

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170219

长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征

丁康¹ 徐学选^{1,2} 陈文媛¹ Shahmir Ali Kalhoro¹

(1 西北农林科技大学水土保持研究所 2 中国科学院水利部水土保持研究所)

摘要:黄土塬边坡的水土流失一直是一个重要热点问题而得到广泛关注。本文以长武塬边坡的刺槐、侧柏和草地3种植被类型为研究对象,于2016年5月测定了3类样地0~30 cm土壤的水稳性团聚体组成、有机碳含量(SOC)及土壤稳定入渗率(SIR)等土壤物理性质,探讨不同植被类型下土壤团聚体和入渗特征的差异性。结果表明:刺槐林地表层0~30 cm土壤水稳性团聚体的平均质量直径(MWD)、分形维数(D)、SOC及SIR的测定结果为:2.63 mm、2.60、5.62 g/kg和10.40 mm/min;侧柏林地分别为3.67 mm、2.60、4.87 g/kg和5.41 mm/min;草地分别为2.44 mm、2.58、6.07 g/kg和12.45 mm/min。结果表明:草地和刺槐林地的土壤结构性状相对优良,SOC高且入渗能力强,有利于长武塬边坡地区的水土保持,侧柏林地虽具有的大团聚体塑造能力,但其土壤SOC和入渗能力相对较低,不利于降水的就地入渗。因此,建议适度种植常绿性(侧柏)树种,合理配置该地区退耕还林还草植被类型。

关键词:长武塬边坡; 植被类型; 土壤团聚体; 土壤入渗率

中图分类号: S714.2; S157 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2017)12-0044-08

DING Kang¹; XU Xue-xuan^{1,2}; CHEN Wen-yuan¹; Shahmir Ali Kalhoro¹. **Soil aggregates and infiltration characteristics under different vegetations in Changwu tableland slope of northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017) 39(12) 44-51 [Ch 33 ref.]

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, P. R. China;

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100, P. R. China.

Soil and water loss in loess tableland slope had been widely concerned as a hot issue. In this paper, sites with three vegetation types (*Robinia pseudoacacia*, *Platycladus orientalis* and grassland) located in Changwu tableland slope of northwestern China were chosen as research objects. Our aim is to explore the effects of different vegetation types on soil aggregates and infiltration capacity, the mean weight diameter (MWD) and fractal dimension (D) of soil water-stable aggregates in layer of 0-30 cm, the soil organic carbon content (SOC) and the steady infiltration rate (SIR) were measured on May 2016. The results showed that: the MWD and D of soil water-stable aggregates in layer of 0-30 cm, SOC and SIR in the site of *R. pseudoacacia* land were 2.63 mm, 2.60, 5.62 g/kg and 10.40 mm/min, respectively; in *P. orientalis* land, they were 3.67 mm, 2.60, 4.87 g/kg and 5.41 mm/min; in the grassland, they were 2.44 mm, 2.58, 6.07 g/kg and 12.45 mm/min. Results showed that soil structure, organic carbon content and infiltration capacity of grassland and *R. pseudoacacia* land performed better than that of *P. orientalis* land, and were beneficial to the conservation of soil and water in Changwu tableland slope. *P. orientalis* land showed the advantage of shaping large aggregates, while its soil organic carbon content and water infiltration capacity were relatively low and not advantaged for rainfall infiltration. So it is recommended to plant evergreen tree (*Platycladus orientalis*) moderately, and design rational distribution

收稿日期: 2017-06-16 修回日期: 2017-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471439,41171421)。

第一作者: 丁康。主要研究方向: 流域管理。Email: dingkang92@163.com 地址: 712100 陕西杨凌西农路26号西北农林科技大学水土保持研究所。

责任作者: 徐学选, 博士, 研究员。主要研究方向: 流域水文。Email: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

of different vegetation types in this area.

Key words Changwu tableland slope; vegetation type; soil aggregates; soil infiltration rate

黄土高原沟壑区作为黄土高原两大地貌类型之一,长久以来都是土壤侵蚀较为严重的地区,是黄土高原治理水土流失的重点所在^[1-2]。从 20 世纪 90 年代退耕还林还草工程实施以来,黄土高原的植被得到了很好的恢复和建设,显著的遏制了当地严重的水土流失^[3]。植被恢复使土壤性质产生了相应的变化,许多研究表明,植被恢复过程中土壤有机质积累及根系作用等改善了土壤结构,根系分泌物及其腐烂形成的有机质使土壤团聚体含量、土壤有机碳含量及土壤抗蚀性等指标均得到了提高,同时显著减少了水土流失^[4-5]。而土壤团聚体可以通过其粒径分布和稳定性来影响土壤孔隙分布,进一步影响降雨向土壤内部的运移方式与途径^[6]。因此,土壤团聚体的研究对于区域水土保持工作具有重要意义。而目前对黄土高原沟壑地区相同恢复年限常绿/落叶、乔木/草本植被类型下的土壤团聚体稳定性差异的研究还较少。本文在黄土高原沟壑区王东沟小流域塬坡部位,选取当地常见的刺槐(*Robinia*

pseudoacacia)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、草地坡段为研究对象,研究 3 种植被类型条件下土壤团聚体和入渗能力的差异性,以揭示不同植被治理条件下土壤性质的改善状况,为该地区进一步优化植被类型配置提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中南部地区陕西省长武县王东沟小流域(35°12′~35°16′N、104°40′~107°42′E),海拔 940~1 220 m,面积 8.3 km²,属暖温带半湿润大陆性季风气候区,是典型的雨养农业区,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d,多年平均降水量 584 mm,春季少雨,夏季多雨,主要集中在 7—9 月。本试验布设在王东沟小流域的塬坡部位,共选取 3 类样地,包括冬季落叶的刺槐林地、常绿的侧柏林地和草地,均位于西坡向相近坡位,土壤类型为黄绵土,植被恢复年限均约为 20 年,样地调查情况见表 1。

表 1 样地基本信息表

Tab. 1 Basic information of experimental plots

植被类型 Vegetation type	群落组成 Community component	树高 Tree height/ m	胸径 DBH/ cm	坡度 Slope/ (°)	林冠层 郁闭度 Canopy density	灌草层 盖度 Undergrowth coverage	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density/ (tree·ha ⁻¹)
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	刺槐 + 花椒 + 大枣 + 旱地芦苇 <i>Robinia pseudoacacia</i> + <i>Zanthoxylum bungeanum</i> + <i>Ziziphus jujuba</i> + <i>Phragmites australis</i>	8 ± 1.5	10 ± 2.3	21.3	0.95	0.85	2 150
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	侧柏 + 花椒 + 蛇葡萄 + 铁杆蒿 <i>Platycladus orientalis</i> + <i>Zanthoxylum bungeanum</i> + <i>Ampelopsis heterophylla</i> + <i>Artemisia gmelinii</i>	6 ± 1.1	9 ± 1.8	22.3	0.8	0.4	2 667
草地 Grassland	隐子草 + 草地风毛菊 + 铁杆蒿 <i>Cleistogenes</i> spp. + <i>Saussurea amara</i> + <i>Artemisia gmelinii</i>	-	-	19.9	-	0.95	-

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的采集及处理

实验于 2016 年 5 月中旬进行采样,每类样地选取 3 个土壤性质相近的样点,用大铝盒分别采集 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 3 个层次的原状土样,每个样点 3 次重复。将原状土用小刀沿自然裂隙切成 1 cm 左右的小块后自然风干。取风干后土样 500 g 进行干筛,称质量获得 <0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、2~5 mm、>5 mm 的各粒级土壤团聚体的质量。按照干筛法获得的各粒级团聚体比例配制 50 g 风干土样,放入团聚体分析

仪湿筛 1 min 后取出,再用蒸馏水将筛子上的团聚体清洗到烧杯中,得到 <0.25 mm、0.25~0.5 mm、0.5~1 mm、1~2 mm、2~5 mm、>5 mm 各粒级的水稳性团聚体,沙浴烘干后称质量,计算各粒级土壤水稳性团聚体百分比。

采用重铬酸钾法测定有机碳含量,烘干法测定土壤密度,使用马尔文激光粒度仪测定土壤的机械组成,总孔隙度依据土壤密度和比重计算得出,各样地的土壤基本性质见表 2。

1.2.2 土壤入渗实验

土壤入渗试验于 2016 年 5 月 7—15 日进行,使

用圆盘入渗仪(Disc permeameter)分别对3类样地进行测定,每个样地重复5次以上。实验时选择平整样地,修剪样方上的植被,清理出半径10 cm的平地,将半径为10 cm,高3 mm的铁环放在测定位置上并压紧,环内铺满细沙,平整后将铁环移走;用注射器调节恒压管的水位,设置水位(ψ)。在本实验中 ψ 设定为0 cm的水柱;给蓄水管吸水,并检查圆盘入渗仪气密性。记录蓄水管中水位高度,并记录水温,将其放在沙层上,与沙面紧密接触;打开阀门,等湿润锋通过沙层后开始计时。前1.5 min,每隔10 s记录数据;1.5 min到3 min,30 s计时1次;3 min后,每隔1 min记录1次,连续记录直到稳定入渗。

1.2.3 数据分析

综合已有研究结果^[7-9],采用平均质量直径(MWD)、分形维数(D)来描述团聚体的特征。计算公式为:

$$m_i = M_i / M_T \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i m_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2)$$

$$\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} = \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

$$\lg \left[\frac{M(r < \bar{R}_i)}{M_T} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right) \quad (4)$$

式中: m_i 为第*i*级团聚体质量所占的百分比, M_i 为

第*i*级水稳性团聚体的质量, M_T 为各粒级团聚体的总质量, \bar{R}_i 为第*i*级团聚体的平均直径, R_{\max} 为水稳性团聚体的最大粒径, $M(r < \bar{R}_i)$ 为粒径小于 \bar{R}_i 的团聚体质量。

1.2.4 数据处理

使用Microsoft Excel 2010进行数据整理,SPSS 19进行统计分析,最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检验,Pearson相关分析法进行相关分析,Sigmaplot12.5进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤基本物理性质比较

由表2可知,3种植被类型土壤的砂粒含量在33%~48%之间,粉粒含量在36%~46%之间,黏粒含量在15%~22%之间,均属于黄绵土。但3种植被类型土壤性质存在一定差异:土壤黏粒含量表现为刺槐>草地>侧柏,粉粒含量表现为:刺槐>侧柏>草地,砂粒含量表现为:侧柏>草地>刺槐。侧柏林地0~20 cm土层黏粒含量低于刺槐林地和草地。3种植被类型0~30 cm土层的土壤密度均在1.03~1.35 kg/m³之间,且均随深度的增加而增大,与之对应的土壤总孔隙度则随深度增加而降低。不同植被类型土壤密度表现为侧柏>草地>刺槐,土壤总孔隙度则表现为刺槐>草地>侧柏。

表2 样地基本物理性质

Tab.2 Basic physical properties of plots

植被类型 Vegetation type	土层 Soil depth/ cm	土壤机械组成 Soil mechanical composition /%			土壤密度 Soil density/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度 Soil total porosity /%
		砂粒 Sand particle (>0.02 mm)	粉粒 Silt particle (0.02~0.002 mm)	黏粒 Clay particle (<0.002 mm)		
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0~10	43.42	39.76	16.82	1.05	60.38
	10~20	36.14	43.48	20.39	1.15	56.60
	20~30	38.75	41.70	19.55	1.23	53.58
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0~10	44.42	39.67	15.91	1.14	56.98
	10~20	45.38	38.13	16.49	1.23	53.58
	20~30	35.46	44.65	19.89	1.28	51.70
草地 Grassland	0~10	43.20	38.90	17.89	1.10	58.49
	10~20	38.96	41.84	19.20	1.23	53.58
	20~30	39.05	41.44	19.52	1.25	52.83

2.2 不同植被类型土壤团聚体特征

2.2.1 土壤团聚体数量和分布

由表3可知,0~30 cm土层中刺槐林地和草地土壤均以<0.25 mm粒级的团聚体含量最高,侧柏林地以>5 mm粒级的团聚体含量最高。相同土层不同植被类型条件下土壤水稳性团聚体各粒级的组

成比例表现出一定的差异。侧柏林地>5 mm粒级团聚体含量显著高于刺槐林地和草地,<0.25 mm粒级团聚体含量除20~30 cm土层外,均显著小于刺槐林地。0.25~5 mm之间的4个粒级,除2~5 mm粒级团聚体含量无显著差异外,其他3个粒级团聚体含量多表现为侧柏林地显著小于刺槐林地和

草地。此外 0.25 ~ 5 mm 之间粒级团聚体的总含量 也表现为侧柏林地显著小于刺槐林地和草地。

表 3 3 种植被类型土壤水稳性团聚体质量百分含量

Tab. 3 Percentage of mass of soil water stable aggregates under three vegetation types

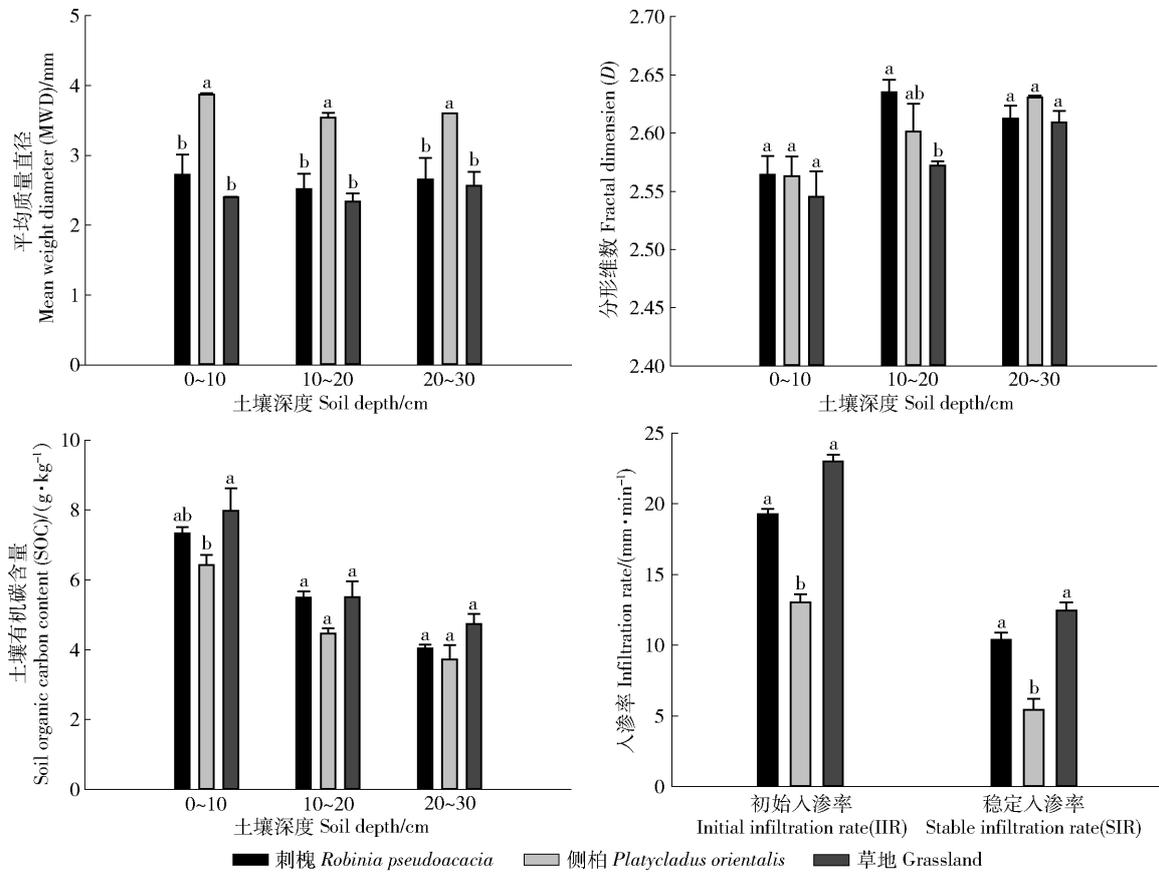
土层 Soil depth/cm	植被类型 Vegetation type	粒级 Size/%						
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	0.25~5 mm
0~10	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	24.62 ± 3.69b	14.7 ± 1.74a	14.19 ± 1.53ab	11.94 ± 1.54a	7.48 ± 0.48a	27.08 ± 0.78a	48.31 ± 4.35a
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	42.07 ± 1.11a	13.13 ± 1.68a	10.50 ± 1.11b	6.76 ± 0.20b	4.63 ± 0.32b	22.91 ± 1.15b	35.03 ± 2.27b
	草地 Grassland	19.57 ± 1.46b	14.47 ± 2.57a	17.54 ± 2.07a	13.16 ± 0.48a	8.75 ± 1.11a	26.51 ± 1.81ab	53.93 ± 3.22a
10~20	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	24.85 ± 1.89b	9.96 ± 1.32a	9.57 ± 1.02b	10.74 ± 0.97b	10.13 ± 0.71a	34.74 ± 1.53a	40.40 ± 1.69b
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	39.30 ± 1.47a	9.86 ± 1.50a	8.55 ± 1.29b	8.00 ± 0.50c	7.29 ± 0.24b	27.01 ± 1.97b	33.70 ± 3.38c
	草地 Grassland	20.33 ± 1.41b	11.55 ± 0.70a	15.36 ± 1.32a	13.99 ± 0.49a	9.89 ± 1.44a	28.89 ± 0.49b	50.79 ± 1.62a
20~30	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	26.10 ± 3.84b	11.07 ± 1.76a	10.14 ± 0.94a	11.04 ± 0.51a	10.13 ± 0.71a	31.53 ± 1.21a	42.37 ± 3.57a
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	40.83 ± 0.28a	8.83 ± 0.54a	7.67 ± 0.01b	6.98 ± 0.16b	6.12 ± 0.07b	29.57 ± 0.18a	29.60 ± 0.46b
	草地 Grassland	25.31 ± 2.50b	9.54 ± 1.07a	11.06 ± 0.81a	12.14 ± 0.52a	10.48 ± 1.07a	31.47 ± 0.62a	43.22 ± 3.12a

注: 同列不同小写字母表示不同植被类型土壤水稳性团聚体含量之间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: different letters in the same column mean significant differences at $P < 0.05$ level among the water stable aggregate contents under different vegetation types.

2.2.2 土壤团聚体稳定性

由图 1 可知 3 种不同植被类型条件下土壤水稳性团聚体的 MWD 值随着土层的加深, 表现为先

减小后增加的趋势。在 3 个土层中, 侧柏林地土壤水稳性团聚体的 MWD 值均大于其他两种植被类型, 且表现出显著差异。侧柏林地 3 个土层团



不同字母表示不同植被类型土壤物理性质指标之间差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters in the same column mean significant differences at $P < 0.05$ level between soil physical property indices under different vegetation types.

图 1 3 种植被类型的土壤团聚体平均质量直径、分形维数、土壤有机碳含量、初始入渗率和稳定入渗率

Fig. 1 Mean weight diameter, fractal dimension, content of soil organic carbon, initial infiltration rate and stable infiltration rate under three vegetation types

聚体 MWD 平均值分别是刺槐林地、草地的 1.39 和 1.51 倍。

比较不同植被类型土壤水稳性团聚体的分形维数(图 1)发现,除刺槐的土壤团聚体分形维数随土层加深呈现先增大后减小的趋势,其他两种植被类型的土壤分形维数随土层加深均呈现增大趋势。在相同土层中 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分形维数大小均表现为刺槐>侧柏>草地,20~30 cm 土层分形维数大小表现为侧柏>刺槐>草地,且在 10~20 cm 土层中刺槐的分形维数显著大于草地。

2.3 不同植被类型土壤有机碳含量及入渗能力

由图 1 可以看出,不同植被类型的土壤有机碳含量均随土壤深度的增加而降低。不同植被类型 3 个土层土壤有机碳含量大小顺序均为草地>刺槐>侧柏,且在 0~10 cm 土层中,草地的土壤有机碳含量显著高于侧柏林地,而 10~20 cm 和 20~30 cm 土层差异不显著。

初始入渗率(Initial infiltration rate, IIR)和稳定入渗率(Stable infiltration rate, SIR)是常用来评价土壤入渗能力的指标,本研究选择初始入渗率和稳定入渗率来描述土壤入渗能力。由图 1 可得,3 种不同植被类型的土壤初始入渗率和稳定入渗率均表现出显著差异。土壤初始入渗率和稳定入渗率大小顺序均为草地>刺槐>侧柏,且草地和刺槐林地的初始入渗率和稳定入渗率均显著大于侧柏林地,初始入渗率分别是侧柏林地的 2.6 和 2.3 倍,稳定入渗率分别是侧柏林地的 2.3 和 1.9 倍。

2.4 土壤稳定入渗率与土壤团聚体稳定性指标、有机碳含量的关系

分析土壤稳定入渗率与土壤团聚体稳定性指标、有机碳含量的关系(表 4),发现 SIR 分别与 SOC 和 0.25~5 mm 粒级团聚体含量呈极显著正相关关系,与 D 呈负相关关系,与 MWD 和 >5 mm 粒级团聚体含量呈极显著负相关关系。土壤有机碳和 0.25~5 mm 粒级间团聚体含量越高,土壤结构越好,土壤稳定入渗率越大。>5 mm 粒级团聚体含量越高, MWD 值越大,土壤稳定入渗率越小。

表 4 SIR 与土壤团聚体稳定性指标、SOC 的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis among SIR, indexes of soil aggregate stability and SOC

指标 Index	MWD	D	SOC	粒级 Size	
				>5/mm	0.25~5/mm
SIR	-0.898**	-0.503	0.903**	-0.900**	-0.896**

注:**表示 0.01 的显著水平,*表示 0.05 的显著水平。Notes:** means extremely significant correlation at $P < 0.01$ level,* means significant correlation at $P < 0.05$ level.

3 讨论

3.1 不同植被类型土壤颗粒组成与孔隙度

土壤颗粒组成除受到成土母质、土壤质地、物理化学风化过程影响外,也与不同植被类型密切相关^[10-11]。以往研究表明,黏粒含量高的土壤有利于形成土壤团聚体,形成良好的结构,增加土壤毛管孔隙,增强土壤的持水性^[12-13],即土壤黏粒含量越丰富,则土壤的理化性质就相对活泼。本研究 3 种植被类型中侧柏林地土壤的砂粒含量最高,而黏粒含量最低,表明侧柏林地土壤黏粒颗粒表现出较强的流失损失。而黏粒含量随着深度的增加而增加主要是表层黏粒易随水分入渗转移至土壤深处的原因。土壤密度是土壤密实程度的反映,间接反映土壤孔隙度的大小。本研究中侧柏林地土壤密度最大,总孔隙度最低,土壤结构相对紧密、通气性较差。总体来讲,侧柏林地土壤结构合理性较刺槐林地和草地差。

3.2 不同植被类型土壤团聚体稳定性

不同植被类型影响土壤团聚体的数量和稳定性。侧柏林地 MWD 值大于其它两种植被类型,表明侧柏林地土壤团聚体稳定性较好。主要原因是其 >5 mm 的团聚体含量所占比例较大,土壤团聚体集中分布于较大粒级,中等粒级团聚体数量相对较少。这种趋势虽然使土壤拥有较大 MWD 值,但其过高的团聚体含量和不均匀的团聚体粒级分布会使土壤颗粒产生板结,进一步导致土壤密度的增加和孔隙度的降低,使土壤结构的合理性变差。侧柏的大粒径团聚体含量较高可能是由于侧柏作为常绿针叶树种,表层枯落物相对较少,且土壤微生物活性较阔叶林低,有机物质分解速度较缓慢,长期不易分解的有机质和死细胞为团聚体的形成提供胶结剂,加之根系对土壤团聚体的穿插、挤压和缠绕作用,使得大团聚体含量增加^[14-16]。

草地土壤团聚体的分形维数小于刺槐和侧柏,说明草地土壤结构性状相对优良,草本植被对土壤团聚体结构的改善作用优于乔木,这与赵世伟等^[17]的研究结果一致。主要由于草地土壤荒草凋落物和草根的作用,草地土壤的有机物料输入量大且丰富,尤其是一年生草本植物每年均有大量的根系死亡进入土壤碳循环过程,地上生物量大,盖度较大,加之土壤团聚体稳定性较好,土层的水、热、气等土壤环境有利于微生物的繁殖和生长,对土壤结构的改善能力较强。侧柏林地土壤团聚体分型维数与刺槐林地相比差异并不大,这是由于侧柏林地 <0.25 mm 粒级的团聚体含量相对较低,降低了分形维数,即土

壤颗粒板结现象掩盖了分形特征的指示性。土壤团聚体分形维数(D)随土层加深呈增大趋势,这是由于表层土壤中植物根系较多,孔隙度相对较大,有机碳含量高,对土壤结构的改良能力相对下层土壤强,这与陈文媛等^[18]的研究结果一致。

3.3 不同植被类型土壤有机碳含量

不同植被类型由于有机物料的输出和输入存在差异,导致其土壤物理性状和微生物活性不同,从而对土壤有机碳含量产生影响^[19]。侧柏林地土壤有机碳含量整体较小,主要是由于侧柏林下灌草层盖度较低,枯落物量整体较少,且侧柏叶中的有机碳对于土壤碳库的补充较少,加之其枯落物中含不易降解的树脂、单宁等,导致分解速率降低,分解周期增长^[16-20]。枯落物进入土壤后,分解缓慢导致土壤有机碳含量相对较低。而草地枯落物归还土壤的有机碳量大,刺槐作为阔叶树种其枯落物输入量和分解速度均优于侧柏。

在 3 种植被类型条件下,0~10 cm 表土层中有机碳含量均显著高于 10~20 cm 和 20~30 cm 土层,并且随着土层加深,土壤有机碳含量表现出下降的趋势,这与肖复明等^[21]的研究结果相一致。这是由于植物的叶残体和根系大部分分布于表层土壤中,分解后形成的腐殖质在表层土壤中积累,因而土壤有机碳含量从表层向下递减。

3.4 不同植被类型土壤入渗能力

不同植被类型的土壤入渗能力存在差异^[22-26]。一些学者研究发现在植被恢复过程中草本和灌木的作用优于乔木,更利于提高土壤的稳定入渗率^[27-29]。本研究也表明草地的入渗能力优于刺槐和侧柏林地。侧柏林地的入渗能力显著低于草地和刺槐林地,一方面由于刺槐林地和草地的土壤有机碳含量均较侧柏高;另一方面刺槐林地和草地 0.25~5 mm 之间粒级团聚体含量高,不同粒级团聚体含量分布相对均匀,使土壤孔隙发育良好,更有利于水分的下渗。而侧柏林地土壤中 >5 mm 粒级团聚体所占比例过大,0.25~5 mm 粒级间的团聚体含量较低,土壤团聚体集中分布于较大粒级,如同土壤产生板结,使土壤孔隙度降低,土壤密度增加,会导致入渗能力大大降低。这种趋势与土壤有机质含量低相一致,即缺少了有机质的存在,会使土壤颗粒板结、总孔隙度降低,进一步导致入渗能力降低。

土壤入渗能力大小决定了坡面水力学动力的大小,随着入渗水量的增加,坡面的侵蚀动力得到很好的消减,有利于边坡土壤养分积累与土壤结构改善。从这个角度讲,侧柏不宜在坡度较大的边坡种植。尽管在景观美化方面,常绿树种具有一定的优势,其

种植规模、部位都应得到很好的控制。

3.5 土壤入渗能力和土壤团聚体稳定性指标、有机碳的关系

以往研究表明,土壤入渗性能受土壤密度、孔隙度、有机碳和水稳性团聚体含量等因素的影响^[30-33]。本研究相关性分析表明:土壤有机碳含量增加有利于土壤入渗性能的提高;土壤 >5 mm 粒级团聚体含量越高,MWD 值越大,不利于土壤入渗性能的提高;0.25~5 mm 粒级间团聚体含量的增加有利于土壤入渗能力的提高。综上分析表明土壤不同粒级团聚体含量的分布可通过影响土壤孔隙的发育进而对土壤的入渗性能产生影响,尤其是 0.25~5 mm 粒级间的团聚体含量,其值越高,表明不同粒级团聚体分布越均匀,有利于土壤孔隙度的提高,对土壤入渗能力的提高有积极作用。因此,土壤有机碳含量和土壤中等粒级水稳性团聚体含量均是影响该地区土壤入渗性能的重要因素。

4 结 论

1) 不同植被类型条件下土壤黏粒含量表现为:刺槐~草地>侧柏,粉粒含量表现为:刺槐>侧柏~草地,砂粒含量表现为:侧柏>草地>刺槐,孔隙度表现为刺槐>草地>侧柏。

2) 不同植被类型条件下土壤水稳性团聚体 MWD 值表现为侧柏>草地>刺槐,分型维数 D 表现为侧柏~刺槐>草地,有机碳 SOC 表现为草地>刺槐>侧柏,稳定入渗率 SIR 表现为草地>刺槐>侧柏。

3) 不同植被类型条件下土壤的入渗能力与有机碳含量、0.25~5 mm 粒级间水稳性团聚体含量呈正相关关系,且均达到显著性水平。

4) 草地和刺槐林地的土壤结构性状相对优良,有机碳含量高且入渗性能较好,有利于该地区的水土保持;侧柏林地具有的大团聚体塑造能力,但其土壤有机碳含量和入渗能力相对较低,不利于降水的就地入渗。

黄土高原沟壑区水土保持工作的重点在于降水的就地入渗。建议维持一定的刺槐林地和草地面积,以更好的改善土壤结构,促进降雨的入渗,减少土壤侵蚀。侧柏作为常绿树种,虽有改善区域景观的作用,但其土壤入渗能力较低,不宜大面积种植,宜在侵蚀强度相对弱的区域种植,也可以选择适度混交。

参 考 文 献

- [1] 刘守赞,郭胜利,王小利,等. 植被对黄土高原沟壑区坡地土壤有机碳的影响[J]. 自然资源学报,2005,20(4): 529-536.

- LIU S Z, GUO S L, WANG X L, et al. Effect of vegetation on soil organic carbon of slope land in gully region of Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 529–536.
- [2] 李相儒, 金钊, 张信宝, 等. 黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(4): 248–254.
- LI X R, JIN Z, ZHANG X B, et al. Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development [J]. *Journal of Earth Environment* 2015, 6(4): 248–254.
- [3] JIN Z, CUI B L, SONG Y, et al. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16): 8527–8528.
- [4] 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 96–99.
- YUAN Y R, HAN X Z, LI L J, et al. Effects of soluble root exudates on microbial activity and aggregate stability of black soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 96–99.
- [5] 宋日, 刘利, 马丽艳, 等. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2009, 32(3): 93–97.
- SONG R, LIU L, MA L Y, et al. Effect of crop root exudates on the size and stability of soil aggregate [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2009, 32(3): 93–97.
- [6] DUKER S W, FLANAGAN D C, LAL R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain [J]. *Catena*, 2001, 45(2): 103–121.
- [7] VAN BAVEL C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14: 20–23.
- [8] SUNDQUIST E T. The global carbon dioxide budget [J]. *Science*, 1993, 259: 934–941.
- [9] LUO Y Q, SU B, CURRIE W S, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide [J]. *BioScience*, 2004, 54(8): 731–739.
- [10] MONTERO E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182(3/4): 305–315.
- [11] 于东明, 胡小兰, 张光灿, 等. 江子河小流域不同植被类型土壤粒径的多重分形特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 79–85.
- YU D M, HU X L, ZHANG G C, et al. Multifractal analysis on soil particle size distribution for different vegetation types in Jiangzihe small watershed [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5): 79–85.
- [12] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 154–159.
- WANG X, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution of different forest soil in Simian Mountains, Chongqing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 154–159.
- [13] 华瑞, 徐学选, 张少妮, 等. 不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究 [J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 206–209.
- HUA R, XU X X, ZHANG S N, et al. The research of soil particle fractal characteristics of forestland and grassland with different restoration years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 206–209.
- [14] 孙娇. 黄土丘陵区植被恢复下土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- SUN J. Soil aggregates stability and its carbon, nitrogen, phosphorus ecological stoichiometry characteristics under vegetation restoration in loess hilly region [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [15] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34–37, 117.
- LIU D H, LI Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 34–37, 117.
- [16] 张冀, 汪有科, 吴钦孝. 黄土高原几种主要森林类型的凋落及其过程比较研究 [J]. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 91–94.
- ZHANG J, WANG Y K, WU Q X. Comparison of litterfall and its process between some forest types in Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(5): 91–94.
- [17] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 等. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 27–28, 69.
- ZHAO S W, SU J, YANG Y H, et al. Influence of the soil structure in loess hilly region of southern Ningxia under different man-made vegetation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 27–28, 69.
- [18] 陈文媛, 徐学选, 华瑞, 等. 黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1486–1492.
- CHEN W Y, XU X X, HUA R, et al. Effects of forestlands and grasslands on soil aggregates under different vegetation restoration ages in loess hilly region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1486–1492.
- [19] 罗友进, 魏朝富, 李渝, 等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(1): 257–266.
- LUO Y J, WEI C F, LI Y, et al. Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 257–266.
- [20] 田茂洁. 川中人工纯柏林凋落物分解动态研究 [J]. *生态学报*, 2005, 24(10): 1147–1150.
- TIAN M J. Decomposition and nutrient release of pure *Cupressus* forest litter in Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1147–1150.
- [21] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳储量影响研究 [J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 131–134, 181.
- XIAO F M, FAN S H, WANG S L, et al. Moso bamboo plantation soil aggregate stability and its impact on carbon storage

- [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 131–134, 181.
- [22] MCQUEEN D J, SHEPHERD T G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand [J]. *Soiland Tillage Research*, 2002, 63(3/4): 93–107.
- [23] 饶良懿, 朱金兆, 毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(1): 33–37.
RAO L Y, ZHU J Z, BI H X. Hydrological effects of forest litters and soil in the Simian Mountain of Chongqing City [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(1): 33–37.
- [24] 王云琦, 王玉杰. 缙云山典型林分森林土壤持水与入渗特性 [J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(3): 102–108.
WANG Y Q, WANG Y J. Soil water retaining capacity and infiltration property of typical forests in the Jinyun Mountain [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(3): 102–108.
- [25] 葛东媛, 张洪江, 王伟, 等. 重庆四面山林地土壤水分特性 [J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 155–160.
GE D Y, ZHANG H J, WANG W, et al. Soil water characteristics of forestlands in the Simian Mountains of Chongqing, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 155–160.
- [26] NERIS J, JIMÉNEZ C, FUENTES J, et al. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. *Catena*, 2012, 98: 55–62.
- [27] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 529–535.
WANG G L, LIU G B, ZHOU S L. The effect of vegetation restoration on soil stable infiltration rates in small watershed of loess gully region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 529–535.
- [28] 李贵玉, 徐学选, 王俊华, 等. 黄土丘陵区不同植被下土体入渗性能研究 [J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 27–30.
LI G Y, XU X X, WANG J H, et al. The comparing study on soil infiltration of vegetation land in hilly area of Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(3): 27–30.
- [29] 高朝侠, 徐学选, 宇苗子, 等. 黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1578–1584.
GAO Z X, XU X X, YU M Z, et al. Impact of land use types on soil macropores in the loess region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1578–1584.
- [30] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
JIANG D S. Soil erosion and control models in the Loess Plateau [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1997.
- [31] FILHO C C, LOURENÇO A, DE F GUIMARÃES M, et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil [J]. *Soiland Tillage Research*, 2002, 65(1): 45–51.
- [32] ZHANG G S, CHAN K Y, OATES A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage [J]. *Soiland Tillage Research*, 2007, 92(1/2): 122–128.
- [33] FRANZLUEBBERS A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth [J]. *Soiland Tillage Research*, 2002, 66(2): 197–205.

(责任编辑 范娟
责任编委 孙向阳)