

黄土丘陵水蚀区生物结皮土壤抗冲性试验研究

冉茂勇^{1,2}, 赵允格^{1,3*}, 陈彦芹¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西藏自治区职业技术学院, 西藏 拉萨 850000;

3. 中国科学院水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘要:以典型黄土丘陵沟壑区不同发育年限的生物结皮为研究对象,探索了不同发育年限生物结皮对土壤有机质含量、水稳性团聚体含量、粘结力、容重等与土壤抗冲性有关的理化性质的影响,并与流水冲刷试验结果相结合,揭示水蚀条件下生物结皮的形成对土壤抗冲性的影响,明确生物结皮在研究区退耕还林(草)生态恢复中的地位及作用。结果表明:结皮形成对土壤有机质含量、水稳性团聚体含量、粘结力、容重均产生了影响。土壤抗冲性与结皮有机质含量、粘结力、水稳性团聚体含量呈负相关,与容重呈正相关。有机质含量对结皮土壤抗冲性影响最大,其次为粘结力、水稳性团聚体含量及土壤容重,其中有机质含量对土壤抗冲性的影响达到极显著水平,粘结力对土壤抗冲性的影响达显著水平。

关键词:水蚀区;生物结皮;土壤抗冲性;黄土丘陵区

中图分类号:S152.9

文献标识码:A

文章编号:1001-7461(2009)03-0037-04

Experimental Study on the Soil Anti-scourability of Biological Crust in the Water Erosion Region in Loess Hilly Areas

RAN Mao-yong^{1,2}, ZHAO Yun-ge^{1,3}, CHEN Yan-qin¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Vocational College of Technology of Tibet Autonomous Region, Lhasa, Tibet 850000, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China;)

Abstract: The effects of biological crusts formed in different development periods in the typical loess hilly and gully region on soil physicochemical properties related to soil anti-scourability, such as soil organic matter, aggregates, bond force, bulk density, were studied. The study was combined with the results of scouring experiment to reveal the effect of the formation of biological crust under water erosion conditions on soil anti-scourability, and make sure the function of biological crust in the process of converting cropland to forest and grassland and ecological restoration in the research area. The results were as follows: The formation of crust had effects on soil organic matter, aggregates, bond force, and bulk density. The soil anti-scourability had a negative correlation with crust organic matter, bond force and water-stable aggregates, and had a positive correlation with bulk density. Organic matter was the most influential factor of crust soil anti-scourability, the next was successively bond force, aggregates and soil bulk density. There was a very significant correlation between organic matter and soil anti-scourability, and the effect of bond force on soil anti-scourability reached a significant level.

Key words: water erosion region; biological crust; soil anti-scourability; loess hilly areas

土壤侵蚀是当今重要的环境问题之一,土壤抗冲性是土壤侵蚀研究的重要内容,它是土壤抵抗径流对

土壤的机械破坏和推动下移的能力,其大小主要取决于土粒间和微结构间的胶结力以及土壤结构体间抵

收稿日期:2008-11-02 修回日期:2008-12-24

基金项目:中国科学院“西部之光”人才培养计划项目;西北农林科技大学青年科研骨干支持计划项目

作者简介:冉茂勇,女,在读硕士研究生,主要从事土壤生物结皮研究工作。

* 通讯作者:赵允格,女,博士,副研究员,主要从事土壤生物结皮、土壤水分、养分运移方面的研究工作。

抗离散的能力,与土壤的物理性质及外在的生物因素关系较大^[1-2]。黄土高原是我国水土流失最为严重的区域之一,关于该区的土壤抗冲性,许多学者已从不同角度进行了研究。李勇^[3-4]等测定了黄土高原4种土壤类型的抗冲性,并对其抗冲性进行了等级划分;蒋定生等^[5]研究了土壤抗冲性沿土壤剖面方向的垂直变化规律;刘国彬^[6]分析了天然草地和人工草地强化抗冲性的不同机制等。已有研究在土壤抗冲性区域分布特征、土壤理化性质及生物(以高等植物,特别是其根系为主)因子之间的相互关系等方面取得了重要进展,但就生物因素而言,主要探索了高等维管束植物对土壤抗冲性的影响,而有关苔藓、地衣、藻类等低等植物对土壤抗冲性的影响研究较少。

生物结皮是土壤表面由苔藓、地衣、藻类、细菌等生物组分与其下很薄的土壤共同形成的一个复合生物土壤层^[7]。近年来,随着黄土高原退耕还林(草)工程的实施,生物结皮在该区大面积形成,成为该区普遍存在的地被物。研究表明,生物结皮的形成,一方面可以通过低等植物本身及其根系的缠绕、包裹作用等稳定土壤表面,增强其抗侵蚀性^[8-11]。另一方面,生物结皮还可以显著增加土壤有机质含量,改善土壤团聚性,增加土壤表面粘结力等^[12-14]。目前,关于退耕后黄土区生物结皮抗冲性的研究鲜见报道。本文在野外调查的基础上,采用室内分析与流水冲刷试验相结合,以黄土丘陵水蚀区不同发育年限的生物结皮为研究对象,探索了不同发育年限生物结皮对土壤有机质含量、水稳性团聚体含量、粘结力、容重等的影响,进而与流水冲刷试验结果相印证,揭示水蚀条件下生物结皮的形成对土壤抗冲性的影响,明确生物结皮在研究区退耕还林(草)生态恢复中的地位及作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验主要在中国科学院安塞水土保持综合试验站山地试验场内不同年限退耕坡地上进行。该站位于陕西省安塞县,海拔997~1731 m。地形复杂,梁峁连绵,沟壑纵横,全县水土流失面积2832 km²,占总面积的96%,是黄河中游水土流失重点县之一,也是西北典型生态环境脆弱区。该地属暖温带半干旱季风气候,年平均降水量500 mm左右,降水年度分配不均匀,且多暴雨,7~9月降水量占年降水量的61%,年平均蒸发量1000 mm左右。土壤类型为黄绵土,约占总面积的95%左右,植被类型属森林草原区,天然森林已全遭破坏,森林覆盖率为

17.7%^[15],人工林以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana microphylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,荒坡上主要为白莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等组成的处于不同演替阶段的草本植物群落,多数荒坡因过度放牧成为退化草地^[16],其下普遍存在生物结皮。

1.2 样地选择与样品采集

根据退耕年限,在试验区选择3、7、10、13 a的4个样地,在各样地上选择人为扰动少、生物结皮相对完整、地上植被覆盖基本一致的典型样方。为便于各指标之间的平行对比,在典型样方中同时采集室内分析样与抗冲试验样,采样前剔除植株地上部分及残渣。

1.2.1 抗冲试验样品的采集 用抗冲配套环刀采集抗冲样品,每样地重复12次。取样前,在环刀四壁内涂抹凡士林。采集时将环刀平整地压下,最大限度减少对土壤结皮的破坏,取完后及时将环刀盖盖好,带回试验站用于抗冲试验。

1.2.2 室内分析样品的采集 抗冲样品采集后,在典型样方内选择未受扰动的生物结皮层用于室内分析。其中,有机质含量、容重测定每样地重复取样20次,水稳性团聚体含量测定重复取样4次。另在各样地取揭去结皮后0~5 cm土层的土样作为有机质测定时的对照样品。因为结皮层易碎难取,所以采集时,先用小铁铲沿土壤剖面竖划四界,然后将小铁铲沿结皮层平行托起,这样既避免了样品的破损又便于采集结皮层。

1.3 试验方法

1.3.1 室内分析 结皮容重测定采用涂膜法^[17];有机质含量测定采用外加热-K₂Cr₂O₇容量法;水稳性团聚体含量测定采用丘林法;粘结力测定工作选在雨后进行,在野外用剪切力仪原位测定。

1.3.2 抗冲试验 (1)试验装置。采用张光辉等设计的变坡水槽^[18](图1)。由水槽(5.00 m×0.35 m)、坡度调节架、供水池、沉沙池、闸阀、水泵、环刀(10 cm×5 cm)等组成。试验时,通电水泵上水,水流先进入静水室,然后均匀分散从坡面流下,通过沉沙池循环使用。

(2)抗冲试验方法与观测指标。以该区常见坡度15°作为冲刷坡度,根据预试验,设置2 l·s⁻¹流量进行冲刷。抗冲试验原状土取回后,立即称重(m_1)。试验前,先调节坡度与流量,通电使水泵上水,待水流稳定后,用挡水板挡住土样室水流,将试

验样品装入水槽底部圆形土样室内,观察各样品的冲击反应。对于冲刷有反应的结皮(冲破、冲洞、冲细沟等),记录起始冲刷反应的时间、结皮被大量冲破的时间、结皮连续掉落停止或出水为清水时结束试验时的时间。对于冲刷无反应的结皮,以 30 min 为限停止冲刷,并记录起始冲刷反应时间为 0 s,结束时间为 1 800 s。试验结束后,对于冲刷有反应的结皮,用目测法估计结皮被冲走部分的面积占试验前总结皮面积的百分比,然后将环刀内剩余部分连同环刀一起放入 180℃烘箱,24 h 后再称重,记录土样重量(m_2)。

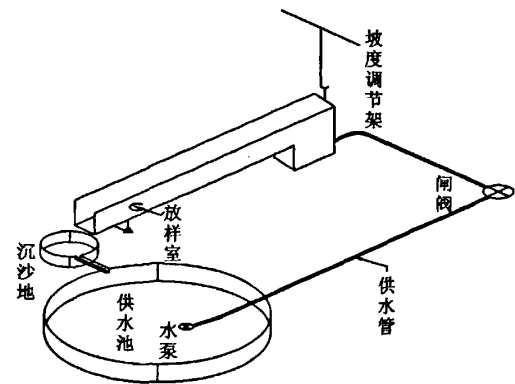


图1 抗冲试验装置示意图

Fig.1 The schematic diagram of anti-scouring test equipment

(3)抗冲性评价指标。试验用平均起始冲揭时间、抗冲时间、冲揭比、侵蚀率4个指标评价生物结

皮土壤的抗冲性。其中,起始冲揭时间(s)指冲刷时结皮开始有冲刷反应的最初时间;抗冲时间(s)为试验结束时所用的时间;冲揭比(%)指试验后用目测法估计结皮被冲走部分面积占试验前总结皮面积的百分比。侵蚀率($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)= $(m_1-m_2)/$ 环刀面积。

2 结果与分析

2.1 生物结皮对土壤理化性质的影响

从表1可以看出,生物结皮的发育与发展对土壤容重、有机质含量、水稳性团聚体含量等都有一定影响。结皮容重随结皮发育年限的延长经历了先增后减的变化过程。在发育初期(3 a),生物结皮发育不完善,土壤有机质积累少,表层土壤容重基本不变;发育 7 a 后,由于人为扰动(翻耕等)减少,使原本粘重的土壤变得更为紧实,孔隙度下降,尤其大孔隙相对减少,故土壤容重增大,发育 10、13 a 后,土壤有机质积累逐步增加,土层变得疏松,大孔隙随之增加,容重逐年下降。

不同发育年限生物结皮对土壤粘结力的影响不同,早期(3 a)结皮厚度、盖度都较小,因而所分泌的胞外聚合物数量少,根系少而小,各根系之间捆绑作用不大,土壤表面粘结力与当地耕地基本相当,随着年限的增加(7~10 a),结皮生长发育旺盛,根系之间联结穿插作用增强,土壤粘结力逐渐增强,退耕 10 a 土壤表面粘结力是发育初期(3 a)的 2~3 倍。但 13 a 后,由于结皮的老化等原因,生物结皮土壤粘结力有所下降。

表1 不同发育年限土壤生物结皮理化性质

Table 1 The physicochemical properties of soil biological crust in different development periods

| 年限/a | 容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 有机质含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 粘结力/ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) | 水稳性团聚体含量/% | | | | |
|------|--|---|--|------------|--------|--------|----------|-------------|
| | | | | >5 mm | 2~5 mm | 1~2 mm | 0.5~1 mm | 0.25~0.5 mm |
| 3 | 1.53±0.23 | 1.23±0.27 | 3.38±0.44 | 86.04 | 1.03 | 1.71 | 1.59 | 1.03 |
| 7 | 1.59±0.25 | 1.27±0.62 | 3.84±0.42 | 92.09 | 1.07 | 1.15 | 1.15 | 1.07 |
| 10 | 1.43±0.16 | 1.53±0.37 | 5.66±0.65 | 94.53 | 0.60 | 1.14 | 0.74 | 0.60 |
| 13 | 1.39±0.15 | 1.61±0.54 | 5.11±0.45 | 93.40 | 0.88 | 1.17 | 1.17 | 0.88 |

生物结皮有机质含量随结皮发育年限的延长而增大。发育初期(3 a),结皮土壤有机质较低,随着年限的延长,有机质含量也逐渐增加,7 a 时土壤有机质含量比 3 a 时有机质含量增加了 0.04 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,13 a 比 10 a 有机质含量增加了 0.26 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同发育年限生物结皮土壤平均有机质含量为 1.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比去结皮土壤增加了 0.66 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。表明结皮的形成提高了土壤有机质含量。

撂荒地表面形成生物结皮后,土壤中的水稳性颗粒组成发生了明显的变化,不同发育年限>5 mm 水稳性团聚体的含量均远远大于小粒级团聚体含

量,其中,>5 mm 水稳性团聚体的含量可以达到 86%以上,而 0.25~0.5 mm 水稳性团聚体的含量约 1%,二者相差甚远。说明生物结皮的存在能使土壤水稳性团聚体由小向大转变。从不同发育年限生物结皮水稳性团聚体比较看,随年限的延长,>5 mm 水稳性团聚体的含量随年限的增加而增加,第 10 a 时达最高水平,之后由于结皮的衰老退化,>5 mm 的水稳性团聚体含量略有减少。表明结皮的形成对>5 mm 的水稳性团聚体的形成具有一定的促进作用。

2.2 不同发育年限生物结皮土壤抗冲性

从图 2 可以看出,结皮平均起始冲揭时间与平均抗冲时间均随结皮发育年限的延长而增加,说明结皮能延长侵蚀突破口和增加抵抗径流冲破的时间,且随着年限的延长,生物结皮抵抗径流冲破的能力逐渐增强。另外,从结皮冲揭比和侵蚀率变化来看(图 3),随着年限的增加,二者都呈降低趋势,说明结皮能减少侵蚀面积和侵蚀流沙量,避免了土壤侵蚀的发生、发展。且随着结皮发育年限的延长,土壤抗侵蚀能力增强。表明结皮的形成和发展提高了土壤抗冲性;图 3 中出现 13 a 生物结皮冲揭比较 10 a 冲揭比高,一方面可能是因为结皮自身存在衰老退化的原因,另一方面可能是目击误差或采样不均所致。

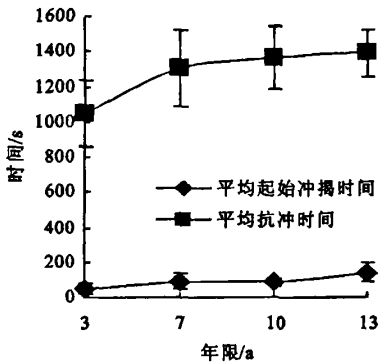


图 2 不同发育年限生物结皮平均起始冲揭时间与平均抗冲时间

Fig. 2 The average start time of scouring-uncover and anti-scouring time of biological crust in different development periods

2.3 生物结皮土壤理化性质与抗冲性的关系

表 2 表明,土壤抗冲性与结皮有机质含量、粘结力、水稳性团聚体含量呈负相关,与容重呈正相关。即土壤抗冲性随有机质含量、粘结力、水稳性团聚体含量的增大而减小,随容重增大而增大。有机质含量对结皮土壤抗冲性影响最大,其次依次为粘结力、水稳性团聚体含量及土壤容重,其中,有机质含量对土壤抗冲性的影响达到极显著水平,粘结力对土壤抗冲性的影响达显著水平。所以,生物结皮提高土壤抗冲性的作用主要表现在生物结皮提高了土壤有机质含量与粘结力,使土壤中的粘结力增强,土壤抗冲性也相应增强。

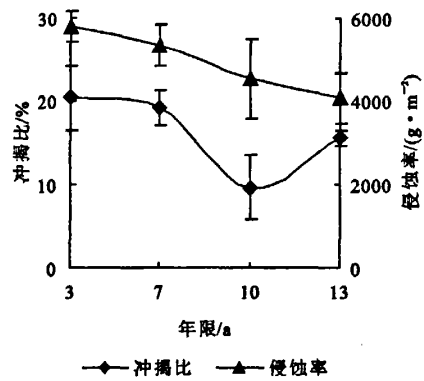


图 3 不同发育年限生物结皮土壤冲揭比与土壤侵蚀率

Fig. 3 The soil scouring-uncover ratio and soil erosion rate of biological crust in different development periods

表 2 土壤侵蚀率与各指标的相关性^①

Table 2 The dependence of soil erosion rate and all indexes

| | 侵蚀率/ (g·m ⁻²) | 容重/ (g·cm ⁻³) | 有机质含量/ (g·kg ⁻¹) | 粘结力/ (kg·cm ⁻²) | 水稳性团聚体 含量/% |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|
| 侵蚀率/(g·m ⁻²) | 1.000 | 0.711 | -0.987** | -0.894* | -0.829 |
| 容重/(g·cm ⁻³) | | 1.000 | -0.794 | -0.609 | -0.215 |
| 有机质含量/(g·kg ⁻¹) | | | 1.000 | 0.917* | 0.764 |
| 粘结力/(kg·cm ⁻²) | | | | 1.000 | 0.840 |
| 水稳性团聚体含量/% | | | | | 1.000 |

①* 相关性显著,** 相关性极显著。

3 结论与讨论

从理化性质分析可以看出,生物结皮的发育与发展对土壤的容重、有机质含量、水稳性团聚体含量等都产生了影响。生物结皮容重随发育年限的延长先增后减;退耕 10 a 土壤表面粘结力是发育初期(3 a)表面粘结力的 2~3 倍。但 13 a 后生物结皮土壤粘结力有所下降;结皮的形成提高了土壤有机质含量,不同发育年限生物结皮土壤平均有机质含量为 1.37 g·kg⁻¹,比去结皮土壤增加了 0.66 g·kg⁻¹。

随年限的延长,有机质含量逐年提高。7 a 土壤有机质含量比 3 a 有机质含量平均增加 0.04 g·kg⁻¹, 13 a 比 10 a 有机质含量平均增加 0.26 g·kg⁻¹;在水稳性团聚体方面,结皮的形成能使土壤团聚体由小向大转变,不同发育年限>5 mm 水稳性团聚体的含量均远远大于小粒级团聚体含量,>5 mm 水稳性团聚体的含量可达到 86% 以上,而 0.25~0.5 mm 水稳性团聚体的含量约 1%。随着年限的增加,>5mm 团聚体含量也增加,表明结皮对大团聚

(下转第 62 页)

料辅助参证模型充分利用了标量通量(本文以 *NEE* 为例)与环境因子资料间的相关关系,在很大程度上保留了 *NEE* 与环境变量间的基本生态学响应关系,因而较传统的非线性回归法能够更为准确的插补出长期缺测通量数据。特别是在数据波动较大的情况下,插补效果差异更为明显。

误差对比分析表明,基于人工神经网络的插补方法在稳定性上优于传统的 MDV 法。虽然随着数据不完备度的增加各种插补方法的累计相对误差都有所增加,但基于人工神经网络插补方法的累计误差增长速度明显低于 MDV 法。

因此,利用人工神经网络进行不完备数据的插补是可行的,值得推荐使用。

参考文献:

- [1] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量的观测原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 255-261.
- [2] FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001a, 107, 43-69.
- [3] PAPAL D, VALENTINI R. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network specialization[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9, 525-535.
- [4] 韩力群. 人工神经网络理论、设计与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007:106-109.
- [5] 张青贵. 人工神经网络导论[M]. 北京:水利水电出版社,2004: 67-77.
- [6] 王玲,朱传保. 人工神经网络用于水文资料的插补延长[J]. 东北师大学报:自然科学版,2002,34(2):106-110.
- [7] 任传友,于贵瑞,王秋凤,等. 冠层尺度的生态光合-蒸腾耦合模型研究[J]. 中国科学 D 辑,2004,34(增):141-151.
- [8] FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001b, 107, 69-71.
- [9] 阎平凡. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 北京:清华大学出版社,2005,34-37.
- [10] 何凯涛,陈明. 用人工神经网络进行空间不完备数据的插补[J]. 地质通报,2005,24(5):476-479.
- [11] 袁志发,黄海燕. 实验设计与分析[M]. 北京:中国农业出版社,2007.
- [12] 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,1997,54-59.
- [13] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报,1998,12(1),93-96.
- [14] 杨晓辉,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.
- [15] LYNCH J M. Interactions between biological processes, cultivation and soil structure [J]. *Plant Soil*, 1984, 76, 307-318.
- [16] GUPTA V V S R, GERMIDA J J. Distribution of microbial biomass and its activity in soil aggregate size classes as affected by cultivation [J]. *Soil Biol. Biochem*, 1988, 20, 777-786.
- [17] BELNAP J. Surface disturbances [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1995, 37, 39-57.
- [18] 朱显谟. 黄土地区植被因素对水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960, 8(2), 110-121.
- [19] 张元明,陈晋,王雪芹. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征[J]. 地理学报,2005,60(1):53-61.
- [20] BEINAP J, GARDNER J S. Soil microstructure in soils of the Colorado Plateau, the role of the cyanobacterium *microcoleus vaginatus* [J]. *Great Basin Nat.*, 1993, 53, 40-47.
- [21] GREENE R S B, CHARTRES C J. The effect of fire on the soil of the degraded semiarid woodland. I. Cryptogam cover and physical micromorphological properties [J]. *Australian J Soil Res*, 1990, 755-777.
- [22] 高旺盛,董孝斌. 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价——以安塞县为例[J]. 自然资源学报,2003,18(2):182-188.
- [23] 李代琼,姜峻,梁一民,等. 安塞黄土丘陵区人工草地水分有效利用研究[J]. 水土保持研究,1996,3(2): 66-74.
- [24] 范文波. 涂膜法测定黄土结皮容重[J]. 山西水土保持科技, 2001, 9(3): 9-10.
- [25] 张光辉,刘宝元,张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学试验研究[J]. 土壤学报,2002,39(6):882-886.

(上接第 40 页)

体的形成具有一定的促进作用。

结皮的起始冲揭时间和平均抗冲时间随退耕年限的增加而增加,冲揭比及侵蚀率均随着年限的增加呈降低趋势。说明结皮形成能延长侵蚀突破口和增加抵抗径流冲破的时间,减少或避免了土壤侵蚀的发生、发展。且随着年限的增加,生物结皮提高土壤抵抗径流冲破的能力逐渐增强。

相关分析表明,土壤抗冲性与结皮有机质含量、粘结力、水稳性团聚体含量呈负相关关系,与容重呈正相关关系。有机质含量对结皮土壤抗冲性影响最大,其次为粘结力、水稳性团聚体含量及土壤容重,其中有机质含量对土壤抗冲性的影响达到极显著水平,粘结力对土壤抗冲性的影响达显著水平。表明生物结皮提高土壤抗冲性主要作用机制表现在提高土壤有机质含量与粘结力,有机质中的土壤胶结物质如胡敏酸、腐殖质等含量增加,使土壤中的粘结力增强,土壤抗冲性也相应增强。土壤抗冲性是各种因素综合作用的结果,在探索影响指标上还需要进一步深入。

参考文献:

- [1] 沈晶玉,周心澄,张伟华,等. 祁连山南麓植物根系改善土壤抗冲性研究[J]. 中国水土保持科学,2004,2(4):87-91.
- [2] 朱显谟. 黄土高原水土蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报,1982(3):40-44.
- [3] 李勇,朱显谟,田积堂,等. 黄土高原土壤抗冲性机理初步研究[J]. 科学通报,1990,35(5):390-393.
- [4] 李勇. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机理初步研究[J]. 中国科学(B辑),1992(3):254-259