

张晨晖,肖波,李胜龙,等.东北黑土区农田生物结皮的特征及其对表层土壤崩解的影响.应用生态学报,2022,33(7): 1773-1782

Zhang C-H, Xiao B, Li S-L, et al. Characteristics of biocrusts in croplands and their effects on surface soil disintegration in the black soil region of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1773-1782

东北黑土区农田生物结皮的特征及其对表层土壤崩解的影响

张晨晖¹ 肖波^{2*} 李胜龙¹ 王彦峰³ 曹尤淞¹

(¹ 中国农业大学土地科学与技术学院/农业农村部华北耕地保育重点实验室,北京 100193; ² 中国科学院水利部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 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与荒漠化重点实验室,兰州 730000)

摘要 于作物生长季对东北黑土区典型农田中生物结皮的发育特征(类型、物种、厚度、覆盖度、生物量)进行分析,并使用数显推拉力计测定比较了无结皮土壤与不同生物量(以叶绿素含量表征,分别为5~15、15~25、25~35、35~50 mg·g⁻¹)生物结皮层中土壤的崩解差异。结果表明:1)东北黑土区农田中发育有藻和藓两类生物结皮,其中,毛枝藻和细叶真藓最为多见;藻结皮的厚度和生物量显著小于藓结皮,并总体上呈现由藻结皮逐渐向藓结皮演替的趋势。2)农田生物结皮的覆盖度、厚度和生物量与耕作扰动的频率和强度呈负相关,传统耕作农田中其平均覆盖度、厚度和叶绿素含量仅为27.8%、1.52 mm和6.49 mg·g⁻¹,但在免耕地中可增加至83.5%、2.74 mm和34.16 mg·g⁻¹。3)生物结皮显著削弱了土壤崩解作用,与无结皮土壤相比,4种生物量下生物结皮的土壤崩解速率分别显著降低了43.1%、50.1%、55.5%和59.8%,土壤最大崩解率分别显著降低了11.4%、17.7%、33.2%和36.6%。4)土壤崩解速率和最大崩解率均与生物结皮的厚度和生物量呈显著负相关,即生物结皮对土壤崩解的影响主要缘于其在发育过程中自身特性的改善及其覆盖后对表层土壤物理性质的改变。综上,随着保护性耕作技术推广后耕作扰动的减少,生物结皮在东北黑土区农田中有较高的发育潜力,它们发育后能削弱表层土壤崩解,提高土壤抗冲性,对农田土壤侵蚀防治具有积极意义。

关键词 黑土; 保护性耕作; 土壤崩解速率; 水土流失; 土壤侵蚀

Characteristics of biocrusts in croplands and their effects on surface soil disintegration in the black soil region of Northeast China. ZHANG Chen-hui¹, XIAO Bo^{2*}, LI Sheng-long¹, WANG Yan-feng³, CAO You-song¹ (¹College of Land Science and Technology, China Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; ²State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China).

Abstract: We selected typical croplands in the black soil region of Northeast China to analyze the characteristics of biocrusts during the growing season, including species composition, thickness, coverage, and biomass (chlorophyll content). We collected bareground soil and biocrusts samples with chlorophyll content of 5-15, 15-25, 25-35, and 35-50 mg·g⁻¹, and measured the soil disintegration rate and soil maximum disintegration ratio of each sample using a force gauge in the laboratory. The results showed that: 1) biocrusts dominated by algae and moss were frequently developed in the croplands, with *Stigeoclonium* and *Bryum capillare* as the most common species, respectively. The thickness and biomass of algal crusts were significantly lower than moss crusts, with a successional trend from algal crusts to moss crusts. 2) The coverage, thickness, and biomass of biocrusts in croplands were negatively correlated with the frequency and intensity of tillage disturbance. For instance, the values of those characteristics were only 27.8%, 1.52 mm, and 6.49 mg·g⁻¹ on average, respectively, in traditional tillage croplands, and in-

本文由国家自然科学基金项目(42077010)、中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(2019)和中国农业大学基本科研业务费专项资金(2021TC038)资助。

2022-02-28 收稿, 2022-05-05 接受。

* 通讯作者 E-mail: xiaobo@cau.edu.cn

creased to 83.5% , 2.74 mm , and 34.16 mg · g⁻¹ , respectively , in the croplands with conservational tillage. 3) Biocrusts considerably reduced the disintegration of surface soil , particularly in the layer of biocrusts. Compared to the bareground soil , the soil disintegration rate of biocrusts , with four levels of biomass (with chlorophyll content of 5-15 , 15-25 , 25-35 , and 35-50 mg · g⁻¹) , was reduced by 43.1% , 50.1% , 55.5% , and 59.8% , respectively , while the soil maximum disintegration ratios were reduced by 11.4% , 17.7% , 33.2% , and 36.6% , respectively. 4) Soil disintegration rate and maximum disintegration ratio were significantly and negatively correlated with the biomass and thickness of biocrusts , indicating that the impacts of biocrusts on soil disintegration were primarily caused by the improvements in physical properties of surface soil. In conclusion , biocrusts were frequently developed in croplands in the black soil region of Northeast China , owing to less disturbance following the conversion from traditional tillage to conservational tillage. They had the potential to protect surface soil against disintegration and improve soil anti-scourability , which was critical for soil conservation in croplands in this region.

Key words: black soil; conservational tillage; soil disintegration rate; water and soil loss; soil erosion.

东北黑土区是我国最重要的粮食生产基地,粮食产量约占全国的20%,对中国乃至世界人类的生存和发展都具有重要意义^[1]。然而,该区域长期不合理的开发利用和掠夺式经营导致黑土退化严重。自开垦以来,黑土层厚度由接近1 m减少至平均20~30 cm,有机质含量由原来的5%以上降至2%左右^[2]。过度开垦后,保护措施不足和地表植被覆盖率低所引起的强烈水土流失是黑土退化的主要原因^[3]。目前,东北黑土区的水土流失总面积约20万hm²,占区域总面积的18%,其中农田水土流失面积高达9.2万hm²。农田是水土流失的主要策源地,是生态环境中最脆弱的部分^[4]。严重的农田水土流失导致耕地面积减少、土壤肥力降低、生态失调,对农业生产和生态环境造成不可挽回的损失^[5]。因此,如何减少黑土区农田水土流失、保护黑土资源、提高黑土质量已关乎区域经济发展和国家粮食安全,成为亟待解决的重要环境问题。

为缓解东北黑土区农田水土流失的严峻态势,免耕、少耕、合理种植以及增加地表覆盖等保护性耕作措施被大范围推广,以减少耕翻、人力和农机具踩踏、压实等对耕层土壤的破坏^[6]。这类措施促进了表层土壤生物化学循环。与常规耕作相比,保护性耕作显著增加了表层0~10 cm土壤有机质含量和微生物量,改善了土壤微生物群落结构,增加了土壤生态系统多样性和稳定性^[7-8]。在此过程中,蓝藻等微生物和绿藻、苔藓等隐花植物也进行代谢繁殖。研究表明,减少干扰有利于藻结皮和苔藓结皮发育,且其生长发育与土壤微生物活性和群落结构呈正相关^[9]。因此,黑土区农田中应有生物结皮发育,尤其在具有多年保护性耕作历史的农田中生物结皮应有较为普遍的发育,但目前为止尚无研究报道。

生物结皮是由绿藻、地衣、苔藓等隐花植物与细菌、真菌等微生物通过自身的假根、菌丝体或者代谢

生成的分泌物等与土壤胶体颗粒胶结在一起共同形成的生物-土壤复合层^[10]。生物结皮覆盖土壤后在改善土壤理化性质、提高土壤微生物活性、防治土壤侵蚀和促进生态恢复等方面有重要作用,如生物结皮可抑制坡面产流并拦截径流泥沙以提升土壤对水蚀的抵抗能力^[11]。研究发现,生物结皮发育后改善了土壤团粒结构,增加了表土稳定性,从而降低了土壤水蚀^[12];另有研究表明,随着生物结皮发育程度的增加,土壤抗冲性也随之增加,当生物结皮覆盖度大于80%时土壤水蚀几近停止^[13]。生物结皮的分布格局和发育特征是其各种功能的基础,也是合理利用该资源的根本,其常见的表征指标包括生物结皮的地表覆盖度、结皮层厚度和生物量等^[14]。

土壤崩解是指土壤在静水中发生土粒分散、结构被破坏、土块塌落的现象^[15],其速率是表征土壤抗冲性的重要指标。土壤崩解是产生降雨侵蚀的先决条件。雨滴落到地面后,土壤崩解与溅蚀同时发生,随着降雨进行,土壤持续崩解,到一定程度后被崩解而分散的土壤颗粒易在雨滴动能下发生跃移而使溅蚀速率增大,待土表积水形成径流后即开始对土壤崩解和溅蚀过程中被分散和移动的土壤颗粒产生二次运移,即径流冲刷作用^[16]。降雨侵蚀是发生水土流失的直接原因,故土壤崩解对减少水土流失、防治土壤侵蚀具有十分重要的意义。目前,关于生物结皮影响土壤崩解的研究不多。李聪会等^[17]研究发现,生物结皮减少了土壤崩解量,但其研究并未涉及生物结皮削弱土壤崩解的影响因素和作用机理。

综上,东北黑土区农田土壤退化和水土流失严重,而保护性耕作措施减少地表扰动后为农田中生物结皮的发育提供了条件和可能,这些农田生物结皮发育后可发挥一定的水土保持功能,但目前研究较少。研究发现,农田土壤上有蓝藻结皮和绿藻结

皮 其处于被耕作破坏和繁殖再生的动态平衡之中^[18-19] ,但是对农田生物结皮的发育特征尚无系统阐述 ,其对土壤水蚀的具体作用也尚不明确。基于此 ,本研究以东北黑土区农田土壤上发育的生物结皮为对象 ,调查了其发育特征 ,分析了农田生物结皮生物量对表层土壤崩解的影响 ,以深入研究黑土区农田生物结皮对土壤抗冲性的影响 ,为防治黑土农田侵蚀与减少水土流失提供数据和理论支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

本研究于吉林省四平市梨树县中国农业大学吉林梨树实验站(43°02′—43°46′ N ,123°45′—124°53′ E)进行。梨树县地处吉林省西南部 ,地势东南高、西北低 ,东南为剥蚀地形 ,多低山丘陵;中部为冲积平原 ,地势略有起伏;北部为河谷平原 ,地势平坦。该区域属于寒温带半湿润大陆性季风气候 ,年平均气温 6.0 ℃ ,年平均降雨量 582.5 mm ,降雨集中在 7—9 月 ,年太阳总辐射 1427.72 kWh · m⁻² ,作物生长期水分和光照充足。黑土是研究区域内的典型土壤 ,此外还有棕壤、黑钙土、风沙土等土壤分布 ,区内土壤侵蚀现象严重。实验站有试验示范农田 100 hm² ,以种植玉米为主 ,大豆、苜蓿为辅。

1.2 农田生物结皮发育特征调查

于 2021 年 5—10 月 ,调查梨树实验站典型农田中生物结皮的发育特征。根据研究区在耕农田的耕作现状 ,选择传统耕作、少耕和免耕 3 种样地进行调查(图 1) ,每块样地约 1000 m²。其中 ,少耕即在传统耕作的基础上减少耕翻、起垄等扰动 ,包括但不限于条耕、不起垄、不在作物生长期深松土壤、不进行宽窄行设置等操作皆属于此种耕作方式;免耕

即不进行耕翻动土。于每块样地内调查生物结皮的类型 ,鉴定其物种组成 ,并测定每块样地内生物结皮的覆盖度、厚度和生物量。

生物结皮类型以肉眼初步区分。其中 ,藻结皮呈暗绿色 ,是位于土壤表面的薄层、无植株体、通过藻丝体及其分泌物与下层土壤黏结在一起形成的特殊表层。藓结皮呈亮绿色 ,有植株体 ,是苔藓假根固定土壤形成的特殊表层。然后 ,采集生物结皮标本 ,用解剖折挑取少许于载玻片上在光学显微镜下观察 ,并参照相关书籍^[20-25] 鉴定物种组成。

随后 ,以样方法(4 株玉米为一个样方 ,每个样方 1 m²) 在每块样地内按照“S”形布设 150 个样方 ,记录样方中生物结皮出现的频率 ,以出现生物结皮的样方数占总样方数的百分数计算其盖度 ,重复 5 次。采用游标卡尺测量每块样地生物结皮厚度 ,同时采用 1 cm 高的培养皿(底面积相同)在每次测量厚度的区域取样 ,带回室内用 DMSO 萃取分光光度法测定生物量(叶绿素含量)^[26] ,厚度和生物量均重复测量 5 次。

1.3 土壤崩解试验设计与样品采集

该部分试验为生物结皮生物量的单因素试验 ,以无结皮土壤(Ⅰ)为对照 ,根据藻结皮和藓结皮的生物量差异 ,将生物结皮设置为 5~15(Ⅱ)、15~25(Ⅲ)、25~35(Ⅳ)、35~50(Ⅴ) mg · g⁻¹ 4 种叶绿素含量(表征生物量)水平。其中 ,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ表示以生物量递增的 3 类藻结皮 ,Ⅴ为藓结皮。每个处理的土壤崩解特性重复测量 5 次。

供试土样采集于 2021 年 8—9 月。首先根据各处理分别选择 1 块样地 ,每块样地约 500 m²。之后在每块样地按“S”形布点 ,在雨后 2~3 d 用 1 cm 高的环刀(内壁涂抹凡士林)采集土壤样品 ,风干后用

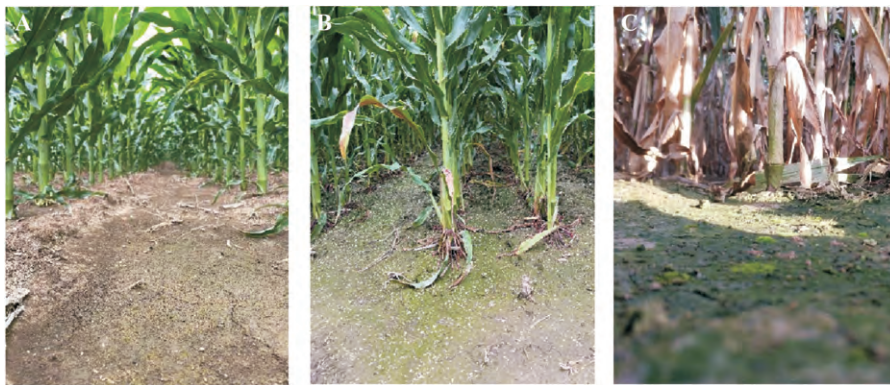


图 1 三种耕作方式样地中生物结皮的图片

Fig.1 Photos of biocrusts in the sampling plots with three types of tillage practices.

A: 传统耕作 Traditional tillage; B: 少耕 Minimum tillage; C: 免耕 Zero tillage.

手轻轻推出备用。对于易破碎的样品,将直径与环刀内径相同的定制铁柱压在样品上,然后向上推出环刀,以保证样品完整。

土壤样品带回室内后立即称重(即湿土重),按照环刀法计算土壤容重,公式为:容重=湿土重/[1+质量含水量)×环刀体积];风干后再次称重,计算土壤风干含水量。土壤总孔隙度按照 $(1-\text{土壤容重}/2.65) \times 100\%$ 计算。同时用铝盒于样地内采集相应的扰动土壤,采用烘干法测定土壤质量含水量(即自然含水量)。而后用与1.2相同的方法测量生物结皮的厚度和生物量(叶绿素含量)。

1.4 土壤崩解特性的测定

利用艾德堡 HP-5 数显推拉力计(量程 5 N,分辨率 0.001 N)记录土壤的崩解过程。如图 2 所示,整个装置主要由推拉力计、金属网板和烧杯构成。其中,推拉力计下方的传感器上悬挂细线以连接并稳定金属网板,金属网板下方放置烧杯并盛装去离子水。试验时,将风干土样放置在金属网板上后逐步缓慢加水至完全浸没样品,以减少加水过程对样品的影响。每次试验保持加水的深度相同,以减少处理之间的误差。试验控制水体温度为 20 °C,以确保温度对试验结果的影响可忽略不计。每个样品试验时间为 60 min,若样品完全崩解则记录结束时间。为打破长时间崩解形成的崩解壁障,试验过程中每隔 10 min 提放一次烧杯(施加外力)。

土壤崩解速率表示单位时间内土壤的崩解量,计算公式如下:

$$V = (F_{\max} - F_{\min}) \times 100 \times 60 / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: V 为土壤崩解速率 ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$); F_{\max} 为加水浸没过程中土样吸水达到的推拉力计最大读数 (N);

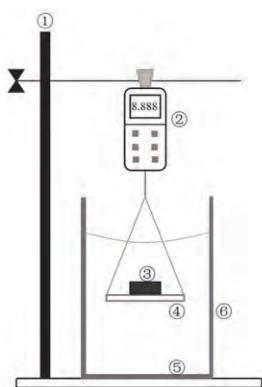


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental instrument.

①铁架台 Iron support; ②推拉力计 Force gauge; ③风干土样 Air-dried soil sample; ④金属网板 Metal mesh; ⑤去离子水 Deionized water; ⑥烧杯 Beaker.

F_{\min} 为崩解结束时刻的推拉力计读数 (N); t_1 和 t_2 分别为崩解开始和结束的时间 (s)。

土壤残留量表示某时刻还未崩解的土壤质量,计算公式如下:

$$M = mk \quad (2)$$

$$k = \rho_{\text{sat}} / (\rho_{\text{sat}} - \rho_w) \quad (3)$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{1}{v} \left[\left(\frac{m_0}{1+w} \times \frac{\rho_b}{f_0} \right) + \frac{m_0}{1+w} \right] \quad (4)$$

式中: M 为某时刻土壤的残留量 (g); m 为某时刻拉力传感器的质量模式读数 (g); k 为校正系数^[27]; ρ_{sat} 为土样饱和密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); ρ_w 为水的密度,等于 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; m_0 为湿土重 (g); w 为土壤自然含水量 (%); ρ_b 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); f_0 为土壤总孔隙度 (%); v 为环刀体积 (cm^3)。

崩解残留率表示未崩解的土壤质量占初始质量的比重,采用式(5)计算。土壤最大残留率为崩解结束时的残留率。

$$I = M / M_{\max} \quad (5)$$

式中: I 为崩解残留率 (%); M_{\max} 为加水浸没土样过程中土样吸水增重使推拉力计达到最大读数对应的土样质量 (g)。

土壤崩解率表示已崩解的土壤质量占初始质量的比重,采用式(6)计算。土壤最大崩解率为崩解结束时的崩解率。

$$H = 1 - I \quad (6)$$

式中: H 为土壤崩解率 (%).

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据记录与处理,利用 SPSS 22 软件对生物结皮发育特征及其与无结皮土壤的基本性质、崩解速率、崩解结束时施加外力次数、最大残留率和最大崩解率进行单因素方差分析,并运用 LSD 法进行显著性检验 ($\alpha = 0.05$)。采用 Pearson 相关分析对土壤崩解参数与土壤基本性质的相关性进行分析。使用 OriginPro 2021 软件绘图,图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 黑土区农田生物结皮的发育特征

经过调查,研究区生物结皮主要为藻结皮和藓结皮(表 1)。季节变化上,5 月气温回升后开始出现藻结皮,7—8 月雨季到来后藻结皮发育程度明显增加,9 月在免耕地中快速发育的藻结皮之上发现藓结皮,10 月作物收获、气温降低之后结皮进入休眠状态。藻结皮在 3 种耕作方式下均有分布,最为

表 1 不同耕作方式下农田生物结皮发育特征

Table 1 Developmental characteristics of biocrusts in croplands under different tillage practices

耕作方式 Tillage practice	生物结皮类型 Biocrust type	覆盖度 Coverage (%)	厚度 Thickness (mm)	叶绿素含量 Chlorophyll content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
传统耕作 Traditional tillage	藻结皮 Algal crusts	27.8 ± 7.5A	1.52 ± 0.36A	6.49 ± 0.97A
少耕 Minimum tillage	藻结皮 Algal crusts	54.9 ± 3.6B	1.90 ± 0.14B	12.28 ± 0.98B
免耕 Zero tillage	藻结皮 Algal crusts	71.9 ± 6.8Cb	2.32 ± 0.27Ca	21.35 ± 6.17Ca
	藓结皮 Moss crusts	11.6 ± 2.4a	3.16 ± 0.45b	46.96 ± 12.71b

同列不同大写字母表示不同耕作方式下藻结皮间差异显著,不同小写字母表示免耕地藻结皮与藓结皮间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercase letters in the same column indicated significant difference among algal crusts under different tillage practices, and different lowercase letters indicated significant difference between algal crusts and moss crusts with zero tillage at 0.05 level.

常见的藻种为毛枝藻 (*Stigeoclonium*), 其余还有螺旋藻 (*Spirulina*)、阿氏项圈藻 (*Anabaenopsis arnoldii*) 和微囊藻 (*Microcystis*)。而藓结皮主要分布于免耕地的沟坎, 最常见的藓种为细叶真藓 (*Bryum capillare*), 还有立宛藓 (*Physcomitrium sphaericum*)。此外, 农田中还有极少量苔类分布, 主要苔种为溪苔 (*Pellia epiphylla*) (图 3)。在厚度和生物量 (叶绿素含量) 上, 藻结皮显著低于藓结皮, 藻结皮分别为 1.91 mm 和 13.37 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 但藓结皮增加至 3.16 mm 和 46.96 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别增加了 65.4% 和 251.2%。

农田生物结皮的覆盖度、厚度和生物量均表现为传统耕作 < 少耕 < 免耕。传统耕作样地的覆盖度、厚度和叶绿素含量分别为 27.8%、1.52 mm 和 6.49 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 在少耕地中有所增加, 在免耕地中可增加至 83.5%、2.74 mm 和 34.16 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。与传统耕作相比, 少耕和免耕下生物结皮的覆盖度、厚度和叶绿素含量分别增加了 27.1%、25.0%、89.2% 和 55.7%、80.3%、426.3%。

2.2 农田生物结皮对土壤崩解的影响

2.2.1 土壤平均崩解速率 由图 4 可知, 无结皮和 4 种生物量下生物结皮的土壤崩解速率具有显著差异, 且表现为无结皮 > 5 ~ 15 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藻结皮 > 15 ~ 25 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藻结皮 > 25 ~ 35 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藻结皮 > 35 ~ 50 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藓结皮。其中, 无结皮的土壤崩解速率为 1.37 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$, 4 种生物量下生物结皮的土壤崩解速率分别减小至 0.78、0.68、0.61、0.55 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$, 分别较无结皮降低了 43.1%、50.1%、55.5%、59.8%, 生物结皮的土壤崩解速率平均降低了 52.1%。此外, 4 种生物量下生物结皮中仅 15 ~ 25 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藻结皮与 35 ~ 50 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藓结皮之间具有显著差异, 其余均无显著差异, 且与藻结皮平均值相比, 藓结皮的土壤崩解速率降低了 20.3%。

2.2.2 土壤崩解过程 随着时间延长, 土壤崩解率逐渐增大, 每次施加外力的瞬间能大幅增加土壤崩解率, 但无结皮与 4 种生物量生物结皮在崩解过程中的表现不同 (图 5 和图 6)。无结皮与 4 种生物量

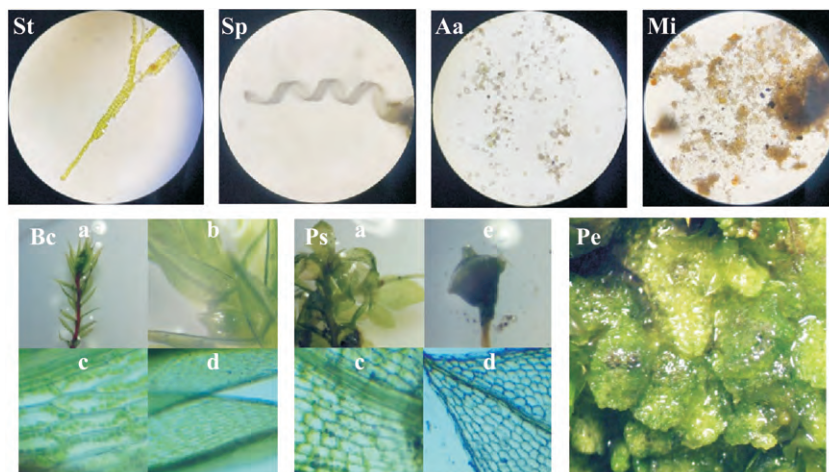


图 3 不同类型生物结皮中鉴定的藻、藓种

Fig.3 Algal and moss species identified in different types of biocrusts.

St: 毛枝藻 *Stigeoclonium*; Sp: 螺旋藻 *Spirulina*; Aa: 阿氏项圈藻 *Anabaenopsis arnoldii*; Mi: 微囊藻 *Microcystis*; Bc: 细叶真藓 *Bryum capillare*; Ps: 立宛藓 *Physcomitrium sphaericum*; Pe: 溪苔 *Pellia epiphylla*. a) 植株 Plant; b) 叶形 Leaf shape; c) 叶基细胞 Leaf base cell; d) 叶尖细胞 Leaf tip cell; e) 孢子体 Sporophore.

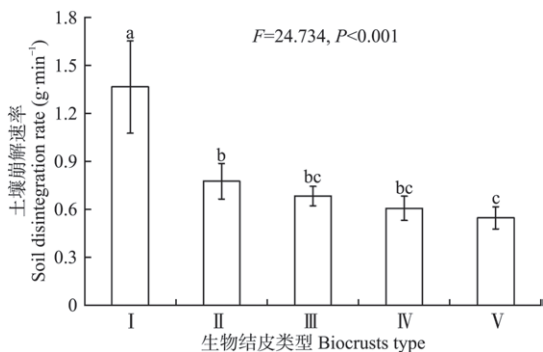


图4 无结皮与生物结皮的土壤崩解速率

Fig.4 Disintegration rate of uncrusted and biocrusts soils.

I: 无结皮土壤 Uncrusted soil; II: 叶绿素含量为 5~15 mg·g⁻¹ 的藻结皮 Algal crusts with chlorophyll content of 5~15 mg·g⁻¹; III: 叶绿素含量为 15~25 mg·g⁻¹ 的藻结皮 Algal crusts with chlorophyll content of 15~25 mg·g⁻¹; IV: 叶绿素含量为 25~35 mg·g⁻¹ 的藻结皮 Algal crusts with chlorophyll content of 25~35 mg·g⁻¹; V: 藓结皮 叶绿素含量为 35~50 mg·g⁻¹ Moss crusts with chlorophyll content of 35~50 mg·g⁻¹. 不同小写字母表示不同结皮类型间差异显著 (P<0.05) Different lowercase letters indicated significant difference among different biocrusts types at 0.05 level. 下同 The same below.

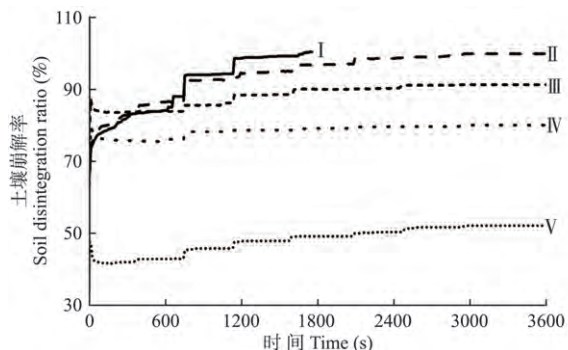


图5 无结皮与生物结皮的土壤崩解率曲线

Fig.5 Curves of disintegration ratio of uncrusted and biocrusts soils.

生物结皮在施加外力次数上差异显著,无结皮经过 2~3 次施加外力即可完全崩解;而 5~15 和 15~25 mg·g⁻¹ 的藻结皮经过 5~6 次施加外力后才能完全崩解,甚至仍有少量土块残留,且 15~25 mg·g⁻¹ 的藻结皮施加外力的平均次数大于 5~15 mg·g⁻¹ 的藻结皮;25~35 mg·g⁻¹ 的藻结皮和 35~50 mg·g⁻¹ 的藓结皮经过 6 次施加外力后仍有较多土块残留。4 种生物量生物结皮的土壤最大残留率分别为 11.4%、17.7%、33.2%和 36.6%,差异显著。

2.2.3 土壤最大崩解率 无结皮与 4 种生物量生物结皮的土壤最大崩解率差异显著,表现为无结皮>5~15 mg·g⁻¹ 的藻结皮>15~25 mg·g⁻¹ 的藻结皮>25~35 mg·g⁻¹ 的藻结皮>35~50 mg·g⁻¹ 的藓结皮 (图 7)。其中,无结皮的土壤最大崩解率为 100%,而 4 种生物量生物结皮的土壤最大崩解率分别减小

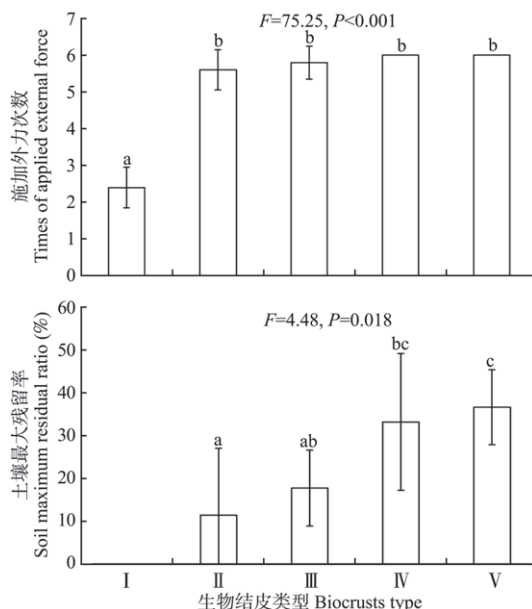


图6 崩解结束时无结皮与生物结皮土壤的施加外力次数和最大残留率

Fig.6 Times of applied external force and maximum residual ratio of uncrusted and biocrusts soils at the end of disintegration.

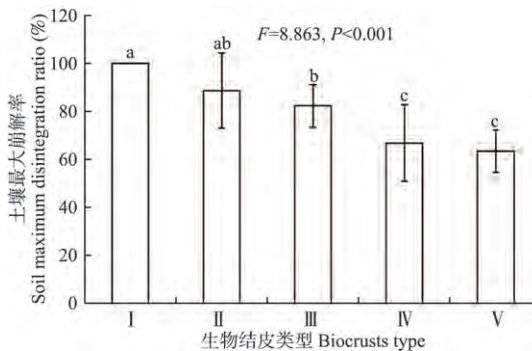


图7 无结皮与生物结皮的土壤最大崩解率

Fig.7 Maximum disintegration ratio of uncrusted and biocrusts soils.

至 88.6%、82.3%、66.8%和 63.4%,分别较无结皮降低了 11.4%、17.7%、33.2%和 36.6%,平均降低了 24.7%。此外 4 种生物量生物结皮中 5~15 和 15~25 mg·g⁻¹ 的藻结皮分别与 25~35 mg·g⁻¹ 的藻结皮和 35~50 mg·g⁻¹ 的藓结皮差异显著,且与藻结皮平均值相比,藓结皮的土壤最大崩解率降低了 19.9%。

2.3 土壤崩解参数与无结皮和生物结皮基本性质的关系

5~15 mg·g⁻¹ 的藻结皮至 35~50 mg·g⁻¹ 的藓结皮发育过程中,生物结皮的生物量(叶绿素含量)和厚度逐渐增大;风干含水量无结皮与生物结皮无显著差异;土壤容重表现为藓结皮>藻结皮>无结皮,而土壤总孔隙度则表现相反(表2)。相关性分

表 2 无结皮土壤与生物结皮的基本性质

Table 2 Basic properties of uncrusted soil and biocrusts

生物结皮类型 Biocrusts type	叶绿素含量 Chlorophyll content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	厚度 Thickness (mm)	风干含水量 Air-dried water content (%)	容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度 Total porosity (%)
I	-	-	$3.1 \pm 1.2\text{ab}$	$0.98 \pm 0.12\text{a}$	$63.0 \pm 4.7\text{c}$
II	$16.88 \pm 11.38\text{a}$	$1.45 \pm 0.39\text{a}$	$3.6 \pm 1.3\text{ab}$	$1.23 \pm 0.18\text{bc}$	$53.8 \pm 6.7\text{ab}$
III	$27.35 \pm 7.67\text{bc}$	$1.94 \pm 0.02\text{ab}$	$3.8 \pm 1.0\text{ab}$	$1.10 \pm 0.13\text{ab}$	$58.3 \pm 5.0\text{bc}$
IV	$36.09 \pm 11.53\text{bc}$	$2.37 \pm 0.34\text{b}$	$4.2 \pm 1.2\text{b}$	$1.26 \pm 0.12\text{bc}$	$52.6 \pm 4.6\text{ab}$
V	$41.49 \pm 13.56\text{c}$	$3.35 \pm 0.41\text{c}$	$2.3 \pm 1.1\text{a}$	$1.32 \pm 0.16\text{c}$	$50.1 \pm 5.9\text{a}$

I: 无结皮土壤 Uncrusted soil; II: 叶绿素含量为 $5 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藻结皮 Algal crusts with chlorophyll content of $5 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; III: 叶绿素含量为 $15 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藻结皮 Algal crusts with chlorophyll content of $15 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; IV: 叶绿素含量为 $25 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的藻结皮 Algal crusts with chlorophyll content of $25 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; V: 藓结皮, 叶绿素含量为 $35 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Moss crusts with chlorophyll content of $35 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 不同小写字母表示不同结皮类型间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters indicated significant difference among different biocrusts types at 0.05 level.

表 3 无结皮和生物结皮的土壤崩解参数与基本性质的相关性

Table 3 Correlation between disintegration parameters and basic properties of uncrusted and biocrusts soils

参数 Parameter	叶绿素含量 Chlorophyll content		厚度 Thickness		风干含水量 Air-dried water content		容重 Bulk density		总孔隙度 Total porosity	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
土壤崩解速率 Soil disintegration rate	-0.572*	0.026	-0.627*	0.012	0.012	0.954	-0.526**	0.007	0.528**	0.007
土壤最大崩解率 Soil maximum disintegration ratio	-0.649**	0.009	-0.664**	0.007	-0.051	0.807	-0.501*	0.011	0.499*	0.011

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

析结果显示(表 3), 土壤崩解速率和最大崩解率均与生物结皮的生物量和厚度呈显著负相关, 即生物结皮能通过改善自身特性削弱土壤崩解; 土壤崩解速率和最大崩解率与风干含水量无显著相关性, 而与土壤容重呈显著负相关, 与土壤孔隙度呈显著正相关, 即生物结皮能通过改变表层土壤物理性质进而影响土壤崩解。

3 讨 论

3.1 农田生物结皮的发育特征

东北黑土区农田中有藻和藓两类生物结皮发育, 并大致呈现由藻结皮逐渐向藓结皮演替的趋势。藻结皮的藻种主要分布在蓝藻和绿藻两门, 即农田中发育的藻结皮可能是蓝藻和绿藻等生物代谢繁殖的共同结果, 这与 Sneha 等^[28]的研究结果类似。一方面, 这类生物的营养繁殖方式简单, 能进行光合作用固定环境中的碳、氮, 具有自养能力, 同时能刺激异养微生物生长, 提高总微生物活性; 另一方面, 其适应环境和抗干扰的能力较强, 即使在极端条件下也能生存, 在农田中只要保持短时间不扰动即可生长。生物结皮的发育演替受多种因素的影响, 实施保护性耕作后农田扰动减少是藻结皮发育程度增加并可能向藓结皮演替的主要原因。东北黑土区夏季良好的水热条件为生物结皮正向演替提供了前提, 扰动减少后蓝藻和绿藻的繁殖速度加快, 发育到一

定程度后即具有与宿主建立共生关系的能力, 而苔藓植物为常见的宿主^[28]。如 Knapen 等^[19]调查发现, 休耕 100 d 左右农田中即可发现与藻类共生的藓结皮。因此, 藻结皮初期可在黑土区农田中进行发育, 且生长到一定程度后可能向藓结皮演替。

研究区农田中藻结皮的厚度和生物量显著小于藓结皮。这可能是因为由藻结皮演替至藓结皮后, 结皮层中微生物的代谢活性增强, 其分泌的胶结物质对土壤颗粒具有胶结能力, 导致结皮层增厚^[29]; 同时微生物群落结构改善、物种多样性增加, 其进行光合作用的能力提高, 从而使叶绿素 a 含量增加^[30]。本研究中毛枝藻和细叶真藓是最常见的藻、藓种, 这主要取决于地理位置。本研究区位于辽河流域, 王宏伟等^[31]在调查该流域藻类植物群落结构时发现, 绿藻门和蓝藻门的藻种约占总藻种的 50%; 蔡锦蓉等^[32]调查发现, 我国分布最广的藓类植物属为真藓属, 而细叶真藓是北方寒温带地区的常见藓种。

耕作方式不同则农田生物结皮发育程度具有较大差异。本研究中生物结皮的发育程度与耕作扰动的频率和强度呈负相关。这是由于保护性耕作对表层土壤的破坏程度和范围都较小, 不会打破土壤微生物的代谢循环过程, 且可为微生物生长发育提供适宜的水热环境条件和必要的营养物质^[33]。而传统耕作需要进行翻耕筑垄, 大规模破坏地表, 从而打

断地表微生物正在进行的生长繁殖过程,导致生物结皮的生长发育和代谢演替需要重新开始。如有研究表明,与传统耕作相比,保护性耕作农田中人为踩踏、放牧、翻耙等干扰方式减少,使土壤微生物和酶活性提高、微生物量碳、氮增加,这促进了生物结皮的发育^[8]。除破坏较小外,保护性耕作农田还采取农作物留茬和秸秆覆盖等手段,也对生物结皮发育产生影响。一方面,一定密度的作物残茬和秸秆覆盖为生物结皮提供了相对遮荫的环境,适宜生物结皮生长^[34];另一方面,作物残体还田后进行的腐解反应可能有利于生物结皮中某些土壤微生物的代谢繁殖。因此,保护性耕作农田中生物结皮发育程度整体较高。

3.2 农田生物结皮发育后对土壤崩解的影响及其作用途径

本研究发现,生物结皮覆盖使表层土壤崩解速率减小,且不同发育阶段的生物结皮对表层土壤崩解速率的减小程度不同,随着生物结皮发育程度增加,土壤崩解速率呈逐渐减小的趋势。这与其他研究结果相似。如李聪会等^[17]研究发现,生物结皮可以增强土壤抗崩解性能,随着生物结皮发育年限增加崩解量递减。这可能是由生物结皮增强土粒间相互作用力造成的,其原因可能有:1)藻类和藓类在生长代谢过程中能够分泌多糖、酶等胞外分泌物^[35],通过生物化学作用黏结土壤颗粒、固定松散土粒,藓结皮发育时间较长,则其黏结固定作用更明显;2)藻结皮的藻丝体、藓结皮的假根均对土壤颗粒具有缠绕和聚集作用,能对土壤颗粒进行物理捆绑,且部分假根与藻丝体能够产生交互作用,其支撑捆绑作用强于藻丝体^[36];3)随着生物结皮发育,土壤细粒物质所占比重不断增大、有机质和胶体含量不断提高,增加了土壤颗粒之间的静电引力^[35],极有利于土壤颗粒被吸附固定。

本研究发现,无结皮土壤的崩解率在崩解期间随时间持续增大,而生物结皮土壤的崩解率只在崩解前期随时间增大,后期只有在施加外力时短暂增大。可见,与无结皮相比,生物结皮土壤具有水稳性层,其非稳定层次遇水分散后生物结皮土壤即停止崩解。这可从 Davis 等^[37]的研究中得到印证,其发现生物结皮代谢过程中会在土壤表面形成蜡质外层,提高土壤的斥水性,这导致水分对土壤颗粒的分散作用减弱。可见,生物结皮的生物量越大,则该层次发育程度越高,即本研究崩解结束时施加外力的次数和土壤最大残留率随生物结皮生物量的增大而

增大,土壤最大崩解率随生物结皮生物量的增大而减小。这与其他研究结果有相似之处,如杨凯等^[38]研究显示,生物结皮具有强稳定的层状结构,且随着生物结皮发育演替,其团聚体水稳定性逐渐增强,能提高土壤的抗侵蚀能力。另外,生物结皮与水分的相互作用也可能是土壤崩解减弱的原因,生物结皮层中细菌和真菌的胞外多糖聚合物具有吸水膨胀性,浸水后膨胀使土壤孔隙堵塞,减少了水分在孔隙内的流通性^[39],进而削弱了土壤崩解作用。

3.3 影响农田生物结皮层中土壤崩解的因素

生物结皮发育过程中自身特性的改善削弱了土壤崩解。本研究发现,生物结皮生物量与土壤崩解参数呈显著负相关。这是因为本研究中生物结皮生物量用叶绿素 a 含量来表征,叶绿素 a 是生物结皮进行光合作用的主要色素,对生物结皮积累有机物质、进行生长发育至关重要。如 Lan 等^[30]研究发现,随着生物结皮发育,叶绿素的荧光覆盖度显著增大,同时有效光合效率、光合生物生物量和活性逐渐增加。可见,生物结皮发育演替积累叶绿素 a,进而促进光合作用,提高有机物质含量和光合微生物活性,这增大了土壤颗粒之间的黏结力,进而削弱崩解。本研究发现,生物结皮厚度与土壤崩解参数呈显著负相关。生物结皮厚度对土壤崩解的影响主要取决于结皮层厚度,即水稳性层厚度占土壤厚度的比例。本研究中土壤厚度一定,随着生物结皮厚度增大,其占土壤厚度比例增加,容易在静水中崩解的土层厚度相对减小,土壤崩解程度减小。

土壤崩解的影响因素主要有前期含水量、容重和总孔隙度^[15],生物结皮作为土壤的特殊表层,可能通过改变表层土壤性质而影响崩解。本研究表明,生物结皮土壤前期含水量(风干含水量)与土壤崩解参数均无显著相关性,这与已有研究结果不同。研究表明,在崩解初期,不饱和有效应力是土壤崩解的主要驱动力,随着含水量升高,崩解速率逐渐减小^[40]。土壤在静水中发生崩解主要是因为水分进入土壤孔隙,破坏土粒之间的黏结力而分散土粒,使其脱离土体而掉落。开始崩解之前的初始含水量较高时,土体与水体之间的水势降低使湿润锋运移速度减慢,同时土壤孔隙被水分及封闭气体占据而失去连通性^[15],水分对土体的分散作用减弱而削弱崩解。而本研究中土样崩解之前统一进行了风干处理,2%~5%的初始含水量可能不足以改变水势、湿润锋和土壤孔隙的连通性,可能难以形成闭蓄空气而影响崩解。本研究中土壤容重表现为无结皮<藻

结皮 < 藓结皮, 这与其他研究结果不同, 如赵允格等^[41] 研究表明, 随着生物结皮发育, 土壤容重先增大后减小, 苔藓结皮盖度大于 60% 时土壤容重降低了 15%。本研究土壤容重增加可能有两方面的原因: 1) 生物结皮发育过程中累积粉粒和黏粒, 增大土壤细颗粒含量, 导致土壤连通性降低而紧实度增大; 2) 保护性耕作下长期不进行耕翻动土造成土壤自身紧实度增加。而研究区生物结皮发育程度较低, 结皮层较薄、易碎而难以完整剥离, 测量土壤容重时统一用 1 cm 高的环刀采样, 这可能突出了保护性耕作的作用而削弱了结皮的作用。因此, 研究区藓结皮的土壤容重高于藻结皮。本研究发现, 生物结皮土壤崩解参数与土壤容重呈显著负相关, 与土壤孔隙度呈显著正相关。这与 Guo 等^[42] 的研究结果相似。土壤容重和土壤孔隙度是土壤松紧程度的直接反映, 对于相同质地的土壤, 土壤容重增大意味着土壤结构紧实度增加、土壤颗粒占比增加, 而总孔隙度和大孔隙数量减少^[43], 土壤的连通性降低而土粒之间黏结力增大, 最终表现为土壤崩解作用减弱。

4 结 论

东北黑土区农田中发育有藻和藓两类生物结皮, 最为常见的藻、藓种为毛枝藻和细叶真藓; 耕作扰动减少后, 农田中藻结皮率先发育, 其后呈现逐渐由藻结皮向藓结皮演替的大致趋势, 且藓结皮出现后结皮层厚度和生物量显著增大。耕作扰动的频率和强度显著影响农田生物结皮的发育程度。与传统耕作相比, 少耕和免耕地中生物结皮覆盖度、厚度和生物量分别增加了 27.1%、25.0%、89.2% 和 55.7%、80.3%、426.3%。生物结皮显著削弱了土壤崩解作用, 其土壤崩解速率平均降低了 52.1%, 土壤最大崩解速率平均降低了 24.7%; 生物结皮发育过程中自身特性改善及其覆盖后对表层土壤物理性质的改变共同影响土壤崩解。

本研究表明, 我国东北黑土区农田中有良好的生物结皮发育条件和潜力, 藻和藓等生物覆盖农田土壤表面后改变了土壤物理性质, 削弱了土壤崩解作用。同时, 随着生物结皮由藻结皮向藓结皮的逐渐演替, 其削弱土壤崩解的能力逐渐增加, 其抗冲性和水土保持作用逐渐增强。因此, 农田生物结皮对黑土地保护和土壤侵蚀防治具有积极意义, 应得到一定的重视。

参考文献

[1] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望. 地

理科学, 2018, **38**(7): 1032–1041

- [2] Gu ZJ, Xie Y, Gao Y, et al. Quantitative assessment of soil productivity and predicted impacts of water erosion in the Black Soil Region of Northeastern China. *Science of the Total Environment*, 2018, **637–638**: 706–716
- [3] Hu YX, Li XW, Guo SL, et al. On-site soil dislocation and localized CNP degradation: The real erosion risk faced by sloped cropland in northeastern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, **302**: 107088
- [4] 富涵, 郑粉莉, 覃超, 等. 东北薄层黑土区作物轮作防治坡面侵蚀的效果与 C 值研究. *水土保持学报*, 2019, **33**(1): 14–19
- [5] Du ZB, Gao BB, Qu C, et al. A quantitative analysis of factors influencing organic matter concentration in the topsoil of black soil in Northeast China based on spatial heterogeneous patterns. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, **10**: 348
- [6] Gao LL, Wang BS, Li SP, et al. Effects of different long-term tillage systems on the composition of organic matter by ¹³C CP/TOSS NMR in physical fractions in the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 2019, **194**: 104321
- [7] Man M, Wagner-Riddle C, Dunfield KE, et al. Long-term crop rotation and different tillage practices alter soil organic matter composition and degradation. *Soil and Tillage Research*, 2021, **209**: 104960
- [8] Morugán-Coronado A, Linares C, Gómez-López MD, et al. The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agricultural Systems*, 2020, **178**: 102736
- [9] 韩炳宏, 牛得草, 贺磊, 等. 生物土壤结皮发育及其影响因素研究进展. *草业科学*, 2017, **34**(9): 1793–1801
- [10] Li SL, Bowker MA, Xiao B. Biocrusts enhance non-rainfall water deposition and alter its distribution in dryland soils. *Journal of Hydrology*, 2021, **595**: 126050
- [11] 谷康民, 杨凯, 赵允格, 等. 黄土丘陵区不同盖度生物结皮对坡面产流及 SCS-CN 模型 CN 值的影响. *水土保持学报*, 2021, **35**(1): 132–137, 144
- [12] 鞠孟辰, 卜崇峰, 王清玄, 等. 藻类与微生物添加对高陡边坡生物结皮人工恢复的影响. *水土保持通报*, 2019, **39**(6): 124–128, 135
- [13] 冉茂勇, 赵允格, 刘玉兰. 黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究. *中国水土保持*, 2011(12): 43–45
- [14] Gao LQ, Bowker MA, Xu MX, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **105**: 49–58
- [15] 李敬王, 陈林, 史东梅, 等. 紫色土崩解特性对容重和含水率的响应特征. *水土保持学报*, 2019, **33**(2): 68–72, 78
- [16] Sun X, Miao L, Chen R, et al. Surface rainfall erosion resistance and freeze-thaw durability of bio-cemented and polymer-modified loess slopes. *Journal of Environmental Management*, 2022, **301**: 113883

- [17] 李聪会,朱首军,陈云明,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响. 水土保持研究, 2013, **20**(3): 6-10
- [18] Crouzet O, Consentino L, Pétraud JP, et al. Soil photosynthetic microbial communities mediate aggregate stability: Influence of cropping systems and herbicide use in an agricultural soil. *Frontiers in Microbiology*, 2019, **10**: 1319
- [19] Knapen A, Poesen J, Galindo-Morales P, et al. Effects of microbiotic crusts under cropland in temperate environments on soil erodibility during concentrated flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, **32**: 1884-1901
- [20] 朱浩然. 中国淡水藻志 第二卷 色球藻纲. 北京: 科学出版社, 1991: 11-18
- [21] 黎尚豪. 中国淡水藻志 第五卷 绿藻门 丝藻目 石莼目 胶毛藻目 橘色藻目 环藻目. 北京: 科学出版社, 1998: 48-59
- [22] 朱浩然. 中国淡水藻志 第九卷 蓝藻门 藻殖段纲. 北京: 科学出版社, 2007: 127-129, 153-165
- [23] 黎兴江. 中国苔藓志 第三卷 紫萁藓目 葫芦藓目 四齿藓目. 北京: 科学出版社, 2000: 84-96
- [24] 黎兴江. 中国苔藓志 第四卷 真藓目. 北京: 科学出版社, 2006: 61-107
- [25] 白学良. 内蒙古苔藓植物志. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1997: 74-75
- [26] 李林, 赵允格, 王一贺, 等. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响. 自然资源学报, 2015, **30**(6): 1013-1023
- [27] 谷天峰, 袁亮, 胡炜, 等. 黑方台黄土崩解性试验研究. 水文地质工程地质, 2017, **44**(4): 62-70
- [28] Sneha GR, Yadav RK, Chatrath A, et al. Perspectives on the potential application of cyanobacteria in the alleviation of drought and salinity stress in crop plants. *Journal of Applied Phycology*, 2021, **33**: 3761-3778
- [29] 都军, 李宜轩, 杨晓霞, 等. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮对土壤理化性质的影响. 中国沙漠, 2018, **38**(1): 111-116
- [30] Lan SB, Thomas AD, Tooth S, et al. Small-scale spatial heterogeneity of photosynthetic fluorescence associated with biological soil crust succession in the Tengger Desert, China. *Microbial Ecology*, 2019, **78**: 936-948
- [31] 王宏伟, 陈莹, 张晓明, 等. 辽河太子河流域藻类植物群落结构及其季节变化. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 936-942
- [32] 蔡锦蓉, 陈云辉, 臧程, 等. 基于 125 个地区的中国藓类植物区系的定量分析. 植物科学学报, 2017, **35**(2): 207-215
- [33] Çelik İ, Günel H, Acar M, et al. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate. *Soil and Tillage Research*, 2019, **185**: 17-28
- [34] 杨永胜, 冯伟, 袁方, 等. 快速培育黄土高原苔藓结皮的关键影响因子. 水土保持学报, 2015, **29**(4): 289-294
- [35] Lan SB, Wu L, Adessi A, et al. Cyanobacterial persistence and influence on microbial community dynamics over 15 years in induced biocrusts. *Environmental Microbiology*, 2021, **24**: 66-81
- [36] 李宁宁, 张光辉, 王浩, 等. 黄土丘陵区沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响. 中国水土保持科学, 2020, **18**(1): 42-48
- [37] Davis DD, Horton R, Heitman JL, et al. Wettability and hysteresis effects on water sorption in relatively dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73**: 1947-1951
- [38] 杨凯, 赵允格, 马昕昕. 黄土丘陵区生物土壤结皮层水稳性. 应用生态学报, 2012, **23**(1): 173-177
- [39] Philippis RD, Vincenzini M. Outermost polysaccharidic investments of cyanobacteria: Nature, significance and possible applications. *Recent Research Developments in Microbiology*, 2003, **7**: 13-22
- [40] Zhang Z, Vadim P, Svetlana N, et al. Disintegration characteristics of a cryolithogenic clay loam with different water content: Moscow covering loam (prQ_{III}), case study. *Engineering Geology*, 2019, **258**: 105159
- [41] 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. 自然资源学报, 2006, **21**(3): 441-448
- [42] Guo MM, Wang WL, Wang TC, et al. Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, **45**: 1038-1050
- [43] 刘风华, 代智光, 费良军. 容重对红壤条件下涌泉根灌水分入渗能力影响. 水土保持学报, 2019, **33**(1): 86-90, 97

作者简介 张晨晖,男,1998年生,硕士研究生。主要从事生物结皮的水土保持效应研究。E-mail: 15035370277@163.com

责任编辑 张凤丽