

文章编号: 1001-4675(2011)05-0808-05

黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响*

张侃侃¹, 卜崇峰^{1,2}, 高国雄¹

(1. 西北农林科技大学 资源与环境学院 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用圆盘入渗仪测量6种处理(无生物结皮、生物结皮、长芒草、长芒草+生物结皮、柠条、柠条+生物结皮)下水分的入渗特征,并进行对比分析。结果表明:①无论有、无植被,生物结皮的存在都会阻碍水分的入渗,无生物结皮的稳定入渗速率和累积入渗量均大于有生物结皮;植被的存在,加剧了生物结皮的阻水性。②Kostiakov模型对无结皮、长芒草处理拟合效果好;Philip模型对无结皮、长芒草、柠条、柠条+长芒草处理拟合效果好;Horton模型对6种处理的水分入渗特征模拟效果较好,Horton模型适合描述黄土高原的水分入渗特征。

关键词: 生物结皮; 土壤水分; 入渗速率; 累积入渗量; 入渗模型; 神木县; 陕西; 黄土高原

中图分类号: S152.7 文献标识码: A

黄土高原属于中温带半干旱气候,是我国乃至世界上水土流失最为严重的地区,且伴随有严重的风蚀,属于风蚀水蚀交错地带⁽¹⁻²⁾。在全球气候变化和人类活动的影响下,黄土高原生态退化严重,加重了水土流失。自实施退耕还林、还草工程后,由于气候和水分的适宜,退耕地上很快出现大面积的生物结皮⁽³⁾。

生物结皮是指由隐花植物和土壤微生物组成的生长在土壤表面及表土以下的复合体⁽⁴⁻⁵⁾。生物结皮中含有复苏植物,具有脱水、复苏机制。干旱季节,即使细胞失去近90%的水分,也可以以休眠的方式度过旱季。当水分适宜时,可以在24h内恢复生命代谢活动,迅速繁殖⁽⁶⁾。它能在干旱、瘠薄、高温等恶劣的环境中生存繁殖,在热带和寒带的干旱及半干旱地区分布广泛,在某些地区其覆盖度在70%以上,是干旱和半干旱地区生态系统演替中的重要环节⁽⁷⁻⁹⁾。由于生物结皮的特殊生存、固定、沉积土壤的能力,增强了黄土高原地区的抗风蚀水蚀能力⁽¹⁰⁻¹²⁾。因此,生物结皮成为今后治理黄土高原水土流失的有效方法⁽¹³⁾。

生物结皮对水分入渗的影响仍然存在争议。美国学者Brotherson J D认为,生物结皮的存在减少了水分入渗,使水分分布浅层化⁽¹⁴⁾。而St Clair L L研究的结果完全相反,认为生物结皮可以增加水分的入渗速率和深度⁽¹⁵⁾。而目前对生物结皮的研究主

要集中在沙漠地区,沙漠地区与黄土高原地区的生存状况差异明显,由于植被覆盖、水分、地形、温度、土壤的理化性质都会影响生物结皮演替速率和途径,其研究成果不能直接应用到黄土高原地区⁽¹⁶⁻¹⁸⁾。因此,进行黄土高原地区生物结皮水分入渗效应的研究很有必要。

本实验分析了有无生物结皮、生物结皮与草本植物和生物结皮与木本植物对水分入渗的影响。其理论成果将为利用生物结皮治理黄土高原地区的水土流失工作提供积极的指导作用。

1 研究区概况

实验地位于陕西省神木县六道沟流域(110°21′~110°23′E, 38°46′~38°51′N),海拔1081~1274m,北依长城,地处毛乌素沙漠边缘。该地区为片沙覆盖的梁峁状丘陵区。年平均气温8.4℃,无霜期169d,平均降雨量437.9mm,平均干燥度1.8,属中温带半干旱气候区,年内降雨变化很大,6~9月降雨量占全年的77.4%。该区是水蚀风蚀交错地带,也是农牧交错地带,是进行水土保持研究的理想区域。植被类型为达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等沙生植物,以及柠条(*Korshinsk peashrub*)、沙柳(*Salix psammophila*)等灌木。因此,采用长芒草和柠条做为实验植物。

* 收稿日期: 2010-08-18; 修订日期: 2010-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701096); 中国科学院西部之光(B28013200); 西北农林科技大学科研专项(QN2009085)

作者简介: 张侃侃(1986-),男,山西临汾人,在读硕士,主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: zhangkan568@163.com

通讯作者: 卜崇峰. E-mail: buchongfeng@163.com

2 试验方法

2.1 试验设置

本实验采用圆盘入渗仪法, 相比传统的双环法具有省时、对表土的扰动少、读数准确的特点⁽¹⁹⁾。6 种处理分别为无结皮、生物结皮、长芒草、长芒草 +

生物结皮、柠条、柠条 + 生物结皮。其所含生物结皮均从同一点移植而来, 以真藓 (*Bryum argenteum*) 和尖叶对齿藓 (*Didymodon constricta* var. *constricta*) 为优势种的苔藓结皮。土壤的入渗能力与土壤容重和含水率密切相关。本实验取 0 ~ 5 cm 的土壤测其容重和含水率(表 1)。

表 1 6 种处理的土壤容重和含水率

Tab.1 Soil bulk density and moisture content under 6 kinds of treatments

处理类型	无结皮	生物结皮	长芒草	长芒草 + 生物结皮	柠条	柠条 + 生物结皮
土壤容重/(g · cm ⁻³)	1.30	1.38	1.36	1.43	1.40	1.35
土壤含水率/%	10.80	10.48	16.16	8.30	7.93	9.74

2.2 实验步骤

(1) 选取采样点, 除去地表物, 取土测量土壤容重和含水率。

(2) 将圆盘入渗仪(直径为 15 cm) 放入水桶中浸泡, 确保其气密性。

(3) 检验气密性, 然后在取土点附近利用圆盘入渗仪测量。0 ~ 3 min 每 15 s 读数 1 次, 3 ~ 10 min 每 30 s 读数 1 次, 以后每分钟读数 1 次。30 min 左右达到稳定入渗, 累积入渗量即为施加水量。每种处理测量 2 次, 取平均值。

3 结果分析

3.1 单纯生物结皮对入渗的影响

图 1 显示, 有、无生物结皮的情况下, 初始入渗速率都很大, 随着时间的推移, 入渗速率急剧下降。大约 10 min 后入渗速率趋于稳定。有生物结皮存在时, 初始入渗速率(6.11 mm/min) 低于无生物结皮处理(11.52 mm/min), 稳定入渗速率(1.11 mm/min) 也低于无生物结皮处理(2.13 mm/min), 达到稳定入渗所需时间较长。从表 1 可知, 两者的土壤容重和含水率相差不大, 产生这种结果主要是因为生物结皮的生物组分分泌的物质堵塞了土壤的孔隙, 减少水分通过孔隙的入渗量, 降低了水分入渗速率, 延迟了稳定入渗的出现⁽²⁰⁻²¹⁾。与此对应, 从图 2 可以看出, 30 min 内无生物结皮处理的累积入渗量(1361.57 cm³), 明显高于生物结皮的累积入渗量(517.73 cm³)。再次说明生物结皮有降低水分入渗速率的作用, 减少水分的入渗量。可以推断, 在较长的时间内, 生物结皮的存在使土壤水分趋于浅层化, 可能不利于植物的生长演替。

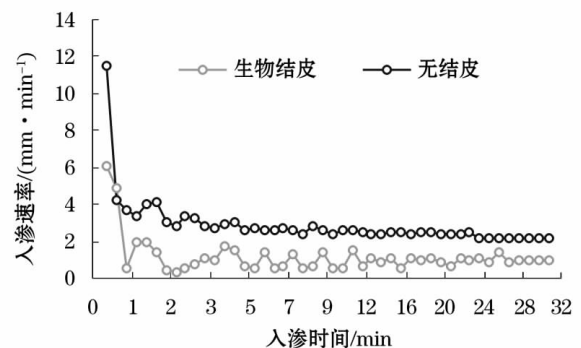


图 1 单纯有无生物结皮的入渗速率

Fig. 1 Infiltration rate under the conditions with or without microbiotic crust

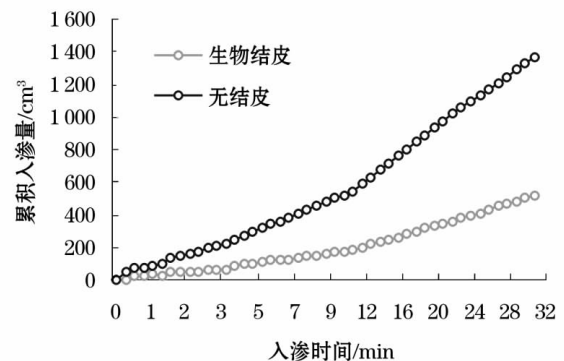


图 2 单纯有无生物结皮的累积入渗量

Fig. 2 Cumulative infiltration under the conditions with or without microbiotic crust

3.2 不同植被下生物结皮对水分入渗的影响

图 3 反映了在长芒草、柠条植被覆盖下有、无生物结皮的水分入渗特征。可以看出, 4 种处理的入渗速率曲线相似, 都呈现“L”型。初始入渗速率较大, 之后急剧降低, 最后达到稳定入渗。初始入渗速率为: 长芒草 + 生物结皮 > 长芒草 > 柠条 > 柠条 + 生物结皮; 稳定入渗速率: 柠条 > 长芒草 > 长芒草 +

生物结皮 > 柠条 + 生物结皮; 累积入渗量: 柠条 > 长芒草 > 长芒草 + 生物结皮 > 柠条 + 生物结皮 (图 4)。相同植被覆盖下, 无生物结皮的稳定入渗速率、累积入渗量都大于有生物结皮的 (表 2)。植被为长芒草时, 有无生物结皮的稳定入渗速率、累积入渗量差异极显著 ($F = 19.34, P < 0.01; F = 12.21, P < 0.01$)。植被为柠条时, 有无生物结皮的稳定入渗速率、累积入渗量差异极显著 ($F = 37.90, P < 0.01; F = 35.21, P < 0.01$)。说明在土壤容重和含水率相差不大且植被相同时, 造成水分入渗速率和入渗量减小的主要因素是生物结皮。

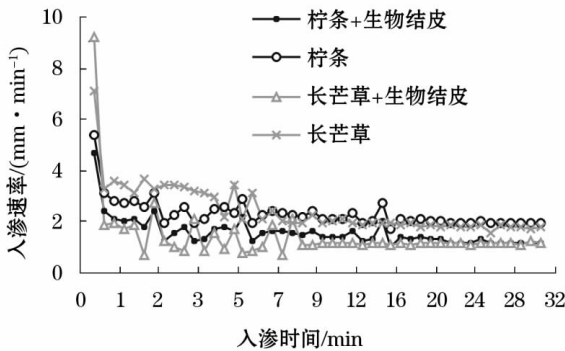


图 3 4 种处理的入渗速率

Fig. 3 Infiltration rate under 4 kinds of treatments

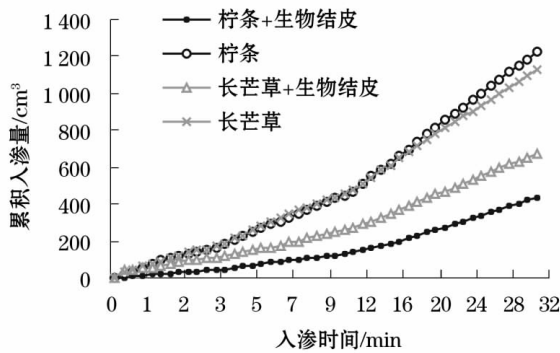


图 4 4 种处理的累积入渗量

Fig. 4 Cumulative infiltration under 4 kinds of treatments

柠条与长芒草相比, 长芒草的初始入渗速率大于柠条, 而稳定入渗速率和累积入渗量小于柠条。主要是因为长芒草的根系较浅, 水分入渗初期, 长芒草的根系吸收水分加快了水分的入渗速率, 当长芒草根区的水分达到饱和后, 对以后的水分入渗影响变小。而柠条正好相反, 柠条扎根深、根系大, 对起始入渗影响小, 对稳定入渗影响大, 根系总吸水量大于长芒草。两者在 30 min 内的累积入渗量差异不显著 ($F = 0.03, P = 0.85$)。

长芒草 + 生物结皮的初始入渗速率、稳定入渗速率、累积入渗量均大于柠条 + 生物结皮, 这种现象

的产生是由于生物结皮对水分入渗起着主导作用。柠条下部的生物结皮生长情况优于长芒草下部的生物结皮, 柠条冠幅大可以给生物结皮提供适宜生长的荫蔽环境, 也能防止风沙侵袭抑制生物结皮的生长。长芒草植株矮而密, 与生物结皮在营养和生存空间上竞争, 生长情况不及柠条覆盖下的生物结皮, 造成两者之间的累积入渗量差异极显著 ($F = 13.35, P < 0.01$)。

表 2 4 种处理的稳定入渗速率和累积入渗量

Tab. 2 Stable infiltration rate and cumulative infiltration under 4 kinds of treatments

处理类型	长芒草	长芒草 + 生物结皮	柠条	柠条 + 生物结皮
稳定入渗速率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.78	1.18	1.92	1.17
累积入渗量/ cm^3	1 124.69	676.69	1 225.22	435.42

3.3 6 种处理的水分入渗特征与模型的拟合

从众多土壤入渗模型中选出 3 种较常用的模型, 对 6 种处理的测量值进行拟合^(4, 22)。3 种模型分别是:

$$\text{Kostiakov 模型: } V = at^{-b} \quad (1)$$

$$\text{Horton 模型: } V = V_1 + (V_0 - V_1)e^{-kt} \quad (2)$$

$$\text{Philip 模型: } V = 0.5st^{-0.5} + m \quad (3)$$

式中: V 为入渗速率 (mm/min), V_0 为初始入渗速率 (mm/min), V_1 为稳定入渗速率 (mm/min), t 为入渗时间 (min); a, b, k, s, m 为实验参数。

拟合结果见表 3。Kostiakov 模型参数少, 比较简便, 但当 $t \rightarrow \infty$ 时, $V \rightarrow 0$ 仅在水平吸渗时出现, 不符合垂直入渗情况, 对本实验的拟合效果不佳。对无结皮、长芒草的拟合效果较好, 决定系数 $R^2 > 0.9$, 而对剩下的 4 种处理拟合效果较差。Horton 模型对 6 种处理的拟合效果都较好, R^2 在 0.83 以上。Horton 模型虽是纯经验性的公式, 但能描述长时间的入渗特征, 在实践中实用性很强。Philip 模型对无结皮、长芒草、柠条、柠条 + 长芒草的拟合效果较好, 决定系数 $R^2 > 0.83$ 。对生物结皮、长芒草 + 生物结皮的拟合效果较差。因为 Philip 模型是在半无限均质土壤、有积水条件下求得, 只适用均质土壤一维垂直入渗的情况, 对非均质土壤不适用, 所以其拟合效果不如 Horton 模型⁽²²⁾。圆盘入渗仪测量时有积水情况, 决定了 Philip 模型比 Kostiakov 模型的拟合效果好。相比之下, Horton 模型更适用于描述 6 种处理的水分入渗特征。

表 3 6 种处理的拟合结果
Tab. 3 The fitted results under 6 kinds of treatments

处理类型	Kostiakov			Horton				Philip		
	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	V_0	V_1	<i>k</i>	R^2	<i>s</i>	<i>m</i>	R^2
无结皮	6.222	0.285	0.906	17.206	2.126	3.688	0.998	6.718	1.317	0.841
生物结皮	2.022	0.259	0.267	11.750	0.922	2.756	0.892	4.201	0.183	0.652
长芒草	5.947	0.323	0.944	4.964	1.864	0.346	0.837	4.883	1.331	0.934
长芒草 + 生物结皮	2.762	0.268	0.425	13.579	1.254	2.569	0.997	4.978	0.288	0.618
柠条	3.846	0.182	0.770	8.367	2.198	2.879	0.832	2.760	1.684	0.834
柠条 + 生物结皮	3.155	0.254	0.770	7.623	1.454	2.879	0.852	2.760	0.939	0.834

4 结论

(1) 生物结皮的存在明显阻碍了水分的入渗, 导致土壤透水性降低。体现在土壤容重和含水率相差不大时, 无生物结皮的初始入渗速率是有生物结皮的 1.88 倍、稳定入渗速率是有生物结皮的 1.91 倍、累积入渗量是有生物结皮的 2.63 倍。

(2) 有植被覆盖时, 生物结皮依然表现出阻碍水分入渗的特性。长芒草处理的稳定入渗速率和累积入渗量分别是长芒草 + 生物结皮处理的 1.52 倍和 1.66 倍。柠条处理的稳定入渗速率和累积入渗量分别是柠条 + 生物结皮的 1.63 倍和 2.81 倍。长芒草 + 生物结皮的初始入渗速率、稳定入渗速率、累积入渗量分别是柠条 + 生物结皮的 198.37%、100.85% 和 155.41%。原因是长芒草覆盖下的生物结皮生长劣于柠条。

(3) 无论有、无植被存在, 生物结皮的存在都会阻碍水分的入渗。较长时间内, 生物结皮的这种减渗效应可能会使土壤水分浅层化, 造成土壤物理干旱, 但这种影响也因植被覆盖状况的不同会有差异。同时, 生物结皮的阻水特征还可能增加地表径流量, 加剧水土流失。据此笔者认为, 对于主要依靠降雨补给水分的黄土高原地区, 如何在生物结皮的“保护”与“破坏”之间寻求平衡, 是值得深入研究的课题。

(4) 由拟合决定系数 R^2 可知, Kostiakov 模型适合无结皮、长芒草处理。Philip 模型适用于无结皮、长芒草、柠条、柠条 + 长芒草处理。但 Horton 模型对 6 种处理的水分入渗特征模拟效果较好。因此, Horton 模型更适合描述黄土高原地区土壤水分入渗特征。

参考文献 (References):

(1) 张军, 秦奋, 邢昱. 黄土高原水土保持措施对下垫面抗蚀力影响分析 (J). 水土保持研究, 2010, 17(1): 50-55. (Zhang Jun,

- Qin Fen, Xing Yu. Influences of soil and water conservation measures on anti-erodibility of underlying surface in Loess Plateau (J). Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 50-55.)
- (2) 邵明安, 马东豪, 朱元骏, 等. 黄土高原土石混合介质土壤水分研究 (M). 北京: 科学出版社, 2010. (Shao Ming'an, Ma Donghao, Zhu Yuanjun, et al. A Study on the Soil Moisture of Earth-rock Mixture Medium in Loess Plateau (M). Beijing: Science Press, 2010.)
- (3) 赵允格, 许明详, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响 (J). 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-447. (Zhao Yunge, Xu Mingxiang, Wang Quanjiu, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau (J). Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 441-447.)
- (4) 王翠萍, 廖超英, 孙长忠, 等. 黄土地表生物结皮对土壤贮水性能及水分入渗特征的影响 (J). 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 54-64. (Wang Cuiping, Liao Chaoying, Sun Changzhong, et al. Effects of biological soil crusts on soil water storage capability and permeability in Loess Area (J). Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 54-64.)
- (5) 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望 (J). 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-24. (Li Xinrong, Zhang Yuanming, Zhao Yunge. Study of biological soil crusts: Recent development trend and prospect (J). Advances in Earth Science, 2009, 24(1): 11-24.)
- (6) 吴楠, 魏美丽, 张元明. 生物土壤结皮中刺叶赤藓质膜透性对脱水、复水过程的响应 (J). 自然科学进展, 2009, 19(9): 942-951. (Wu Nan, Wei Meili, Zhang Yuanming. Leaf erythritol (in the biological soil crusts) membrane permeability response during dehydration and rehydration process (J). Progress in Natural Science, 2009, 19(9): 942-951.)
- (7) Giora J Kidron, Ahuva Vonshak, Aharon Abeliovich. Recovery rates of microbiotic crusts within a dune ecosystem in the Negev Desert (J). Geomorphology, 2008, 100(3/4): 444-452.
- (8) Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management (M). Berlin: Springer, 2003: 281-286.
- (9) 张元明, 曹同, 潘伯荣. 新疆苔藓植物的研究现状与展望 (J). 干旱区研究, 2001, 18(2): 38-41. (Zhang Yuanming, Cao Tong, Pan Borong. The present situation and prospect of bryophyte research in Xinjiang (J). Arid Zone Research, 2001, 18(2): 38-41.)
- (10) Gayel A G, Shtina E A. Algae on the sands of arid regions and their role in soil formation (J). Soviet Soil Science, 1974, 6: 311-319.

- (11) 薛英英. 鄂尔多斯沙区沙漠生物结皮特征的研究(D). 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007. (Xue Yingying. Studies on Desert Microbiotic Crust Characteristics in Erdos Sandland Area (D). Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University 2007.)
- (12) 魏江春. 沙漠生物地毯工程: 干旱沙漠治理的新途径(J). 干旱区研究 2005 22(3): 287-288. (Wei Jiangchun. The new approach to run arid desert-biological carpet project of desert (J). Arid Zone Research 2005 22(3): 287-288.)
- (13) 吴楠, 梁少民, 王红玲等. 动物践踏干扰对生物结皮中微生物生态分布的影响(J). 干旱区研究 2006 23(1): 50-55. (Wu Nan, Liang Shaomin, Wang Hongling et al. Study on the effects of trample of grazed livestock on the ecological distribution of microorganisms in microbiotic crusts in the Gurbantonggut desert (J). Arid Zone Research 2006 23(1): 50-55.)
- (14) Brotherson J D, Rushforth S R. Influence of cryptogamic crusts on moisture relationships of soil in Navajo National Monument, Arizona (J). Great Basin Naturalist 1983 43: 73-78.
- (15) St Clair L L, Johansen J R. Introduction to the symposium on soil crust communities (J). Great Basin Naturalist 1993 53(1): 1-4.
- (16) Hu C X, Liu Y D. Primary succession of algal community structure in desert soil (J). Acta Botanica Sinica 2003 45(8): 917-924.
- (17) 陈兰周, 刘永定, 李敦海等. 荒漠藻类及其结皮的研究(J). 中国科学基金 2003(2): 90-93. (Chen Lanzhou, Liu Yongding, Li Dunhai et al. The research process/progress of desert algae and crust (J). Bulletin of National Natural Science Foundation of China 2003(2): 90-93.)
- (18) Johansen J R. Cryptogamic crusts of semiarid and arid lands of North America (J). Journal Phycology 1993 29(2): 140-147.
- (19) 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究(J). 农业工程学报 2002, 18(4): 54-58. (Xu Mingxiang, Liu Guobin, Bu Chongfeng et al. Experimental study on soil infiltration characteristics using disc permeameter (J). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2002, 18(4): 54-58.)
- (20) 杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮: 荒漠化地区研究的热点问题(J). 生态学报 2001 21(3): 474-480. (Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Zhao Yunjie. Microbiotic soil crust: A research forefront in desertification-prone areas (J). Acta Ecologica Sinica, 2001 21(3): 474-480.)
- (21) Eldridge D J, Greene R S B. Microbiotic soil crusts: A review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia (J). Australian Journal of Soil Research 1994 32: 389-415.
- (22) 赵西宁, 吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述(J). 西北林学院学报 2004, 19(1): 42-45. (Zhao Xining, Wu Faqi. Developments and reviews of soil infiltration research (J). Journal of Northwest Forestry University 2004, 19(1): 42-45.)

Effect of Microbiotic Crust on Soil Water Infiltration in the Loess Plateau

ZHANG Kan-kan¹, BU Chong-feng^{1,2}, GAO Guo-xiong¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: In this study, the disc infiltrometers were used to measure soil water infiltration under 6 kinds of treatments (the regions where there was no microbiotic crust, there was microbiotic crust, *Stipa bungeana* grows, *S. bungeana* grows with microbiotic crust, *Korshinsk peashrub* grows, *K. peashrub* grows with microbiotic crust), and the measured data were compared and analyzed. The results are as follows: (1) Microbiotic crust impeded soil water infiltration whether there was vegetation or not, and the stable infiltration rate and cumulative infiltration were higher in the regions where there was no microbiotic crust than those in the regions where there was microbiotic crust; vegetation increased the capability of resisting soil water infiltration of microbiotic crust; (2) The fitting effect with Kostiakov model under the treatment without microbiotic crust and with *S. bungeana* was fine; that with Philip model under the treatments without microbiotic crust, with *K. peashrub* and *K. peashrub* with *S. bungeana* was fine; and that of water infiltration with Horton model under all 6 kinds of treatments was fine. Therefore, Horton model can be used to describe soil water infiltration in the Loess Plateau.

Key words: microbiotic crust; soil moisture content; infiltration rate; cumulative infiltration; infiltration model; Shenmu County; Shaanxi Province; Loess Plateau