被类型,在中国科学院安塞水土保持综合试验站后山山地试验场及纸坊沟流域选取具有相似坡度、相同坡向的刺槐人工林、柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落4种典型植被坡面样地,样地坡长变化范围为40~80m,坡度在15°~30°之间,海拔为1230±40m,样地内优势物种为所选植被,生长状况较好,受到人类活动影响较小。所选样地撂荒之前均为坡耕地^[21],植被恢复年限均大于25a。样地基本情况见表1。

表1 典型植被样地基本情况

Table 1 The basic information of typical vegetation samples

样地名称	生物量/(g/m^2)	株高/m	林密度/(株/ m^2)	冠幅/m	胸径/cm	伴生物种	坡位坡度/(°)		
							上	中	下
刺槐人工林	115.68±151.70	7.75±1.96	0.17	5.15	13.27±6.31	沙蓬	35	26	22
柠条人工林	303.00±60.14	1.30±0.21	0.31	1.63	—	铁杆蒿	21	16	10
铁杆蒿群落	310.71±55.25	0.28±0.05	—	—	—	旱芦苇	22	31	29
白羊草群落	153.16±36.13	0.23±0.08	—	—	—	铁杆蒿	27	31	18

注:1)坡向都为阳坡;2)乔、灌地上生物量为林下草本生物量;3)“—”表示未调查;4)样本数 $n=20$ 。

1.3 试验设计

对于每种植被样地,从坡上到坡下布设两条平行样线,每条采样线以5~10m为间距进行采样,坡度变化超过5°时适当加密采样点。每条采样线上共计采集10个点,坡上、

坡中和坡下合计取样点数分别为6、8、6。对于每个采样点,设置50 cm×50 cm的样方,调查样方内草本层生物量、地表枯落物(厚度、盖度和蓄积量)及土壤中枯落物(混入深度和混入量)分布情况,测定样方内表层土壤粘结力,同时采集样方内0~5 cm土壤样品用以测定土壤容重、团聚体、质地、有机碳和全氮。

1.4 枯落物的收集

分别采用直尺法和网格法对样方内地表枯落物(自然状态下)的厚度和盖度进行测定。清扫样方,收集样方内全部地表枯落物,进行编号、清洗、烘干(65 ℃, 24 h)、称重,用单位面积地表枯落物烘干质量表示地表枯落物蓄积量(g/m²)。土壤中枯落物集中在表层0~5 cm^[15],对于土壤中枯落物的收集,环刀法取样(内径9.8 cm、高5 cm),根据双对角线规则采集样方内表层0~5 cm土壤,单个样方取土面积为380 cm²,同时利用直尺法测量枯落物土壤混入深度,10次重复。对采集的土壤进行编号,过0.5 mm筛冲洗^[16],浸泡、筛子捞取(分离土粒与石子)、镊子剔除根系、烘干(65 ℃, 24 h)、称重得到0~5 cm层土壤冲洗物,同时采用同样方法收集5~10 cm层冲洗物作为其对照,两者相减后得到土壤表层枯落物混入量。

1.5 土壤中枯落物的区分

首先,土壤中枯落物以未降解或者半降解状态存在。其次,枯落物可能完全混入土壤或者大部分埋在土壤中,扫把清扫不会使其脱离土壤,具体实际状态如图1。

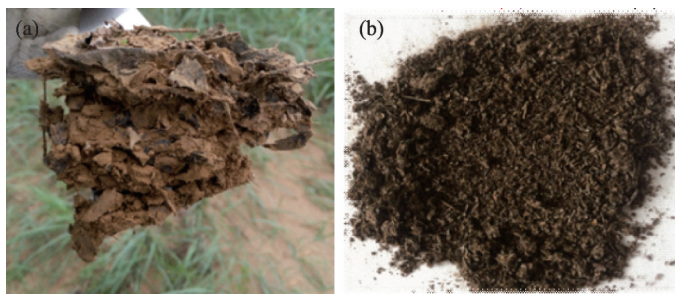


图1 枯落物与土壤混合(a)以及冲洗得到的土壤中枯落物(b)
Fig. 1 Plant litters incorporated in soils (a) and the litters rinsed out from soil (b)

1.6 土壤理化指标的测定

对于每个样方,利用环刀法测定土壤容重、湿筛法^[22]测定土壤水稳性团聚体、重铬酸钾硫酸外加热法测定土壤有机碳^[23]及半微量凯氏法测定土壤全氮^[24],均重复3次。土壤粘结力采用袖珍粘结力仪进行测定(M1-1410e),重复12次。土壤的水稳性采用团聚体几何平均直径(WAS-GMD)描述^[25],按以下公式计算:

$$WAS-GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad (1)$$

式中: x_i 为 i 粒级团聚体平均直径; w_i 为 i 粒级团聚体的重量。

1.7 数据处理与分析

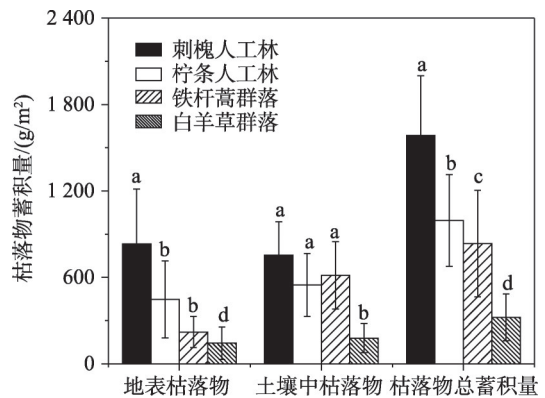
枯落物蓄积量、WAS-GMD、容重、有机碳、粘结力、全氮、C/N差异性比较采用单因素ANOVA方差分析中Duncan多重比较法。各因素之间的相关性运用Pearson双侧检验

进行检验。数据计算和图表制作采用Excel 2016、SPSS 19.0、OriginPro 2016等软件。

2 结果分析

2.1 典型植被枯落物蓄积量特征

刺槐人工林样地地表枯落物蓄积量、盖度和平均厚度均不同程度地高于其他样地(图2、表2)。这是由于乔木冠层发达,具有较高的地上生物量,其地表枯落物蓄积量也相对较多,分别是灌木(柠条人工林)和草地(铁杆蒿群落和白羊草群落)的1.91、3.78和5.47倍;盖度是柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地的1.31、1.75和1.66倍;枯落物厚度是柠条人工林、铁杆蒿群落、白羊草群落样地的1.53、2.14、2.63倍。刺槐人工林、柠条人工林和铁杆蒿群落样地土壤中枯落物混入量差异性不显著,但均显著高于白羊草群落样地(178.80 g/m²),分别是其3.68、3.06和3.43倍。受植被类型及地表枯落物蓄积量的影响,不同样地间土壤中枯落物混入深度也有所不同(0.33~3.50 cm),由大到小依次为刺槐人工林>铁杆蒿群落>柠条人工林>白羊草群落,与土壤中枯落物混入量大小关系一致。



注: 相同字母表示枯落物蓄积量不存在显著差异 ($P>0.05$, $n=20$)。

图2 典型植被样地枯落物蓄积量特征

Fig. 2 The litter volumes in typical vegetation samples

表2 典型植被样地枯落物分布特征

Table 2 The characteristics of litter in typical vegetation samples

样地名称	地表枯落物		土壤中枯落物混入深度/cm
	盖度	厚度/cm	
刺槐人工林	0.14~0.94 (0.66)	0~5.50 (2.03)	0~4.00 (2.29)
柠条人工林	0.19~0.89 (0.48)	0~5.50 (1.32)	0~4.00 (1.68)
铁杆蒿群落	0.14~0.55 (0.36)	0~3.50 (0.95)	0~4.50 (2.14)
白羊草群落	0.19~0.80 (0.38)	0~3.50 (0.77)	0~3.00 (1.33)

注: 1) 表中数据为最小值与最大值, 括号中为平均值; 2) 样本数 $n=20$ 。

受植被类型的影响, 不同样地地表枯落物蓄积量与土壤中枯落物混入量所占比例不尽相同。柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地土壤中枯落物混入量所占比例较大, 分别是地表枯落物蓄积量的1.22、2.77和1.24倍; 而刺槐人工林样地土壤中枯落物混入量所占比例较小, 占其枯落物总量的44.1% (图2)。一方面, 柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地地表枯落物蓄积量总体较低, 对雨滴打击和径流冲刷的抑制作用较弱, 泥沙沉积过程中枯落物相对容易混入土壤; 另一方面, 土壤中枯落物混入量可能存在上限, 当地表枯落物较少时, 土壤中枯落物混入量会随地表枯落物的增加而增加, 但当地表枯落物接近阈值时, 这种关系可能就会变弱, 这也是刺槐人工林样地土壤中枯落物混入量虽然高于其他样地 (分别是其他样地的1.20、1.07和3.68倍), 但所占比例仍较低的主要原因。

2.2 枯落物沿坡面变化特征

受地形、坡面位置和植被类型等因素的影响,各样地枯落物蓄积量沿坡面变化显著。总体而言,4种典型植被样地地表枯落物蓄积量在整个坡面上随盖度的增加而增大,可表示为盖度的指数函数[图3(a)]。刺槐人工林样地具有较高的地上生物量,其地表枯落物蓄积量在坡上(771.35 g/m²)、坡中(897.93 g/m²)和坡下(808.20 g/m²)均不同程度高于其他样地(图4),分别是柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地的3.54~7.21、1.52~11.70和1.67~3.05倍。4种植被地表枯落物蓄积量随坡位变化表现出不同的变化趋势。刺槐人工林样地地表枯落物蓄积量在不同坡面位置上差异性较小,相对而言,地表枯落物蓄积量在坡中位置出现枯落物堆积点。柠条人工林样地地表枯落物蓄积量表现为坡中大于坡上和坡下,分别是坡上2.72倍,是坡下的1.22倍。铁杆蒿群落和白羊草群落

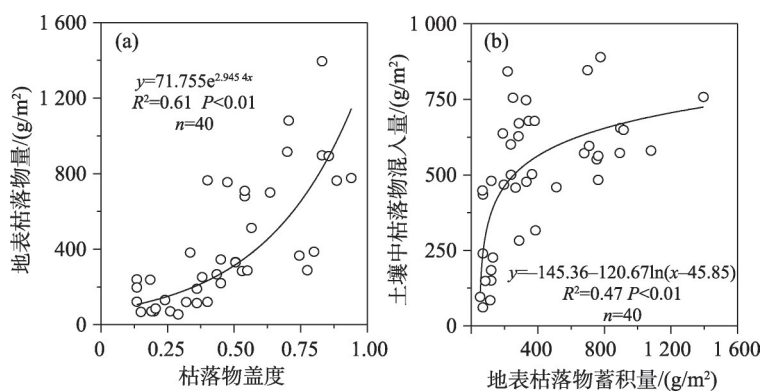
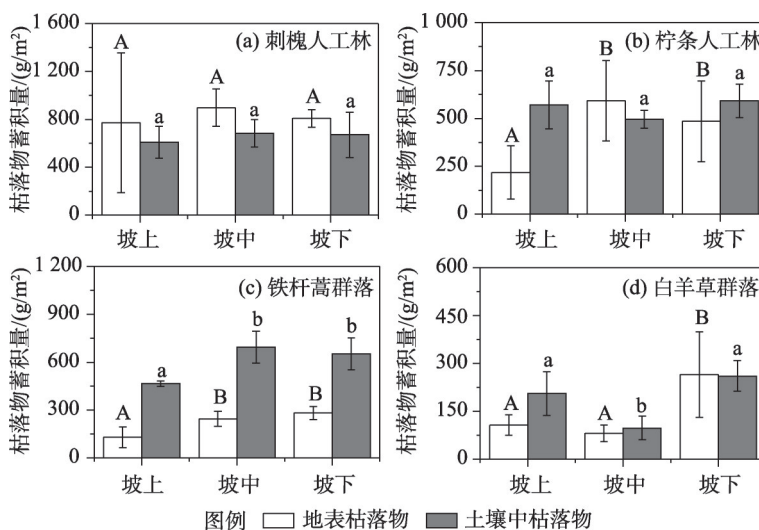


图3 地表枯落物盖度与蓄积量关系(a)以及地表枯落物蓄积量与土壤混入量关系(b)

Fig. 3 Relationships between aboveground litter volume and the coverage (a), litter amount incorporated in soil and aboveground litter volume (b)



注:相同的大写字母表示地表枯落物蓄积量坡面上不存在显著差异($P > 0.05$, $n = 6$);相同的小写字母表示土壤中混入枯落物蓄积量在坡面上不存在差异($P > 0.05$, $n = 6$)。

图4 典型植被样地枯落物蓄积量坡面分布

Fig. 4 The distribution of litter volume on the different slopes of typical vegetation samples

样地地表枯落物蓄积量则表现为坡下最高, 分别是其坡上的2.20和2.48倍, 是坡中的1.15和3.27倍。对于刺槐人工林和柠条人工林样地, 其地表枯落物蓄积量较大, 随径流运移过程中相对容易在中途位置堆积; 而对于草地(铁杆蒿群落和白羊草群落), 地表枯落物蓄积量较小, 径流受到的搬运阻力较小, 运移距离较大, 因而枯落物蓄积量坡下较大; 同时由于禾本科植物白羊草枝叶硬度较低、韧性较高, 水流冲刷过程中枯落物不易聚集, 受坡面径流冲刷时运移距离更大, 这也在一定程度上解释了虽然白羊草群落和铁杆蒿群落地表枯落物蓄积量坡下均高于坡中, 但白羊草群落地表枯落物蓄积量坡下增加幅度更为明显。

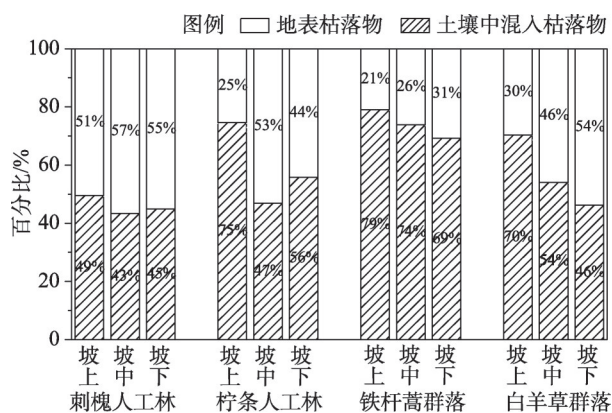
雨滴打击和径流冲刷是枯落物混入土壤的主要驱动因素^[12]。局部地形与枯落物特征间的差异, 导致土壤中枯落物混入量在不同坡面位置上对土壤分离—输移—沉积过程的响应不同。总体而言, 刺槐人工林、柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地土壤中枯落物坡下混入量为670.96、591.98、653.28和260.82 g/m², 均不同程度地高于土壤中枯落物坡上混入量, 分别是其1.10、1.04、1.41和1.27倍。这主要是由于随着坡长的延长, 汇流面积和径流量增大, 对土壤冲刷能力增强, 而地表枯落物的存在, 很大程度上削弱了径流对土壤的冲刷, 造成径流挟沙力下降, 从而导致混有枯落物的泥沙在坡中或坡下堆积。此外, 受到如坡度、枯落物种类、地表枯落物蓄积量、尺寸大小等因素的影响, 不同植被类型坡中土壤中枯落物混入量变化波动较大(97.52~682.43 g/m²)。

不同样地土壤中枯落物混入量占总枯落物蓄积量的比例不尽相同, 且随坡位的不同, 其所占比例差异显著。各样地土壤中枯落物混入量占总枯落物蓄积量的比例整体表现为坡上>坡中>坡下(图5)。如上所述, 地表枯落物是土壤中混入枯落物的来源, 两者表现为土壤中枯落物混入量随地表枯落物蓄积量的增加而呈显著对数函数增加[图3(b)], 地表枯落物随径流的迁移、堆积一定程度上增加了土壤中混入枯落物的量, 但也正是由于地表枯落物的迁移和堆积, 土壤中枯落物混入量不可能无限增加, 从而导致土壤中枯落物混入量占总枯落物蓄积量的比例随坡长的增加而减小。

2.3 枯落物混入土壤对土壤性状的影响

2.3.1 枯落物混入土壤对土壤物理性质的影响

土壤理化性状在不同植被样地间存在一定差异。土壤容重以白羊草群落样地最大, 为1.28 g/m³, 分别是刺槐人工林、柠条人工林和铁杆蒿群落样地的1.23、1.07和1.12倍(表3)。不同样地间土壤粘结力与土壤容重表现出相同的变化趋势, 白羊草群落样地土壤粘结力仍然最大, 为14.76 kPa, 分别是刺槐人工林、柠条人工林和铁杆蒿群落样地的1.24、1.04、和1.14倍。*WAS-GMD*是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标, 其值越



注: 样本数 $n=6$ 。

图5 典型植被样地枯落物不同坡面位置上百分比

Fig. 5 Percentage of litter on the different slopes of typical vegetation samples

表3 典型植被样地的土壤物理性状特征

Table 3 The soil physical properties of typical vegetation samples

样地名称	容重/(g/cm ³)	粘结力/kPa	WAS-GMD/mm
刺槐人工林	1.04 ± 0.10 ^a	11.89 ± 1.77 ^a	0.33 ± 0.12 ^a
柠条人工林	1.20 ± 0.08 ^b	14.22 ± 1.09 ^{bc}	0.37 ± 0.16 ^a
铁杆蒿群落	1.14 ± 0.05 ^a	12.96 ± 1.72 ^{ab}	0.50 ± 0.18 ^a
白羊草群落	1.28 ± 0.08 ^b	14.76 ± 1.27 ^c	1.02 ± 0.48 ^b

注：相同小写字母表示同列比较不存在显著差异 ($P>0.05$, $n=20$)。

大表示团聚体的平均粒径团聚度越高，土壤水稳定性越大^[21]。各样地 WAS-GMD 表现为白羊草群落样地显著高于其他 3 种植被样地 ($P<0.05$)，一定程度表明白羊草植被本身能更显著地提高表层土壤稳定性，增强土壤抗冲性。一方面，土壤依靠枯落物层分解产生的有机质，使土壤的物理特性得到改善，促进土壤团聚体的形成^[26]，另一方面，白羊草为须根根系，大都分布在表层，根系分泌物能有效改善土壤团聚体结构，提高土壤团聚体稳定性^[27-29]。

土壤中枯落物显著影响不同植被样地土壤物理性质。同一植被样地样方间，4 种典型植被样地的土壤容重、粘结力、WAS-GMD 与土壤中枯落物混入量相关性较弱 ($P>0.05$)，在小范围尺度上，土壤中枯落物对土壤物理性质影响表现不明显。而在同一植被样地不同坡面位置上，刺槐人工林、柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地土壤容重 (1.01~1.25 g/m²) 坡下均不同程度地低于坡上，分别较其坡上减少了 15.58%、7.82%、5.73% 和 1.54%，这与土壤中枯落物坡下高于坡上的关系相一致。同样，与土壤中枯落物混入量在坡面上大小关系类似，刺槐人工林、柠条人工林和铁杆蒿群落样地粘结力 (8.15~15.67 kPa) 坡下也均不同程度地高于坡上，分别高出其 19.24%、3.5% 和 9.1%；但在白羊草群落样地土壤粘结力则表现为坡上>坡中>坡下，这可能与土壤中混入枯落物量差异有关。各样地 WAS-GMD 与坡面位置没有显著关系，可能是由于各样地混入土壤中的枯落物和植物根系存在差异，从而影响团聚体的形成。在不同植被样地，土壤容重、粘结力和 WAS-GMD 与土壤中枯落物混入量均呈现极显著线性关系 ($P<0.01$)，且随着土壤中枯落物混入量的增大而不同程度地降低 (图 6)。

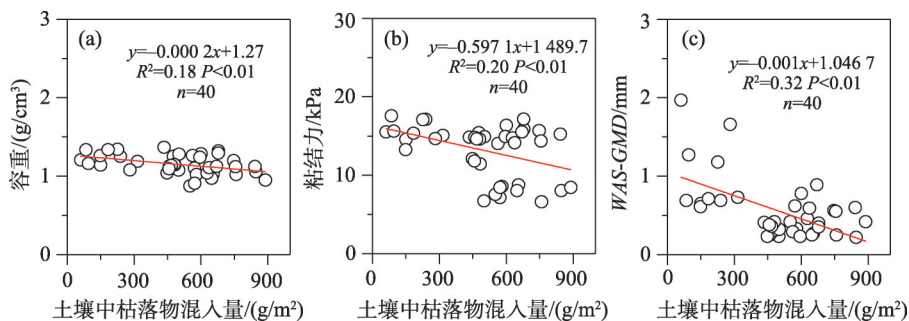


图6 土壤中枯落物混入量与容重 (a)、粘结力 (b) 和 WAS-GMD (c) 的关系

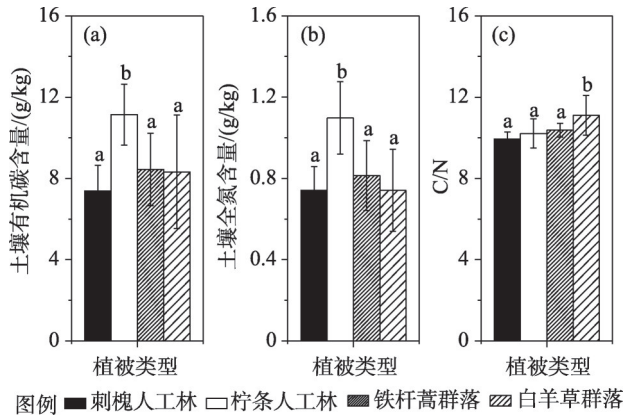
Fig. 6 Relationships between litter amount incorporated in soil and bulk density (a), cohesion (b) and average geometric diameter (WAS-GMD, c)

2.3.2 枯落物混入土壤对土壤养分的影响

枯落物分解是土壤养分的重要来源。柠条人工林样地土壤有机碳和全氮均最高 [图 7

(a)、(b)], 其中土壤有机碳分别是刺槐人工林样地、铁杆蒿群落样地和白羊草群落样地的 1.51、1.32 和 1.34 倍, 全氮是刺槐人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地的 1.48、1.35 和 1.48 倍。这主要是由于柠条根系分泌的有机酸可以降低根际的 pH 值, 活化根际土壤的难溶性养分, 提高养分有效性, 增加土壤有机碳含量^[30]; 同时, 柠条根部大量的根瘤菌能固定空气中游离态氮, 增加土壤氮含量^[27]。刺槐虽然也属于豆科植物, 但其土壤有机碳和全氮含量最低, 这主要是由于刺槐根系分布在相对较深层土壤, 对表层土壤养分影响较弱。刘增文等^[31]、李鑫等^[32]研究表明草地枯落物养分回流土壤速率高于乔木, 且枯落物蓄积量与土壤养分关系密切。在本研究中, 铁杆蒿群落和白羊草群落样地土壤养分受土壤中枯落物混入量的显著影响 ($P < 0.05$), 且随着土壤中枯落物混入量的增大, 土壤有机碳和全氮均呈线性增加 [图 8(a)、(b)]。

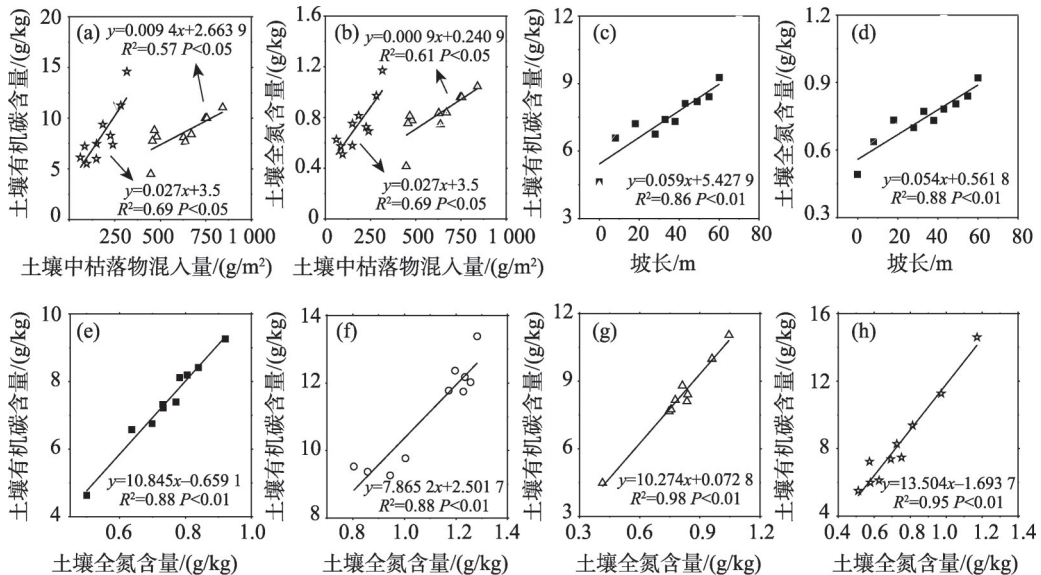
除柠条人工林样地土壤有机碳和全氮坡下略低于坡中外 (分别减少 1.8% 和 0.6%), 其他 3 种植被样地土壤有机碳和全氮均表现为坡下 > 坡中 > 坡上, 其中土壤有机碳含量



图例 ■ 刺槐人工林 □ 柠条人工林 ▨ 铁杆蒿群落 ▩ 白羊草群落
注: 相同的小写字母表示样地间有机碳、全氮、C/N 不存在显著差异 ($P > 0.05$, $n = 10$)。

图 7 典型植被样地土壤养分特征

Fig. 7 The distribution characteristics of soil nutrients in typical vegetation samples



图例 ■ 刺槐人工林 □ 柠条人工林 △ 铁杆蒿群落 * 白羊草群落

注: 样本数 $n = 10$ 。

图 8 典型植被样地坡面土壤养分关系

Fig. 8 The relationships between soil nutrients in typical vegetation samples

坡下是坡中和坡上的0.98~1.17和1.04~1.40倍,全氮含量坡下是坡中和坡上的0.99~1.15和1.17~1.37倍。此外,刺槐人工林样地土壤有机碳和全氮均随坡长的增大而线性增加[图8(c)、(d)]。白羊草群落样地土壤有机碳和全氮表现为坡下>坡上>坡中,其中土壤有机碳含量坡下是坡中和坡上的1.89和1.52倍,全氮含量坡下是坡中和坡上的1.72和1.36倍。

C/N是土壤质量的敏感指标,是表征土壤养分循环和营养水平的重要指标^[33-34]。较低的C/N往往表示土壤中微生物活性较高,枯落物分解较快^[35]。刺槐人工林样地C/N最低[图7(c)],为9.93,为柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落样地的96.97%、95.66%、89.38%。这主要是由于刺槐样土壤中枯落物混入量较高,为微生物提供了更多的能量来源,微生物活性提高,从而导致C/N降低。进一步分析表明[图8(e)、(f)、(g)、(h)],各样地坡面土壤有机碳含量与全氮呈现极显著线性关系($P<0.01$),一定程度上验证了自然界有机碳、全氮输入与输出的同步性^[35-36]。

3 结论

本文系统研究了黄土丘陵区典型刺槐人工林、柠条人工林、铁杆蒿群落和白羊草群落地表枯落物和土壤中枯落物的差异及其坡面分布特征,分析了枯落物混入土壤后对土壤理化性状的影响,得到了以下主要结论:

1) 地表枯落物的蓄积量变化范围为143.89~844.04 g/m²,且枯落物蓄积量、盖度和厚度由大到小均为刺槐人工林>柠条人工林>铁杆蒿群落>白羊草群落;土壤中枯落物混入量变化范围为178.80~657.21 g/m²,分别占其枯落物总蓄积量的45.9%~74.0%,因此枯落物混入土壤这一现象不容忽视。

2) 刺槐人工林样地地表枯落物蓄积量在坡上(771.35 g/m²)、坡中(897.93 g/m²)和坡下(808.20 g/m²)均不同程度高于其他样地;4种典型植被样地坡下枯落物混入量均不同程度地高于坡上,而坡中枯落物混入量坡中变化波动较大;土壤中枯落物混入量与地表枯落物蓄积量关系密切,两者之间存在显著对数函数关系($P<0.01$, $n=40$)。

3) 容重、粘结力和WAS-GMD与土壤中枯落物混入量均存在显著线性关系($P<0.01$, $n=40$),且随着土壤中枯落物混入量的增大而不同程度地降低;相比乔、灌植被,草地中(铁杆蒿群落和白羊草群落)枯落物养分回流率较高,随着土壤中枯落物混入量的增大,土壤有机碳和全氮均线性增加($P<0.05$, $n=10$)。

参考文献(References):

- [1] 刘强,彭少麟.植物凋落物生态学[M].北京:科学出版社,2010.[LIU Q, PENG S L, The Ecology of Vegetation Litter. Beijing: Science Press, 2010.]
- [2] 林波,刘庆,吴彦,等.森林凋落物研究进展[J].生态学杂志,2004,23(1):60-64.[LIN B, LIU Q, WU Y, et al. Research progress of forest litter. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(1): 60-64.]
- [3] 赵勇,吴明作,樊巍,等.太行山针、阔叶森林凋落物分解及养分归还比较[J].自然资源学报,2009,24(9):1616-1624.[ZHAO Y, WU M Z, FAN W, et al. Comparison of nutrient return and litter decomposition between coniferous and broad-leaved forests in hilly region of Taihang Mountains. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1616-1624.]
- [4] 孙元发,吴铭.黑河地区不同优势树种林下枯落物量的比较[J].防护林科技,2014,32(8):38-39.[SUN Y F, WU M. Comparing the litter amounts under dominant tree species of Heihe District. Protect Forest Science and Technology, 2014, 32(8): 38-39.]
- [5] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):

- 48-53. [LUAN L L, ZHANG G H, SUN L, et al. Spatial variation of typical plant litters in the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(6): 48-53.]
- [6] FACELLI J M, PICKETT S T. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure [J]. *The Botanical Review*, 1991, 57(1): 1-32.
- [7] 吴钦孝. 森林保持水土机理及功能调控技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 42-57. [WU Q X. *Soil and Water Conservation Mechanism and Function Regulation and Control Technology in Forest*. Beijing: Science Press, 2005: 42-57.]
- [8] 韩冰, 吴钦孝, 刘向东, 等. 林地枯枝落叶层对溅蚀影响的研究 [J]. *防护林科技*, 1994, 19(2): 7-8. [HAN B, WU Q X, LIU X D, et al. Influence of litter layer on splashing in forest land. *Protect Forest Science and Technology*, 1994, 19(2): 7-8.]
- [9] 邱甜甜, 刘国彬, 王国梁, 等. 人工油松林不同生长阶段深层土壤有机碳和活性碳的差异及其影响因素 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(8): 1399-1409. [QIU T T, LIU G B, WANG G L, et al. Changes of organic carbon and readily oxidable carbon in deep soil at different developmental stages of artificial *Pinus tabulae* form is plantation and the impact factors. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(8): 1399-1409.]
- [10] 许中旗, 李文华, 许晴, 等. 人为干扰对典型草原土壤碳密度及生态系统碳贮量的影响 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(4): 621-629. [XU Z Q, LI W H, XU Q, et al. The impacts of human disturbances on soil carbon density and ecosystem storage of carbon of typical steppes. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(4): 621-629.]
- [11] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究 [J]. *林业科学*, 2003, 39(1): 168-172. [ZHAO H Y, WU Q X, LIU G B. Study on soil and water conservation function of litter layer of artificial Chinese pine in Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(1): 168-172.]
- [12] 郭忠升, 吴钦孝, 任锁堂. 森林植被对土壤入渗速率的影响 [J]. *陕西林业科技*, 1996(3): 27-31. [GUO Z S, WU Q X, REN S T. Effect of forest vegetation on soil infiltration rate. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 1996(3): 27-31.]
- [13] 逯军峰. 不同林龄油松人工林凋落物及其对土壤理化性质的影响研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007. [FENG J F. *Litter of Pinus tabulaeformis Plantations on Different Ages and Their Impact on Soil Physical and Chemical Properties*. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007.]
- [14] 李强, 周道玮, 陈笑莹, 等. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用 [J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819. [LI Q, ZHOU D W, CHEN X Y, et al. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 3807-3819.]
- [15] TSUKAMOTO J. Downhill movement of litter and its implication for ecological studies in three types of forest in Japan [J]. *Ecological Research*, 1991, 6(3): 333-345.
- [16] LI Z W, ZHANG G H, GENG R, et al. Spatial heterogeneity of soil detachment capacity by overland flow at a hillslope with ephemeral gullies on the Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 264-272.
- [17] KNAPEN A, POESEN J, DE BEATS S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices [J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(2): 425-440.
- [18] DENG L, SHANGGUAN Z P, SWEENEY S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau [J]. *China Scientific Reports*, 2014, 4: 7039
- [19] 李学斌, 陈林, 樊瑞霞, 等. 围封条件下荒漠草原4种典型植物群落枯落物输入对土壤理化性质的影响 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2015, 41(1): 101-110. [LI X B, CHEN L, FAN R X, et al. Effect of litter input on physico-chemical properties of soil in four typical plant communities of desert steppe under confining conditions. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2015, 41(1): 101-110.]
- [20] 朱良君, 张光辉, 胡国芳, 等. 坡面流超声波水深测量系统研究 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 235-239. [ZHU L J, ZHANG G H, HU G F, et al. Study on evaluating ultrasonic measurement system of overland flow depth. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 235-239.]
- [21] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2013, 38(14): 1725-1734.
- [22] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62: 1367-1377
- [23] 向云, 程曼, 安韶山, 等. 延河流域不同立地条件下植物-枯落物-土壤生态化学计量学特征 [J]. *自然资源学报*,

- 2015, 30(10): 1642-1652. [XIANG Y, CHEN M, AN S H, et al. Soil-plant-litter stoichiometry under different site conditions in Yanhe Catchment, China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(10): 1642-1652.]
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2007. [BAO S D. *Analysis of Soil Agriculture*. The 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2007.]
- [25] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 705-712. [HOU X N, LI H, ZHU L B, et al. Effect of biochar and straw addition on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 705-712.]
- [26] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 828-838. [MAO X L, LU K P, HE L Z, et al. Effects of long-term fertilization application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 828-838.]
- [27] 吕刚, 魏忠平, 高英旭, 等. 不同土地利用类型植物根系与土壤抗蚀性关系研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(2): 111-115. [LÜ G, WEI Z P, GAO Y X, et al. Study on relationship between plant roots and soil anti-erodibility of different land utilization types. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 111-115.]
- [28] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 等. 植被与水土流失关系研究进展 [J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 3137-3143. [XU X L, MA K M, FU B J, et al. Research review of the relationship between vegetation and soil loss. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3137-3143.]
- [29] 从怀军, 成毅, 安韶山, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复措施对土壤养分和微生物量C, N, P的影响 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 217-221. [CONG H J, CHENG Y, AN S S, et al. Changes of soil nutrient and soil microbial biomass C, N and P in different plant rehabilitation on the loess hilly area of Ningxia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 217-221.]
- [30] 安韶山, 黄懿梅. 黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究 [J]. *林业科学*, 2006, 42(1): 70-74. [AN S S, HUANG Y M. Study on the ameliorate benefits of *Caragana korshinskii* shrubwood to soil properties in loess hilly area. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(1): 70-74.]
- [31] 刘增文, 王乃江, 李雅素, 等. 森林生态系统稳定性的养分原理 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(12): 129-134. [LIU Z W, WANG N J, LI Y S, et al. Nutrient principle of forest ecosystem stability. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science)*, 2006, 34(12): 129-134.]
- [32] 李鑫, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36(3): 1084-1091. [LI X, ZENG Q C, AN S S, et al. Ecological stoichiometric characteristics in leaf and litter under different vegetation types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China. *Environmental science*, 2015, 36(3): 1084-1091.]
- [33] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 58-67. [REN S J, CAO M K, TAO B, et al. The effects of nitrogen limitation on terrestrial ecosystem carbon cycle: A Review. *Progress in Geography*, 2006, 25(4): 58-67.]
- [34] 肖玉, 谢高地, 安凯. 青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值 [J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2367-2378. [XIAO Y, XIE G D, AN K. The function and economic value of soil conservation of ecosystems in Qinhai-tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2367-2378.]
- [35] 陶朋闯, 陈效民, 靳泽文, 等. 生物炭与氮肥配施对旱地红壤微生物量碳、氮和碳氮比的影响 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 231-235. [TAO P C, CHEN X M, JIN Z W, et al. Effects of biochar combined with nitrogen fertilizers on microbial biomass C, N and carbon-to-nitrogen ratio of upland red soil. *Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 231-235.]
- [36] 孙龙, 张光辉, 栾莉莉, 等. 黄土丘陵区表层土壤有机碳沿降水梯度的分布 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 532-538. [SUN L, ZHANG G H, LUAN L L, et al. Distribution of soil organic carbon in surface soil along a precipitation gradient in loess hilly. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2): 532-538.]

Distribution of Plant Litter on the Slope and Its Effect of Litter Incorporated in the Soil on Soil Properties in Typical Vegetation Community in Loess Hilly Region

WANG Zhong-yu¹, WANG Bing^{1,2}, LIU Guo-bin^{1,2}, LIU Jia-xin¹, LI Zhao-song¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resource, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The plant litter incorporate in soil generally has great effect on soil properties. During the process of vegetation restoration in the hilly region of the Loess Plateau, the distribution of plant litter would be changed and hence affect the soil property. Four typical vegetation communities, *Robinia pseudoacacia* plantation, *Caragana intermedia* plantation, *Artemisia gmelinii* community and *Bothriochloa ischaemum* community were selected to study the distribution of litter on the slope (ranged from 40 to 80 m) and to discuss the effects of plant litter incorporated in soil on soil properties. The results showed that: 1) The volume (range from 143.89 to 833.04 g/m²), coverage (range from 36% to 63%) and thickness (range from 0.77 to 2.03 cm) of aboveground litter in *Robinia pseudoacacia* plantation were the highest, followed by those in *Caragana intermedia* plantation, *Artemisia gmelinii* community and *Bothriochloa ischaemum* community. For the biomass of incorporated litter (ranged from 178.80 to 657.21 g/m²) and the litter incorporation depth (ranged from 1.33 to 2.29 cm), the maximum values were found in *Robinia pseudoacacia* plantation, then followed by those in *Artemisia gmelinii* community, *Caragana intermedia* plantation and *Bothriochloa ischaemum* community. The amount of litter incorporated in soil accounts for the highest proportion of the total volume of litter (ranged from 45.91% to 74.02%). The vegetation communities with the ratio of the amount of litter incorporated in soil to total litter volume in descending order were *Artemisia gmelinii* plantation, *Caragana intermedia* plantation, *Bothriochloa ischaemum* community, and *Robinia pseudoacacia* community. 2) The aboveground litter volume and the amount of litter incorporated in soil on lower slopes were 1.05–2.48 times and 1.04–1.41 times higher than those on higher slope. While for the middle slope, the aboveground litter volume and the amount of litter incorporated in soil varied greatly and no significant relationship was found between middle slope and upper slope or lower slope due to the influence of runoff scouring and the process of sediment detachment, transport and deposition. The aboveground litter volume increased exponentially with the increase of litter coverage ($P < 0.01$). The amount of litter incorporated in soil increased with the aboveground litter volume, and the relationship between them is a logarithm function ($P < 0.01$). 3) With the increasing of litter incorporated in soil, soil properties of bulk density, cohesive force and *WAS-GMD* decreased linearly ($P < 0.01$). The soil organic carbon and total nitrogen content increased linearly with the increase of litter incorporated in soil in grasslands (*Artemisia gmelinii* community and *Bothriochloa ischaemum* community), while no significant relationship was found between *Robinia pseudoacacia* plantation and *Caragana intermedia* plantation. This study would provide theoretical basis for assessing ecological effect of vegetation restoration and improving soil erosion model on the Loess Plateau.

Key words: plant litter in soil; plant litter volume; slope position; soil property; loess hilly region