

黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮对土壤渗透性的影响

井海梦, 赵允格, 刘姝延, 澹台戇, 周楠, 乔羽

引用本文:

井海梦, 赵允格, 刘姝延, 澹台戇, 周楠, 乔羽. 黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮对土壤渗透性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1532–1539.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1189>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玉米秸秆生物炭及其老化对石灰性农田土壤氨挥发的影响

王朝旭, 陈绍荣, 张峰, 崔建国

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2350–2358 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1727>

富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系 ——以江西丰城为例

韩笑, 周越, 吴文良, 孟凡乔

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1177–1183 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1375>

生物炭对矿区农田土壤及大豆安全种植的影响研究

蒋少军, 刘峻光, 刘玲玲, 刘悦弘, 黄仁龙, 舒月红

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 124–131 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0257>

Cd污染农田的炭基修复方案设计和效果评价

魏岚, 黄连喜, 刘晓文, 李翔, 张建文, 涂新红, 黄庆, 吴颖欣, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2277–2287 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0739>

北方农牧交错区不同土地利用方式下土壤呼吸动态特征

杨新明, 韩磊, 庄涛

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1733–1740 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1559>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

井海梦, 赵允格, 刘姝延, 等. 黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮对土壤渗透性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1532–1539.

JING H M, ZHAO Y G, LIU S Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil permeability of croplands in wind–water erosion crisscross region of Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1532–1539.

黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮对土壤渗透性的影响

井海梦^{1,2}, 赵允格^{2,3*}, 刘姝延^{1,2}, 澹台彧^{1,2}, 周楠^{1,2}, 乔羽^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 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; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了明确黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮的分布状况及其对土壤渗透性的影响, 本文以该区农田(春玉米)土壤自然发育的生物结皮为对象, 通过野外调查, 探索了该区农田生物结皮盖度及组成。并在此基础上, 以裸土为对照, 采用环刀法和双环法测定了土壤水分入渗参数, 研究了农田藻结皮及藓结皮对土壤渗透性的影响。结果表明: 风蚀水蚀交错区水浇地和旱地中均有生物结皮分布, 平均盖度为42.11%, 其中藻结皮盖度为33.74%, 藓结皮盖度为8.37%。生物结皮显著降低了农田土壤饱和和导水率, 与裸土相比, 藓结皮和藻结皮覆盖下土壤0~5 cm土层土壤饱和和导水率分别降低55.14%和23.54%; 藓结皮使土壤的稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量分别显著降低了51.11%、47.71%和46.50%, 藻结皮使土壤的稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量分别降低了25.56%、21.10%和20.91%, 但与裸土差异不显著。藓结皮的形成能够降低农田土壤砂粒含量, 提高土壤黏粒含量, 进而降低农田土壤渗透性。综上, 生物结皮的形成导致了农田土壤渗透性的降低, 这可能会进一步影响农作物对土壤水分的有效利用。

关键词: 饱和和导水率; 藻结皮; 藓结皮; 入渗速率; 土壤理化属性

中图分类号: S152.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2023)07-1532-08 doi:10.11654/jaes.2022-1189

Effects of biological soil crusts on soil permeability of croplands in wind–water erosion crisscross region of Loess Plateau

JING Haimeng^{1,2}, ZHAO Yunge^{2,3*}, LIU Shuyan^{1,2}, TANTAI Yu^{1,2}, ZHOU Nan^{1,2}, QIAO Yu^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: To determine the distribution of biological soil crusts (biocrusts) and their influence on soil permeability in croplands in the wind–water erosion crisscross region of Loess Plateau, the natural biocrusts in the croplands (corn) soil were investigated. First, the coverage and composition of biocrusts in croplands soil in this region were investigated. Subsequently, soil water infiltration parameters were measured using ring knife and double ring methods, respectively, and lastly, the influence of cyanobacteria and moss crusts on soil permeability was studied. The results showed that biocrusts are widely distributed in both irrigated and dry croplands in wind–water erosion crisscross region, and the average coverage is approximately 42.11%, of which cyanobacteria and moss crusts respectively account for

收稿日期: 2022-11-21 录用日期: 2023-02-07

作者简介: 井海梦(1998—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 从事生物结皮生态功能研究。E-mail: jinghm612@163.com

*通信作者: 赵允格 E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830758); 国家重点研发计划项目(2022YFF1300802)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41830758); The National Key Research and Development Program of China (2022YFF1300802)

33.74% and 8.37%. Biocrust significantly decreased the saturated hydraulic conductivity of croplands soil compared with that of bare soil. Compared with bare soil, the saturated hydraulic conductivity of 0–5 cm soil layer covered with moss and cyanobacteria crusts decreased by 55.14%, and 23.54%, respectively. Compared with bare soil, moss crusts significantly reduced the stable infiltration rate, initial infiltration rate, and cumulative infiltration amount of soil by 51.11%, 47.71%, and 46.50%, respectively. Cyanobacteria crusts reduced the stable infiltration rate, initial infiltration rate, and cumulative infiltration amount by 25.56%, 21.10%, and 20.91%, respectively, which did not vary significantly from those of the bare soil. The formation of moss crust in cropland can reduce soil sand content, increase soil clay content, and consequently reduce croplands soil permeability. In conclusion, the formation of biocrusts in cropland has resulted in the decrease of croplands soil permeability, which may affect the effective utilization of soil water by crops.

Keywords: saturated hydraulic conductivity; cyanobacteria crust; moss crust; infiltration rate; soil physicochemical properties

黄土高原处于干旱半干旱地区,该地农田土壤水分常处于亏损状态^[1],严重影响农作物产量。水资源短缺是黄土高原旱地农业高效可持续发展的主要限制因素^[2]。土壤水分入渗是田间灌溉水、雨水等通过地表向下运移进入并在土壤中进行运动和存储的过程^[3],其显著影响作物对水分的有效利用程度及养分随水分的迁移,进而影响作物生长及产量^[4]。

生物土壤结皮(Biological soil crusts),简称生物结皮,是由藻类、地衣类、苔藓类等隐花植物和土壤中微生物,以及其他生物体通过菌丝体、假根、分泌物等与土壤表层颗粒胶结而形成的十分复杂的复合体^[5–6]。已有研究证明,生物结皮能够增加土壤有机质含量^[7]、改善土壤结构和表层土壤理化性质^[5,8],进而影响土壤水分渗透性。据调查,干旱半干旱地区农田,特别是在有灌溉条件的农田土壤中,亦形成且分布了大面积的生物结皮。然而,目前农田生物结皮鲜少得到研究者的关注,农田生物结皮如何影响土壤渗透性鲜见报道。

前人已在非农田土壤上进行了许多关于生物结皮对土壤渗透性影响的研究。目前,多数研究者认为,生物结皮会导致土壤渗透性下降。一方面,生物结皮分泌的胞外多糖等化学物质能够堵塞土壤孔隙^[9–10],导致土壤渗透性下降;另一方面,生物结皮能够通过增加地表粗糙度的方式更多地捕获降尘,增加土壤表层细颗粒含量,降低土壤非毛管孔隙度,最终降低土壤渗透性^[9]。然而,不同于非农田土壤,农田生物结皮发育环境更为复杂。农田土壤容重小、孔隙度高,具有较好的水分条件^[11],此外,农田具有较高的作物郁闭度和较好的土壤肥力条件,能够为生物结皮的形成和发育提供遮荫环境和营养条件。从土壤环境的角度来看,农田更利于生物结皮的发育。但同时,人类频繁的耕作活动也会对农田生物结皮发育产生干扰破坏。因此,前人研究得出的结论是否同样适用

于农田尚未可知。从水分管理角度来讲,如何科学管理农田生物结皮,仍是一个亟待解决的问题。

土壤饱和导水率是指土壤孔隙全部充满水时的土壤导水速率,是表征土壤水分入渗能力的重要参数之一^[12]。土壤水分入渗过程是反映土壤入渗特性的重要指标^[13]。为此,本文以黄土高原风蚀水蚀交错区农田(春玉米)中自然发育的生物结皮为研究对象,在明确了农田生物结皮发育及分布状况的基础上,采用环刀法和双环法来研究不同发育阶段生物结皮对农田土壤入渗过程的影响,以期探明生物结皮在农田土壤水分循环过程中扮演的角色,明确生物结皮对农田土壤理化属性及土壤水分渗透性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于黄土高原风蚀水蚀交错带六道沟流域进行,该小流域位于陕西省神木市以西14 km处(38°46′~38°51′ N, 110°21′~110°23′ E),海拔1 094.0~1 273.9 m。该流域气候变化剧烈,旱洪及沙尘暴灾害频繁,为典型的风蚀水蚀交错带生态环境脆弱区^[14]。流域面积为6.9 km²,主沟道总长4.21 km,自南而北流入窟野河一级支流三道沟^[14]。其地形特点为典型的盖沙黄土丘陵区,属中温带半干旱气候,多年平均降雨量408.5 mm,降雨多集中在6—9月^[15]。该区垦殖指数较高,主要的土地利用类型有坡耕地、农地、荒草地、灌木林地、农果间作地和林地等^[16]。主要农作物类型包括玉米、大豆、向日葵等。

1.2 试验设计

1.2.1 风蚀水蚀交错区农田生物结皮分布特征及基本属性调查

调查于2022年9月作物生长后期进行。根据实地调查,将六道沟流域农田分为两种类型:一种为水浇地,年平均灌溉次数为4~5次,灌溉方式为漫灌,多

种植玉米、向日葵等作物;一种为旱地,多为地势较高的梯田或远离灌溉水源的农田,所种植作物多为豆类和玉米。在流域内选择水浇地和旱地各7块进行生物结皮盖度及厚度调查,每个样地布设至少30个样方,采用25点样方法和游标卡尺对生物结皮组成、盖度及厚度等进行调查。

1.2.2 农田生物结皮对土壤渗透性的影响试验

野外原位入渗试验于2022年9月进行。在研究区内选择具有代表性且生物结皮发育良好的水浇地作为研究样地,样地当季种植作物为玉米。在样地内玉米植株间隙选取结皮盖度达到90%以上的藓结皮与藻结皮样点,以相邻裸土为对照,进行原位双环法入渗试验。试验共3个处理,每个处理重复3次。同时采集3种地表覆盖类型下0~5 cm土层土壤样品,土样于室内进行饱和导水率及其他项目的测定。

1.3 测定项目及方法

生物结皮盖度:25点样方法^[5],每个样地至少布设30个样方。

生物结皮厚度:用游标卡尺测量生物结皮4个方向的厚度,取其平均值^[17],每类生物结皮至少重复15次。

藻结皮生物量:在暗处用研钵研磨藻结皮使藻体分离后取3 g样品装入离心管中,加入6 mL 95%乙醇水浴加热5 min后振荡20 min,4 000 r·min⁻¹离心10 min,取上清液于波长665 nm处测定吸光值^[15]。

$$C_a = 11.9035 \times OD_{665} \times V/m \quad (1)$$

式中: C_a 为叶绿素a含量,mg·g⁻¹; OD_{665} 为上清液在波长665 nm处的吸光值; V 为95%乙醇体积,mL; m 为土样质量,g。

藓结皮生物量:以单位面积结皮上所有苔藓植株的干质量表示^[18]。将风干后遮光保存的苔藓结皮用水喷湿,使其脱离休眠状态,然后用打孔器取一定面积(0.95 cm²)的苔藓结皮样放入网筛中冲洗,收集苔藓植物放到称量瓶,于烘箱中85℃杀青30 min,再于65℃烘干至质量恒定后称量,计算出单位面积苔藓植物生物量(g·dm⁻²)。

土壤颗粒组成采用马尔文MS2000激光粒度分析仪测定^[18];土壤容重采用环刀法测定;田间持水量采用威尔科克斯(Wilcox)法测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定^[9]。以上指标每个处理均为4个重复。

土壤饱和导水率采用恒定水头环刀法测定^[19],每个处理4个重复,环刀规格为100 cm³。试验开始前

将环刀在水中浸泡至饱和,除去环刀盖子垫一层滤纸后,套1个空环刀,接口处用胶布封好,向上层环刀加满水,之后用橡胶管一端连接马氏瓶,一端放入加满水的双环刀内,每隔10 min测定一次出水量(g),同时在试验开始、期间、结束时各测定一次水温,取平均值,用于换算。10℃下的饱和导水率计算公式为:

$$K_s = \frac{10QL}{St h (0.7 + 0.03T)} \quad (2)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率,mm·min⁻¹; Q 为渗透过一定截面积的水量,mL; L 为饱和土层厚度,渗透的距离,本试验即为环刀高度,取5 cm; S 为环刀横截面积,cm²; t 为渗透过水量 Q 所需的时间,min; h 为水头高差,本试验待水头稳定后用游标卡尺进行测定,cm; T 为实验期间平均水温,℃。

使用双环法观测不同类型生物结皮对土壤入渗的影响,每个处理3个重复。所用双环的内环直径为20 cm,外环直径为35 cm,高度均为20 cm。在试验区选择较为平坦的样地,去除地表作物,将圆环用橡胶锤缓慢均匀地打入土中15 cm,尽量保持土壤结构不受破坏。利用马氏瓶为圆环供水,当内环和外环中的水层厚度达到3 cm时,开始用秒表记时,并分别在0、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5 min及之后每5 min读取供水桶标尺刻度值,试验过程中保持内外环水面高度为3 cm,读数时一并读取水温^[20]。土壤入渗速率公式为:

$$f_s = \frac{r^2 \Delta h}{R^2 \Delta t (0.7 + 0.03T)} \quad (3)$$

式中: f_s 为10℃标准水温时土壤入渗速率,mm·min⁻¹; r 为马氏瓶半径,cm; Δh 为某一时段 Δt 供水桶读数差值,mm; Δt 为时段,min; R 为双环的内环半径,cm; T 为某时段的平均水温,℃。

土壤初始入渗速率为前3 min的入渗速率;稳定入渗速率为土壤达到稳定入渗后连续5个时段内的土壤入渗速率的均值^[20];平均入渗速率为达到稳渗时的累积入渗量与达到稳渗所用时间的比值^[21];累积入渗量为前100 min内的累积入渗总量。

1.4 数据处理

采用Excel 2016和SPSS 26.0软件对数据进行统计分析。采用单因素(One-way ANOVA)和LSD法对土壤理化属性、饱和导水率和入渗参数进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),用Pearson法对饱和导水率与入渗参数和土壤理化属性进行相关分析。利用Origin 2019软件制图。

2 结果与分析

2.1 风蚀水蚀交错区农田生物结皮分布特征及基本属性

表1为风蚀水蚀交错区农田生物结皮分布特征。结果显示,本研究所调查的14块农田中均有生物结皮分布,农田生物结皮平均总盖度为42.11%,其中藻结皮盖度为33.74%,在水浇地和旱地中均有分布,藓结皮盖度为8.37%,主要分布于水浇地。水浇地中生物结皮总盖度为60.39%,其中藻结皮盖度为43.64%,藓结皮盖度为16.75%,水浇地生物结皮平均厚度约3.12 mm。旱地中的生物结皮主要为藻结皮,其盖度为23.84%,平均厚度为1.81 mm。水浇地生物结皮盖度、厚度、生物量发育程度均显著高于旱地。

2.2 水浇地生物结皮地表特征和土壤理化性质

为了进一步明确生物结皮对农田土壤理化属性和水分渗透性的影响,以该区生物结皮发育较好的水浇地中的生物结皮为对象,研究了其对土壤理化性质和渗透性的影响。表2为水浇地不同处理的生物结皮特征及土壤理化性质。由表2可知,藓结皮和藻结皮覆盖下的水浇地土壤容重和有机质含量均略高于裸土,田间持水量略低于裸土,但三者之间的差异并不显著,即生物结皮的形成不会影响农田土壤容重、田间持水量及有机质含量。相较裸土,藓结皮覆盖下土壤黏粒含量显著提高了23.24%,砂粒含量显著降低了10.63%,粉粒含量无显著变化,藻结皮未显著影

响农田土壤颗粒组成。

2.3 生物结皮对水浇地土壤饱和和导水率的影响

图1为研究区水浇地不同类型生物结皮土壤的饱和和导水率。如图所示,与裸土相比,生物结皮覆盖能显著降低农田土壤饱和和导水率,但不同类型生物结皮对饱和和导水率的影响程度不同。藓结皮和藻结皮覆盖下土壤0~5 cm土层饱和和导水率分别为0.28 mm·min⁻¹和0.47 mm·min⁻¹,与裸土相比分别降低了55.14%和23.54%。由此可见农田生物结皮的覆盖能显著降低土壤饱和和导水率,且随着生物结皮的发育,降低效果逐渐增加。

2.4 生物结皮对水浇地土壤入渗的影响

图2为水浇地不同结皮类型土壤的水分入渗速率及累计入渗量变化曲线。如图2所示,3种地表覆盖类型下的土壤入渗速率均在0~5 min达到峰值,之后迅速下降并逐渐趋于稳定。3种地表覆盖类型的累积入渗量表现为藓结皮<藻结皮<裸土。其中,藓结皮覆盖下的农田土壤累积入渗量显著低于裸土,藻结皮与裸土之间无显著差异。

表3为水浇地不同结皮类型下土壤的水分入渗特征参数。如表3所示,藓结皮、藻结皮、裸土3种地表覆盖类型下土壤的初始入渗速率分别为2.22、2.68 mm·min⁻¹和3.06 mm·min⁻¹,三者之间差异不显著。藓结皮覆盖下的土壤稳定入渗速率和平均入渗速率分别为0.44 mm·min⁻¹和0.57 mm·min⁻¹,与裸土相比,分别降低了51.11%和47.71%。藻结皮覆盖下的土壤

表1 风蚀水蚀交错区农田生物结皮分布特征

Table 1 Distribution characteristics of biocrusts in croplands in wind-water erosion crisscross region

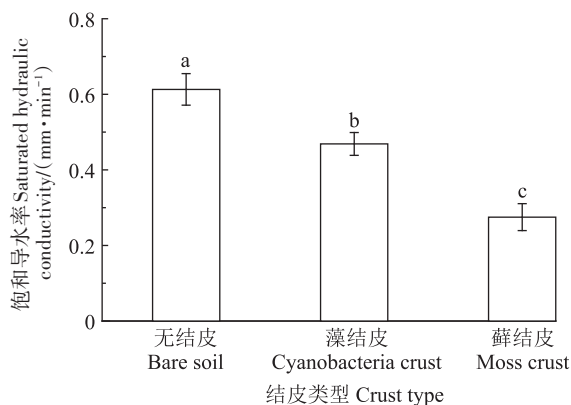
土地利用类型 Land use type	作物类型 Crop type	样地数 Number of plots/块	藻结皮盖度 Cyanobacteria crusts coverage/%	藓结皮盖度 Moss crusts coverage/%	结皮厚度 Thickness/mm	藻生物量 Cyanobacteria biomass/(mg·g ⁻¹)	藓生物量 Moss biomass/(g·dm ⁻²)
水浇地	玉米	5	46.44	18.63	3.45	12.62	0.31
	向日葵	2	32.44	9.19	2.31	17.71	0.24
旱地	玉米	2	24.37	0	1.88	7.73	—
	豆类	3	19.79	0	1.69	4.87	—
	高粱	2	29.40	0	1.91	7.80	—

表2 水浇地不同类型生物结皮覆盖下0~5 cm土层土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties in different types of biocrusts at 0-5 cm depth in irrigated croplands

结皮类型 Crust type	土壤容重 Soil bulk density/(g·cm ⁻³)	田间持水量 Field capacity/%	有机质含量 Organic matter content/(g·kg ⁻¹)	黏粒含量 Clay content/%	粉粒含量 Silt content/%	砂粒含量 Sand content/%
裸土	1.25±0.01a	20.53±0.01a	12.52±0.18a	9.98±0.79b	39.15±1.57a	50.87±1.31a
藻结皮	1.26±0.03a	20.33±0.07a	13.41±0.46a	10.94±0.20ab	42.69±1.15a	46.37±1.15ab
藓结皮	1.28±0.01a	19.55±0.02a	14.16±0.97a	12.30±0.59a	42.24±1.01a	45.46±1.50b

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ levels. The same below.



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

图1 水浇地不同类型生物结皮土壤的饱和导水率

Figure 1 Saturated hydraulic conductivity of soils with different crust types in irrigated croplands

稳定入渗速率和平均入渗速率分别为 $0.67 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $0.86 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 与裸土相比, 分别降低了 25.56% 和 21.10%, 但二者之间差异不显著。

2.5 水浇地土壤入渗参数与土壤理化性质的相关性分析

对水浇地土壤入参与土壤理化性质进行的相关性分析(表4)表明, 土壤饱和导水率与土壤黏粒含量

及结皮厚度呈极显著负相关关系, 与土壤砂粒含量呈显著正相关关系。土壤稳定入渗速率、平均入渗速率和累积入渗量均与土壤黏粒含量和结皮厚度呈极显著负相关关系, 与土壤容重呈显著负相关关系, 与土壤砂粒含量呈显著正相关关系。

3 讨论

生物结皮是干旱半干旱地区重要的地被物, 能够影响地表结构和土壤理化属性, 进而影响土壤环境。然而, 干旱半干旱地区农田中广泛分布的生物结皮目前尚未受到研究者的关注。为此, 本文调查了黄土高原风蚀水蚀交错区农田中生物结皮的分布特征及基本属性。结果表明, 在本研究所调查的 14 块农田中均有生物结皮分布, 其平均盖度为 42.11%, 其中藻结皮在水浇地和旱地中均有分布, 藓结皮主要分布于水浇地中。影响生物结皮形成和发育的因素主要包括土壤水分、植物覆盖及土壤理化性质等^[5-6, 22]。一般而言, 较好的水分条件和较高的植被盖度更利于生物结皮的形成发育^[23]。水浇地生物结皮的盖度、厚度及生物量均显著高于旱地, 这可能是由于水浇地具有更好的水分和养分条件, 且水浇地多种植玉米、向日葵等作物, 这些作物为生物结皮发育提供了较好的遮阴条

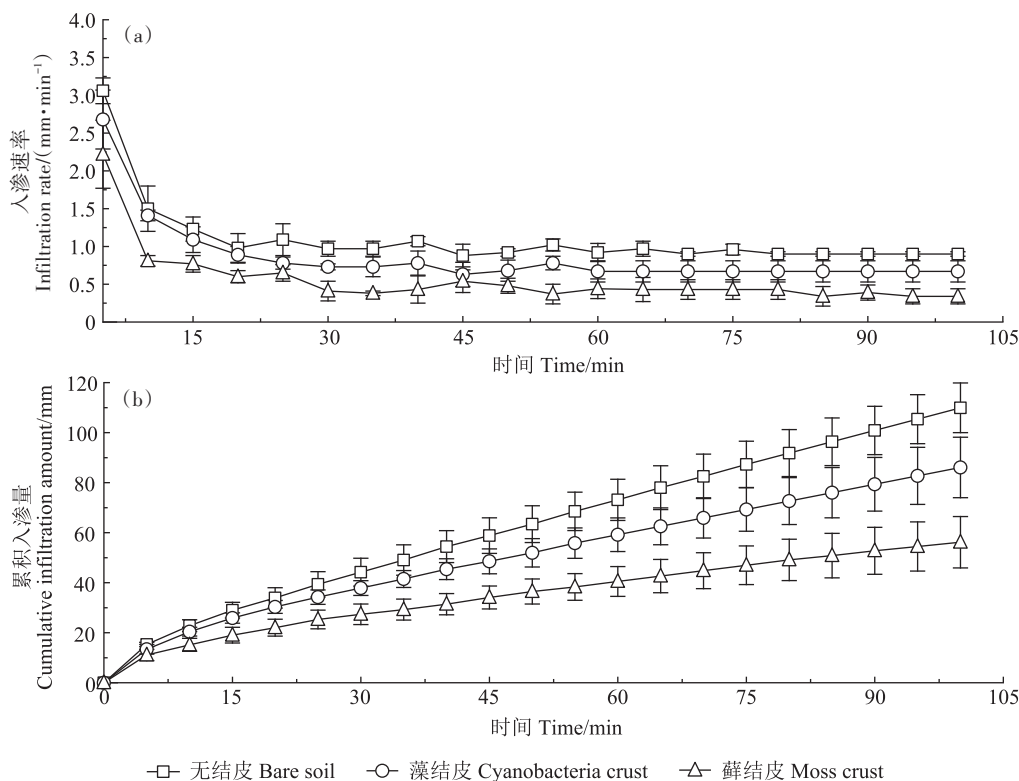


图2 水浇地不同结皮类型土壤的水分入渗速率及累积入渗量

Figure 2 Variation of infiltration rate and cumulative infiltration in different types of biocrusts in irrigated croplands

表3 水浇地不同结皮类型下土壤的水分入渗特征参数

结皮类型 Crust type	初始入渗速率 Initial infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗速率 Stable infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗速率 Average infiltration rate/ (mm·min ⁻¹)	累积入渗量 Cumulative infiltration amount/ mm
裸土	3.06±0.17a	0.90±0.03a	1.09±0.10a	91.83±9.40a
藻结皮	2.68±0.39a	0.67±0.13ab	0.86±0.12ab	72.63±9.38ab
藓结皮	2.22±0.45a	0.44±0.10b	0.57±0.10b	49.13±8.27b

表4 水浇地土壤入渗参数与土壤理化性质的相关性分析

项目 Item	有机质含量 Organic matter content	土壤容重 Soil bulk density	黏粒含量 Clay content	粉粒含量 Silt content	砂粒含量 Sand content	田间持水量 Field capacity	结皮厚度 Thickness
饱和导水率	-0.382	-0.177	-0.783**	-0.453	0.665*	0.297	-0.893**
稳定入渗速率	-0.172	-0.641*	-0.855**	-0.500	0.730**	0.036	-0.795**
初始入渗速率	-0.093	-0.280	-0.589*	-0.284	0.457	0.164	-0.521
平均入渗速率	-0.174	-0.693*	-0.773**	-0.493	0.691*	0.050	-0.789**
累积入渗量	-0.173	-0.621*	-0.866**	-0.497	0.732**	0.036	-0.788**

注:*表示变量在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示变量在0.01水平(双侧)上显著相关。
Note:*indicates the variables are significantly correlated at the 0.05 level(both sides),**indicates the variables are significantly correlated at the 0.01 level(both sides).

件,因此水浇地中生物结皮的发育程度高于旱地。

土壤有机质能够影响土壤团聚结构及其稳定性,进而影响土壤渗透性。一般有机质含量高时,土壤具有较高渗透性^[3]。结皮生物具有固碳作用^[24],其在代谢过程中所产生的分泌物及其腐烂分解的产物也是构成土壤有机质等养分的因素之一^[25]。但生物结皮对土壤有机质的聚集作用主要集中在结皮层本身,对下伏土壤作用不明显^[25-26]。本研究中,藓结皮和藻结皮均未显著增加0~5 cm土层土壤有机质含量,有机质含量变化不能解释农田土壤渗透性的下降,这与前人的研究结果一致^[9]。

土壤容重综合反映土壤的紧实程度和孔隙状况,对土壤的入渗性能和持水能力都有较大影响^[27]。田间持水量反映土壤保水能力的大小。生物结皮能够影响土壤颗粒组成及有机质含量,进而影响土壤容重和田间持水量^[7]。已有研究表明,长期发育的生物结皮能够显著降低土壤容重,提高土壤田间持水量^[28],但短期(1~4 a)发育的生物结皮可能会提高土壤容重^[29]。本研究中,受耕作措施影响,生物结皮发育时间较短,农田土壤容重略有提高,田间持水量略有下降,农田土壤的渗透性降低。

生物结皮能够改变土壤的颗粒组成,进而影响土壤渗透性^[8]。土壤细颗粒具有较大的比表面积,因此具有较大的吸附能力,从而可以影响土壤水分流动速率,此外,细颗粒对较大空隙的镶嵌填充也对土壤中

的水流通道具有阻挡作用^[27]。一般而言,土壤细颗粒含量越高,渗透性就越低。本研究中,藓结皮显著增加了农田土壤的黏粒含量,减少了砂粒含量,而藻结皮对土壤颗粒组成无显著影响。这可能是由于生物结皮不仅能够通过提高地表粗糙度来增加地表对降尘的捕获,而且还能通过分泌胞外多糖的方式来黏结固定土壤颗粒^[30],进而降低土壤渗透性。这与前人在非农用地进行的研究结果相似。例如,Xiao等^[9]在六道沟流域风成沙土上进行的研究认为生物结皮渗透性的降低主要是由于土壤细颗粒的增加和结皮厚度的增加,以及胞外聚合物对地表的堵塞作用。Wang等^[31]在黄土丘陵区进行的试验表明,苔藓比蓝藻更能有效降低土壤入渗能力,这与土壤黏粒含量密切相关。

农田土壤渗透性的降低,可能会增加表层土壤含水量,造成农田土壤水分浅层化,这有利于西瓜、西红柿和大白菜等浅根系作物对土壤水分的有效利用^[32],但却不利于深根系作物如大豆、棉花等作物生长^[33]。此外,土壤渗透性的降低会增加土壤水分的无效蒸发,阻碍农田土壤对降水和灌溉水的高效利用^[4],对坡耕地来说,土壤渗透性的降低还可能会造成坡面水土流失。从农田水分高效利用的角度来看,生物结皮在农田土壤水分入渗过程中扮演的角色需要结合实际情况具体分析。此外,前人在非农田土壤上进行的研究表明,生物结皮有固碳固氮的潜力^[5,34],能够影响土壤养分含量及其有效性^[29],还能够通过影响地表粗

糙度、温度等来影响土壤水分蒸发^[35-36],通过影响地表粗糙度影响土壤风蚀^[37-38]。生物结皮对土壤养分和蒸发过程的影响与结皮类型、演替阶段和外界环境等因素息息相关^[8,39]。然而本研究仅在六道沟流域的农田中进行,其土壤质地、地形及环境因素等都太过单一,未能系统全面地评估生物结皮在农田生态系统中发挥的作用,提出合理的农田生物结皮管理方法。事实上,笔者已经关注到,在中国北方多数农田中,均有生物结皮大面积分布,这些生物结皮同样影响着农田土壤系统的各个生态过程,生物结皮在农田土壤水分蒸发、养分调控及风蚀防控等方面的作用值得进一步研究。

4 结论

(1)风蚀水蚀交错区水浇地和旱地中均有生物结皮分布,平均总盖度为42.11%,其中藻结皮盖度为33.74%,藓结皮盖度为8.37%。

(2)与裸土相比,生物结皮的发育能显著降低农田土壤饱和导水率,且藓结皮降低幅度大于藻结皮。

(3)藻结皮对农田土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量的影响不显著,藓结皮显著降低农田土壤稳定入渗速率、平均入渗速率及累积入渗量。即藓结皮降低了农田土壤的入渗能力。

综上,农田生物结皮的发育可降低土壤的入渗能力,影响土壤水分含量,且藓结皮的影响程度大于藻结皮。

参考文献:

- [1] 李富翠, 赵护兵, 王朝辉, 等. 渭北旱地夏闲期秸秆还田和种植绿肥对土壤水分、养分和冬小麦产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1861-1871. LI F C, ZHAO H B, WANG Z H, et al. Effects of straw mulching and planting green manure on soil water, nutrient and winter wheat yield on Weibei Plateau, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1861-1871.
- [2] 王克鹏, 张仁陟, 董博, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤水分及作物叶水势的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3752-3761. WANG K P, ZHANG R Z, DONG B, et al. Effect of long-term conservation tillage on soil water regimes and leaf water potential of crops in rainfed areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3752-3761.
- [3] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190. LI X Z, FAN G S. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3): 188-190.
- [4] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 128-134. XIAO Q, ZHANG H P, SHEN Y F, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(16): 128-134.
- [5] BENAP J, LANGE O L. Biological soil crusts: structure, function, and management[M]. Berlin: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.
- [6] 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 X R, ZHANG Y M, ZHAO Y G. A study of biological soil crusts: recent development, trend and prospect[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(1): 11-24.
- [7] 明姣, 盛煜, 金会军, 等. 高寒冻土区生物结皮对土壤理化属性的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 601-609. MING J, SHENG Y, JIN H J, et al. The impact of the biological soil crusts on the frozen soil properties in the frozen ground region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(2): 601-609.
- [8] LANGE O L, BELNAP J, REICHENBERGER H. Photosynthesis of the cyanobacterial soil-crust lichen *Collema Tenax* from arid lands in Southern Utah, USA: role of water content on light and temperature responses of CO₂ exchange[J]. *Functional Ecology*, 1998, 12(2): 195-202.
- [9] XIAO B, SUN F, HU K, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 792-802.
- [10] FISCHER T, VESTE M, WIEHE W, et al. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on Inland Dunes, Brandenburg, NE Germany[J]. *Catena*, 2010, 80(1): 47-52.
- [11] 张思琪, 张科利, 曹梓豪, 等. 喀斯特坡面生物结皮发育特征及其对土壤水分入渗的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2875-2885. ZHANG S Q, ZHANG K L, CAO Z H, et al. Developmental characteristics of biological soil crusts and their effects on soil water infiltration on karst slope[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2875-2885.
- [12] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 35-40. XIAO B, ZHAO Y G, SHAO M A. Effects of biological soil crust on saturated hydraulic conductivity in water-wind erosion crisscross region, north of Shaanxi Province, China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(12): 35-40.
- [13] BELNAP J. The world at your feet: desert biological soil crusts[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(4): 181-189.
- [14] 查轩, 唐克丽. 水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 97-100. ZHA X, TANG K L. Study on comprehensive control model of small watershed eco environment in water and wind crisscrossed erosion zone[J]. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(1): 97-100.
- [15] 王闪闪, 赵允格, 明姣, 等. 黄土丘陵区生物结皮群落组成与水分入渗的关系[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1819-1826. WANG S S, ZHAO Y G, MING J, et al. Relationship between community composition and water infiltration of biological soil crusts in the hilly Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1819-1826.
- [16] 刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤

- 水力特性及其对土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2400-2407. LIU C L, SHAO M A. Soil hydraulic properties and their influence on soil water content under different land uses in Liudaogou watershed of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11): 2400-2407.
- [17] CASTEL S C, MORRISON C D, BARGER N N. Extraction of chlorophyll a from biological soil crusts: a comparison of solvents for spectrophotometric determination[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 43(4): 853-856.
- [18] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1316-1326. GAO L Q, ZHAO Y G, QIN N Q, et al. Impact of biological soil crust on soil physical properties in the hilly Loess Plateau region, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1316-1326.
- [19] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 68-72. HU S J, TIAN C Y, SONG Y D, et al. Determination and calculation of soil permeability coefficient[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5): 68-72.
- [20] 任宗萍, 张光辉, 王兵, 等. 双环直径对土壤入渗速率的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 94-97, 103. REN Z P, ZHANG G H, WANG B, et al. Effects of double-ring diameter on soil infiltration rate[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 94-97, 103.
- [21] 董智今, 张呈春, 展秀丽. 宁夏河东沙地生物土壤结皮对土壤性质及入渗过程的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7128-7136. DONG Z J, ZHANG C C, ZHAN X L. Effects of biological soil crusts on soil properties and soil water infiltration process of sandy land in the east of Yellow River in Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 7128-7136.
- [22] BELNAP J, PHILLIPS S L, MILLER M E. Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 306-316.
- [23] 李金峰, 孟杰, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 67-79. LI J F, MENG J, YE J, et al. The development characteristics and formation process of biological soil crusts in wind-water erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(1): 67-79.
- [24] ZAADY E, KUHN U, WILSKÉ B, et al. Patterns of CO₂ exchange in biological soil crusts of successional age[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(7): 959-966.
- [25] 孟杰, 卜崇峰, 赵玉娇, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤酶活性及养分含量的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1864-1874. MENG J, BU C F, ZHAO Y J, et al. Effects of biological soil crust on soil enzyme activities and nutrients content in wind-water erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1864-1874.
- [26] 赵允格, 许明祥, 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): 441-448. ZHAO Y G, XU M X, WANG Q J, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(3): 441-448.
- [27] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 不同黏粒含量土壤水分入渗能力模拟试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 71-77. LI Z, WU P T, FENG H, et al. Effects of soil clay particle content on soil infiltration capacity by simulated experiments[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 71-77.
- [28] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4662-4670. XIAO B, ZHAO Y G, SHAO M A. Effects of biological soil crust on soil physicochemical properties in water-wind erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4662-4670.
- [29] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1429-1434. ZHAO Y G, XU M X, WANG Q J, et al. Physical and chemical properties of soil biocrust on rehabilitated grass land in hilly Loess Plateau of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(8): 1429-1434.
- [30] 吴玉环, 高谦, 程国栋. 生物土壤结皮的生态功能[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 41-45. WU Y H, GAO Q, CHENG G D. Ecological function of biological soil crusts[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(4): 41-45.
- [31] WANG H, ZHANG G, LIU F, et al. Effects of biological crust coverage on soil hydraulic properties for the Loess Plateau of China[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(19): 3396-3406.
- [32] 易三桂, 蔡文涛, 来利明, 等. 鄂尔多斯高原软梁、硬梁弃耕农田土壤水分入渗特性[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 49-56. YI S G, CAI W T, LAI L M, et al. The characteristics of soil water infiltration on the abandoned croplands in soft hill and hard ridge of the Ordos Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(5): 49-56.
- [33] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878. LIU M X, NIE Y, YU J. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 871-878.
- [34] LAN S B, OUYANG H L, WU L, et al. Biological soil crust community types differ in photosynthetic pigment composition, fluorescence and carbon fixation in Shapotou region of China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 111: 9-16.
- [35] BELNAP J, WELTER J R, GRIMM N B, et al. Linkages between microbial and hydrologic processes in arid and semiarid watersheds[J]. *Ecology*, 2005, 86(2): 298-307.
- [36] ELDRIDGE D J, ZAADY E, SHACHAK M. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel[J]. *Catena*, 2000, 40(3): 323-336.
- [37] BELNAP J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3159-3178.
- [38] WILLIAMS A J, BUCK B J, BEYENE M A. Biological soil crusts in the Mojave Desert, USA: micromorphology and pedogenesis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1685-1695.
- [39] KERSHAW K A. Physiological ecology of lichens[M]. London: Cambridge University Press, 1985.