

黄泛平原区风沙土物理结皮硬度和厚度特征及其影响因素

李鑫浩¹, 曹文华², 牛勇¹, 吕青霞³, 袁利⁴, 赵磊¹

(1. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 2. 水利部 水土保持监测中心, 北京 100053;

3. 兰考县水利局, 河南 兰考 475300; 4. 淮河水利委员会 淮河流域水土保持监测中心站, 安徽 蚌埠 233001)

摘要: [目的] 开展黄泛区沙地结皮硬度、厚度特征及其影响因素研究, 为该区域结皮抗蚀机理研究提供科学参考。[方法] 以黄泛区风沙土为研究对象, 设置一年两熟耕地(T_1)、一年一熟耕地(T_2)、裸地(T_3)、自然恢复地(T_4) 4 种下垫面条件, 开展土壤结皮硬度、厚度以及土壤、气象和植被等影响因子的定位观测, 并采用统计检验和相关性分析方法探索土壤结皮厚度和硬度与其影响因子之间的关系。[结果] 4 种下垫面条件下的土壤结皮平均硬度大小依次为: $T_3 > T_4 > T_1 > T_2$ 。 T_1, T_2 土壤结皮硬度与温度、植被高度、植被覆盖度和近地表风速具有显著相关关系($p < 0.05$)。土壤平均结皮厚度大小依次为: $T_1 > T_3 > T_2 > T_4$; T_1, T_2 土壤结皮厚度和近地表风速呈显著正相关关系($p < 0.05$); T_3, T_4 土壤结皮厚度和累计补水量、土壤温度显著相关($p < 0.05$)。耕作条件下, 植被高度对结皮硬度和厚度变化的贡献度最高, 贡献度达 37% 以上; 无耕作条件下, 近地表风速和累计补水量分别对结皮硬度和厚度变化的贡献度最高, 贡献度分别达到 51% 和 45% 以上。[结论] 人为耕作不利于黄泛平原风沙区风沙土结皮的形成和硬度的保持。植被、近地表风速、温度是影响风沙土结皮硬度和厚度的重要外部因素。风沙土结皮厚度、硬度变化趋势与表层含水量表现出同步变化的特征, 其中土壤结皮硬度的响应存在一定的滞后性。有无耕作, 风沙土土壤结皮硬度和厚度的主要驱动因子也不相同。

关键词: 黄泛平原风沙区; 结皮硬度; 结皮厚度; 影响因素; 风蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0063-06

中图分类号: X37

文献参数: 李鑫浩, 曹文华, 牛勇, 等. 黄泛平原区风沙土物理结皮硬度和厚度特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 63-68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.001; Li Xinhao, Cao Wenhua, Niu Yong, et al. Characteristics and influencing factors of hardness and thickness of aeolian sandy soil crust at sandy area of Yellow River floodplain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 63-68.

Characteristics and Influencing Factors of Hardness and Thickness of Aeolian Sandy Soil Crust at Sandy Area of Yellow River Floodplain

Li Xinhao¹, Cao Wenhua², Niu Yong¹, Lü Qingxia³, Yuan Li⁴, Zhao Lei¹

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong

271018, China; 2. Mortoring Center of Soil and Water Conservation, Beijing 100053, China;

3. Lankao Water Authority, Lankao, He'nan 475300, China; 4. Monitoring Center Station of Soil and

Water Conservation, Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu, Anhui 233001, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of the hardness and thickness of a sandy soil crust in Yellow River floodplain and their influencing factors were studied in order to provide scientific references for the protection of soil resources. [Methods] Four different underlying surface treatments, i.e., cultivated land with two crops in a year (T_1), cultivated land with one crop in a year (T_2), bare land (T_3), and spontaneous recovery land (T_4), were designed to conduct the experiment. The hardness and thickness of the soil crust, meteorological factors, and vegetation factors were observed and recorded, and the relationships among the hardness and

收稿日期: 2021-08-30

修回日期: 2021-10-24

资助项目: 山东省自然科学基金面上项目“基于多源信息融合的土壤侵蚀空间变异性与数字地图研究”(ZR2020MD023)

第一作者: 李鑫浩(1999—), 男(汉族), 山东省济宁市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: 2020120801@sdau.edu.cn。

通信作者: 牛勇(1984—), 男(汉族), 山东省菏泽市人, 副教授, 主要从事水土保持方面的研究。Email: 150401973@qq.com。

thickness of soil crust and influencing factors were explored by statistical tests and correlation analysis. [Results] The average value of soil crust hardness of T_3 was the highest among the four treatments, followed by T_4 , T_1 , and T_2 . Significant correlations between soil crust hardness and soil temperature, vegetation height, vegetation coverage, and near-ground surface wind speed were observed under T_1 and T_2 ($p < 0.05$). The soil crust thickness of T_1 was the highest, followed by T_3 , T_2 , T_4 . There was a significant positive correlation between soil crust thickness and near-surface wind speed for T_1 and T_2 ($p < 0.05$), and soil crust thickness was significantly correlated with cumulative water replenishment and soil temperature ($p < 0.05$) under T_3 and T_4 . For the treatments located in cultivated land, the contribution of vegetation to crust hardness and thickness was the highest, reaching 37%. For the treatments located in uncultivated land, the contribution of near-ground surface wind speed and cumulative water replenishment to crust thickness and hardness was above 51% and 45%, respectively. [Conclusion] Artificial cultivation was not conducive to the formation of aeolian sandy soil crust and the maintenance of hardness in the Yellow River floodplain. Crust thickness and hardness were significantly affected by vegetation, temperature, and wind speed near the ground surface. Aeolian sandy soil crust thickness, hardness change trend, and surface water content showed the characteristics of synchronous change, while the response of soil crust hardness exhibited some hysteresis. The main driving factors of soil crust hardness and thickness of aeolian sandy soil with cultivation measures were different from those without cultivation measures.

Keywords: aeolian sandy area of the Yellow River floodplain; soil crust hardness; soil crust thickness; interfering factor; wind erosion

黄泛平原风沙区是国家级水土流失重点预防区,下垫面多为粉砂和沉积细砂,本底环境脆弱^[1]。此外该区干旱与大风同期,地表扰动频繁,土壤抗风蚀能力脆弱,水土流失是当地农业生产、生态环境和区域高质量发展的主要威胁之一。

土壤结皮的形成有利于更好防止风力侵蚀。物理结皮是在雨滴冲溅和土壤黏粒理化分散作用下,土表孔隙被堵塞后形成,或挟沙水流经土表时细小颗粒沉积而形成的一层很薄的土表硬壳^[2],李晓丽等^[3]提出结皮使得土壤的抗剪能力增大,从而能有力地抑制风力侵蚀,目前,土壤结皮的大量相关研究主要围绕生物结皮开展^[4-6],物理结皮研究较少,且相关研究多基于室内单因素试验或研究限于西北干旱人为干扰沙地^[3,7-11],黄泛平原风沙区在中国面积约 $3.90 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[12],且地处黄河下游经济发达地区,其风蚀灾害影响在近现代逐渐被人们所重视,但围绕该区域风沙土结皮的研究鲜有报道。明确风沙土土壤结皮硬度和厚度特征及其影响因素对于风蚀防治具有重要意义。现有研究认为,结皮强度在一定程度上反映沙(土)地表面形成的固结层所能承受的压力,抗压强度越大,表征耐风蚀能力越强,对自然的破坏力抵抗性越高^[13]。土壤结皮的形成是一个随降雨历时延长而逐步完善的复杂的物理化学过程^[14],国内外许多学者还经过研究得出土壤颗粒组成、团聚体大小及稳定性等对土壤结皮的形成有很重要的影响^[15-17],而植被高度、覆盖度、近地表风速等其他因素对土壤

结皮的影响研究较少。本研究对河南省兰考县国家土壤风蚀观测点 4 种下垫面条件的土壤结皮硬度、厚度、气象数据、植被数据及表层土壤含水量等影响因素开展定位观测,分析黄泛平原风沙区风沙土结皮硬度和厚度的动态变化特征,探求土壤物理结皮硬度和厚度的主要影响因素及影响机理,以期相关研究成果可以为当地风蚀防治决策提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择位于河南省兰考县仪封乡的国家土壤风蚀观测点(东经 $114^\circ 55' 12''$ — $114^\circ 55' 32''$,北纬 $34^\circ 47' 55''$ — $34^\circ 47' 20''$)作为研究区。研究区地处黄河自孟津向东所形成的巨大冲积扇的中部。地面高程为 60~70 m,相对高差 10 m 左右。地势西北高东南低,地面坡降为 1/5 000。黄河的泛滥、决口和改道,改变了区域内原有地表形态,形成了新的微地貌单元,古河床形成槽形洼地。研究区属温带季风气候。其气候特征为春季干旱风沙多,夏季炎热雨水集中,秋季凉爽温差大,冬季寒冷雨雪少。多年平均气温 14°C ,1 月气温最低,平均气温 -1°C ;7 月气温最高,平均气温 27°C 。多年平均日照时数为 2 529 h,多年平均日照率为 57%。全年太阳有效辐射总量为 247 kJ/cm^2 。多年平均无霜期 219 d,多年平均降雨量 687 mm。冬春季节平均风速在 4.0~5.0 m/s 之间,多平均风速在 2.5~3.0 m/s 之间。研究区土壤为风

沙土。风沙土是由黄河主流冲积沉淀后发育而成,发育较弱,沉淀层次明显。研究区土壤机械组成为:砂粒含量为 88.23%,粉粒含量为 7.58%,黏粒含量为 4.19%,该土壤透水性好,当地一般采用散射式喷灌带进行灌溉。

1.2 试验处理设置

黄泛平原风沙区位于黄河下游冲积平原,该区域是传统的农耕区域,农业开发历史悠久,主要农作物为小麦、玉米、花生和大豆等。在研究区所在的兰考

县,约 40% 的耕地土壤质地为风沙土,主要作物为小麦和花生。参考当地种植模式,本研究设置了 4 个试验处理,分别为:一年两熟耕地 (T_1),一年一熟耕地 (T_2),裸地 (T_3),自然恢复地 (T_4),其中 T_4 处理试验小区长期处于自然恢复状态(约 2 a),各试验处理小区面积为 30 m×30 m,各试验小区间有 2 m 隔离带,其中, T_3 处理由人为定期除草, T_4 处理处于植被自然恢复状态,无人为干扰,各处理具体耕作或植被情况如表 1 所示。

表 1 黄泛平原风沙区风沙土物理结皮硬度和厚度试验样地布设

处理编号	一年两熟区 (T_1 处理)	一年一熟区 (T_2 处理)	裸地区 (T_3 处理)	自然恢复区 (T_4 处理)
作物或植被	小麦(10月至次年5月)、 花生(6—9月)	花生(6—9月)	无植被覆盖	无人为干扰,自然恢复 (主要为草本植物)

1.3 研究方法 with 监测指标

1.3.1 土壤结皮硬度和厚度测量 T_1 — T_4 处理的试验小区的地表结皮均为物理结皮,未发现生物结皮现象,其中 T_4 处理的试验小区地表虽有枯落物覆盖,但不视为生物结皮。土壤结皮硬度和厚度测量时,先清除表层枯落物,使用高分辨率硬度计(KM-1, Japan)测定表土结皮硬度,并使用钢尺测定土壤结皮厚度。测定时将硬度计机身连接直径 5 mm 的钢制圆柱状施压探头,将其匀速压入结皮土中,直至表层结皮开裂,此时从硬度计表盘读取硬度数据。本研究采用硬度计读数与探头底面积比值表征土壤结皮硬度,计算公式如公式(1)所示。研究期间每半月测定各试验处理小区内土壤结皮硬度,每次每个小区重复测量 20 次,并使用钢尺测量对应位置土壤结皮的厚度(cm)。

$$H = \frac{A}{S} \quad (1)$$

式中: H 为测试土壤结皮硬度(kg/cm^2); A 为测试时硬度计表盘读数(kg); S 为测试时探头底面积(cm^2)。

1.3.2 土壤及气象因子测量 在各试验处理小区土壤表层安装 3 支 ECH_2O 土壤含水量传感器(Decagon, USA),用于自动测定土壤表层(传感器安装位置地表以下约 5 cm 处)含水量、温度、电导率等数据,土壤含水量传感器连接至 EM50 数据采集器(Decagon, USA),定期自动记录相关数据,记录间隔为 12 h,每隔半月下载数据并重启设备。

采用 WatchDog 2000 系列全自动气象站(Spectrum, USA)测定降水量、风速(2 m)、风向、温湿度等数据,记录间隔为 15 min。通过设置在距地面 20 cm, 60 cm 高处的 S-WSB-M003 风速传感器(Onset, USA),测量不同高度的平均风速、阵风风速等,并由

HOBOWare 数据采集器(Onset, USA)自动记录数据,记录间隔为 10 min,每半月下载数据并重启设备。本研究将观测期内各阶段的降水量与灌溉量之和定义为累积补水量。选取距地表 20 cm 处阵风风速表征该半月内的近地表瞬时风速。

1.3.3 植被高度和覆盖度测量 每半月对试验小区植被的高度和覆盖度测定一次。其中,植被高度使用卷尺测定,植被覆盖度使用动态测量系统(北京天航佳德科技有限公司,中国)测定,其测量方法为:将设备水平置于观测地物之上进行拍摄,再通过选取和分析图片中的一种或多种参考色,识别出参考色在照片中所占的百分比,以此计算获得植被覆盖度。每次测量每个小区选取 10 个测量位置,并计算植被覆盖度平均值。在观测期间 T_3 试验处理植被覆盖度控制在 5% 以下,植被高度和覆盖度按 0 值处理。

1.3.4 统计分析方法 以每半月份作为一个统计单元,将观测期(2020 年 10 月至 2021 年 4 月)分为 14 个单元,由数字 1—14 表示。使用 Excel 2016 对数据进行处理和作图。使用 spss19.0 统计分析软件,分析各影响因素对土壤结皮硬度、厚度的影响程度,以及不同处理间的差异性,其中各因素间相关性分析采用 Pearson 法,差异性检验采用独立样本 T 检验法。基于残差分析法计算各驱动因子对结皮硬度、厚度的贡献度。

$$\text{TR}_j = dJ / dt =$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial J}{\partial H} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial J}{\partial B} \frac{dB}{dt} + \frac{\partial J}{\partial U} \frac{dU}{dt} + \\ & \frac{\partial J}{\partial W} \frac{dW}{dt} + \frac{\partial J}{\partial R} \frac{dR}{dt} + \frac{\partial J}{\partial T} \frac{dT}{dt} + \delta = \end{aligned} \quad (2)$$

$$C(H) + C(B) + C(U) + C(W) + C(R) + C(T) + \delta$$

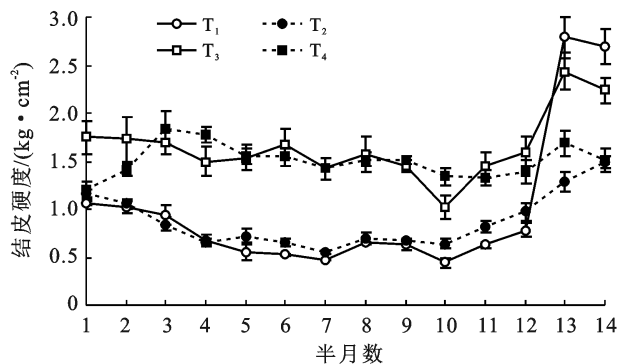
$$\rho(x) = \frac{C(x)}{C(H)+C(B)+C(U)+C(W)+C(R)+C(T)} \times 100\% = \frac{C(x)}{C_{\text{总}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中： H 为植被高度(cm)； B 为覆盖度(%)； U 为风速(m/s)； W 为地表含水量(m^3/m^3)； R 为累计补水量(mm)； T 为温度($^{\circ}\text{C}$)； δ 表示土壤结皮硬度、厚度与上述 6 个因子之间的残差。TR 为土壤结皮硬度、厚度变化趋势； J 为土壤结皮因子； $\rho(x)$ 为第 x 个驱动因子的贡献度； $C(x)$ 为第 x 个驱动因子的变化对长期趋势的贡献。

2 结果与分析

2.1 结皮硬度与厚度动态变化特征

各试验处理小区土壤结皮硬度在观测期内的动态变化见图 1。 T_1 处理、 T_2 处理、 T_3 处理变化趋势大致相同，即土壤结皮硬度在 1 月中旬和 3 月初较低，进入 4 月后土壤结皮硬度快速增加，总体呈先下降后上升的趋势。 T_4 处理土壤结皮硬度在整个观测期间变化较小。 T_1 — T_4 处理土壤结皮硬度平均值分别为 0.99 ± 0.77 , 0.87 ± 0.28 , 1.65 ± 0.35 , $1.50 \pm 0.18 \text{ kg/cm}^2$ ， T_3 , T_4 处理土壤结皮硬度远大于 T_1 , T_2 处理土壤结皮硬度， T_1 处理土壤结皮硬度变化波动最大，其均值标准误为 0.77 kg/cm^2 。差异显著性分析结果表明，整个研究期内 T_1 , T_2 处理的土壤结皮硬度与 T_3 , T_4 处理的土壤结皮硬度普遍具有显著差异($p < 0.05$)，其中 T_1 , T_2 处理之间和 T_3 , T_4 处理之间的土壤结皮硬度在次年 4 月份开始出现显著差异($p < 0.05$)。



注： T_1 — T_4 为 4 个试验处理， T_1 为一年两熟耕地， T_2 为一年一熟耕地， T_3 为裸地， T_4 为自然恢复地。下同。

图 1 研究期间黄泛平原风沙区土壤结皮硬度变化特征

如图 2 所示，各试验处理区土壤结皮厚度在观测期内变化趋势为： T_1 — T_4 处理变化趋势大致相同，即总体呈先下降后上升再下降的趋势，即各处理结皮厚度存在典型的“双峰”现象，各处理不同点在于 T_3 , T_4 处理的变化幅度较 T_1 , T_2 小，且 T_1 , T_2 处理和 T_3 ,

T_4 处理的结皮厚度峰值分别出现在 3 月和 10 月底。 T_1 — T_4 处理土壤结皮厚度平均值分别为： 0.66 ± 0.31 , 0.51 ± 0.22 , 0.60 ± 0.19 , $0.48 \pm 0.21 \text{ cm}$ ， T_1 , T_2 处理土壤结皮厚度大于 T_3 , T_4 处理土壤结皮厚度， T_1 处理土壤结皮厚度变化波动最大。差异显著性分析结果表明，在次年 1 月至 3 月， T_1 — T_4 处理的土壤结皮厚度之间具有显著差异($p < 0.05$)。

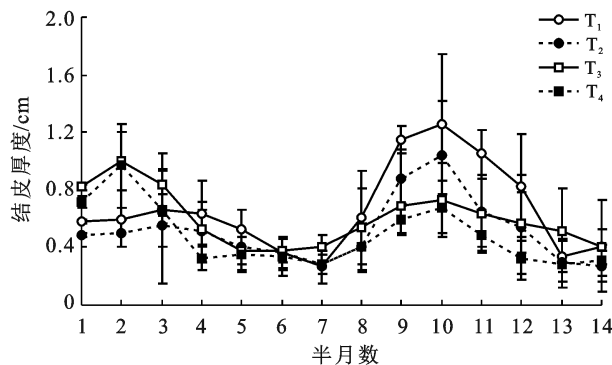


图 2 研究期间黄泛平原风沙区土壤结皮厚度变化特征

2.2 土壤含水量与风速动态变化特征

本研究使用半月的土壤表层(0—5 cm)含水量平均值表征该段时间的土壤含水量水平。如图 3 所示， T_1 — T_4 试验处理土壤表层含水量变化趋势大致相同，即土壤表层含水量在 1—2 月较低且变化较小，在其他月份波动较大，总体呈先下降后上升再下降的变化趋势； T_2 处理的土壤表层含水量最大，平均值为 $0.0817 \pm 0.0253 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ， T_3 处理的土壤表层含水量最小，平均值为 $0.0571 \pm 0.0196 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。地表含水量主要受降水、灌溉和蒸发的影响，观测期内降水量为 202 mm。其中，12 月至次年 2 月降水量较少，约为观测期间总降水量的 1%；10 月至 11 月下半月降水量较多，为 138.2 mm；次年 3 月至 4 月降水量为 26.7 mm，研究期间降水量整体呈先降低后增加的趋势， T_1 处理在 4 月有灌溉措施，灌溉量为 50 mm。

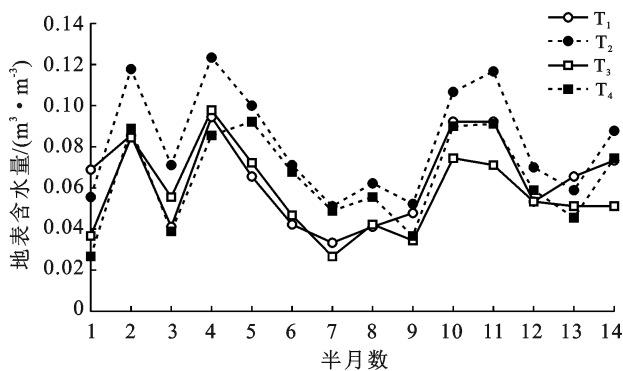


图 3 研究期间黄泛平原风沙区土壤表层含水量变化特征

近地表风速是影响土壤表层含水量的重要因素之一。结果表明， T_1 — T_4 试验处理近地表瞬时风速

变化趋势大致相同,即总体呈先升高后降低的趋势。受地表植被影响, T_3 处理的近地表瞬时风速最大,平均值为 11.63 ± 3.43 m/s, T_4 处理的近地表瞬时风速最小,平均值为 2.66 ± 1.48 m/s。

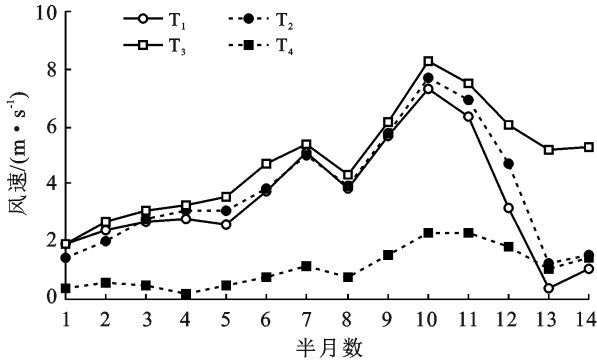


图 4 研究期间黄泛平原风沙区近地表瞬时风速变化特征

2.3 植被动态变化特征

各处理植被高度动态变化情况如图 5 所示。 T_1 、 T_2 处理植被高度变化趋势大致相同。即 3 月前变化较小,进入 3 月后快速增长,总体呈逐渐上升的趋势。 T_1 、 T_2 试验处理最大值分别为 38 ± 3 cm, 50 ± 2 cm; T_4 处理植被高度变化总体呈下降趋势,植被高度最小值为 125 ± 3 cm,最大值为 150 ± 4 cm,在研究期间其植被高度显著大于 T_1 、 T_2 试验处理($p < 0.01$)。

观测期间植被覆盖度动态变化情况如图 6 所示。 T_1 、 T_2 处理植被覆盖度变化大致相同,总体呈逐渐上升的趋势。 T_1 、 T_2 处理最大值分别为 $60\% \pm 2\%$ 、 $65\% \pm 3\%$; T_4 试验处理植被覆盖度变化较平缓,最大值为 $98\% \pm 1\%$,显著大于 T_1 、 T_2 试验处理($p < 0.01$)。

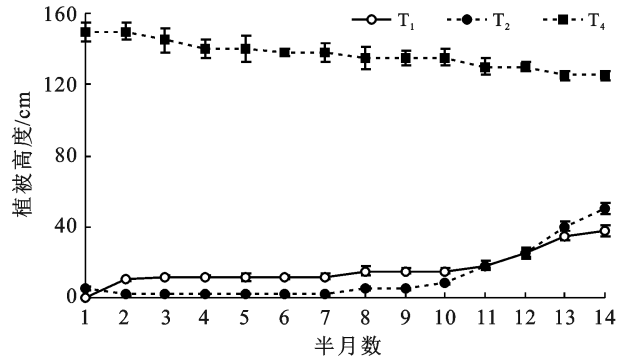


图 5 研究期间黄泛平原风沙区植被高度变化特征

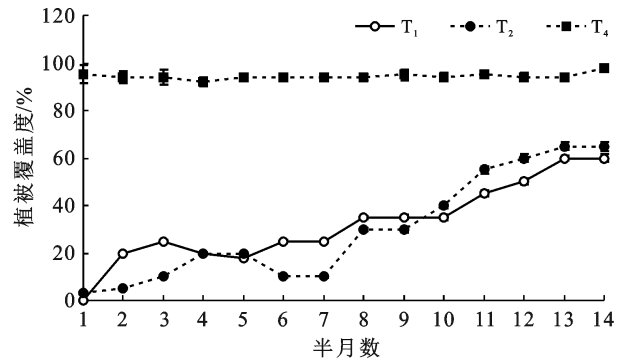


图 6 研究期间黄泛平原风沙区植被覆盖度变化特征

2.4 影响因素分析

累计补水量、土壤表层含水量、植被高度、植被覆盖度、土壤温度和近地表风速等因素是对土壤结皮硬度和土壤结皮厚度可能产生影响的因素,将 T_1 — T_4 处理的土壤结皮硬度和土壤结皮厚度与观测期内各试验处理的上述影响因素进行相关性分析,结果如表 2 所示。

表 2 黄泛平原风沙区 T_1 — T_4 处理土壤结皮硬度和厚度与各影响因素的相关系数

项目	处理区	累计补水量	土壤表层含水量	植被高度	植被覆盖度	土壤温度	近地表风速
土壤结皮硬度	T_1	0.519	0.125	0.763**	0.594*	0.552*	-0.727**
	T_2	0.061	-0.062	0.790**	0.459	0.809*	-0.664**
	T_3	0.114	-0.182	—	—	0.467	-0.334
	T_4	0.091	-0.058	-0.078	-0.327	-0.211	-0.457
土壤结皮厚度	T_1	-0.008	0.383	-0.134	0.081	0.122	0.714*
	T_2	0.001	0.244	-0.286	0.040	0.063	0.708**
	T_3	-0.612*	0.227	—	—	0.617*	-0.234
	T_4	-0.660*	-0.008	0.675**	-0.006	0.465	-0.070

注: **表示在置信度(双测)为 0.01 时,显著相关; *表示在置信度(双测)为 0.05 时,显著相关; —表示无数值。

T_1 、 T_2 处理的土壤结皮硬度与植被高度、土壤温度和近地表风速具有显著相关关系($p < 0.05$), T_1 处理的土壤结皮硬度与植被覆盖度呈显著正相关关系($p < 0.05$),其中 T_1 、 T_2 处理土壤结皮硬度与植被高度相关系数最大,相关系数分别为 0.763, 0.790; T_3 、 T_4 处理的土壤结皮硬度与各影响因素均无显著相关关系。 T_1 、 T_2 处理的土壤结皮厚度与近地表风速呈

显著正相关关系($p < 0.05$), T_3 、 T_4 处理的土壤结皮厚度与累计补水量呈显著负相关关系($p < 0.05$);温度和植被同是土壤结皮厚度和硬度的主要影响因素。

土壤表层含水量(图 3)与土壤结皮硬度的变化(图 1)对比可知,结皮硬度与土壤含水量存在类似的变化趋势,但其响应变化存在半月左右的滞后性,与结皮厚度的变化(图 2)对比可知,结皮厚度与土壤含

水量存在类似的变化趋势。

贡献度计算结果表明,有无耕作条件下,土壤结皮硬度和厚度的主要驱动因子也不相同。耕作条件下,植被高度是影响结皮硬度和厚度变化的最主要驱动因子,其对 T_1, T_2 处理土壤结皮硬度变化的贡献度分别为 37%, 47%, 其对 T_1, T_2 处理土壤结皮厚度变化的贡献度分别为 39%, 46%; 无耕作条件下,近地表风速是影响结皮硬度变化的最主要驱动因子,其对 T_3, T_4 处理土壤结皮硬度变化的贡献度分别为 60%, 51%, 累计补水量是影响结皮厚度变化的最主要的驱动因子,其对 T_3, T_4 处理土壤结皮硬度变化的贡献度分别为 69%, 45%。

3 讨论

3—4 月期间, T_1, T_2, T_3 处理的土壤结皮硬度值快速增加的原因可能为该阶段其植被覆盖较低,土壤受降水影响,土粒间的内聚力增加,进而增大了土壤结皮硬度,该结果与李元元^[17]的研究成果一致。研究期间 T_3 和 T_4 处理土壤结皮硬度整体显著大于 T_1 和 T_2 处理,其原因可能是 T_3, T_4 处理扰动较少所致。 T_1, T_2 处理之间和 T_3, T_4 处理之间的土壤结皮硬度在次年 4 月开始出现显著差异($p < 0.05$),原因可能为进入春季,降雨增加,由于不同的植被覆盖度程度,导致降水对表层土壤的夯实作用产生差异。

研究期间,各处理土壤结皮厚度总体呈先下降后上升再下降的趋势, T_3, T_4 处理的变化幅度较 T_1, T_2 小,且 T_1, T_2 处理和 T_3, T_4 处理的结皮厚度峰值分别出现在 3 月和 10 月底。这可能是由于 T_1, T_2 处理条件下,有多次地表旋翻、收获、播种、施肥、灌溉等人为干扰,使土壤结皮处于相对频繁的“破坏—形成”的循环过程中,而 T_3, T_4 处理长期处于人为干扰较小的环境下,其结皮相对稳定性更高,其整体变化较小。同时 T_1, T_2 试验处理长期(约为 6 a)进行施肥,土壤中有机质含量大,有机胶体密集的负电荷密度提高离子的吸附强度,其吸附力强,导致了土壤颗粒间的凝聚胶结作用提高,进而使土壤结皮厚度增加,该结果与王军等^[18]研究成果一致。在次年 1—3 月, $T_1—T_4$ 处理的土壤结皮厚度之间具有显著差异($p < 0.05$)。其原因可能为 1 月为冬季,降水极少,近地表风速大,结皮厚度偏低,但由于植被覆盖等因素影响,导致土壤小颗粒间的内聚力和土壤结皮厚度出现显著性差异; 3 月为冬、春更替期,可能受降水增多或植被变化的影响,结皮厚度有所增大,但由于植被覆盖等因素影响,不同处理间的土壤表层水分增大程度不同,降水对地表土壤的打击夯实作用也不相同,导致各试验

处理的土壤结皮厚度出现显著差异。

T_1, T_2 处理土壤结皮硬度与植被高度、覆盖度呈显著正相关关系,其原因可能是 T_1, T_2 处理受耕作影响,其植被变化较大且土壤有机质高于其他处理所致,这与刘均阳等^[19]、赵富王等^[20]提出的植物的根系通过物理、生物、电化学作用促进土壤团聚体的形成,有利于土壤结皮硬度的增加的研究成果一致。

各试验处理条件下,土壤结皮硬度与近地表风速均呈现负相关关系,且 T_1, T_2 与之表现出显著相关性。这是可能是由于地表风速增大可加速地表水分蒸发,使得土壤颗粒间吸引力下降,导致土壤结皮硬度下降。各处理土壤结皮硬度和厚度与温度呈现正相关关系,这可能是由于冬季土壤经过长期的昼夜反复冻融作用,土壤结皮进入一种破碎疏松的状态,这与段争虎等^[11]在沙坡头地区对土壤结皮的研究结果一致。

4 结论

(1) 在黄泛平原风沙区,人为耕作不利于风沙土结皮的形成和硬度的保持,减少人为影响(沙地退耕还林、免耕)可以有效减少风蚀,保护土壤资源。

(2) 植被、近地表风速、温度是影响风沙土结皮硬度和厚度的重要外部因素。风沙土结皮厚度、硬度变化趋势与表层含水量表现出同步变化的特征,其中土壤结皮硬度的响应存在一定的滞后性,但结皮厚度、硬度与表层含水量未检验出显著相关性。

(3) 耕作条件下,植被高度是影响结皮硬度和厚度变化的最大驱动因子。无耕作条件下,近地表风速是影响结皮硬度变化的最大驱动因子,累计补水量是影响结皮厚度变化的最大驱动因子。

[参 考 文 献]

- [1] 李智广,袁利.淮河流域黄泛平原风沙区水土流失监管重点[J].中国水土保持,2020(7):7-10,60.
- [2] Singer M J, J Skujinš. Physical properties of arid region soils [M]//Semiarid Lands & Deserts CRC Press,1991: 93-122.
- [3] 李晓丽,申向东.结皮土壤的抗风蚀性分析[J].干旱区资源与环境,2006,20(2):203-207.
- [4] Xu Hengkang, Zhang Yingjun, Shao Xinqing, et al. Soil nitrogen and climate drive the positive effect of biological soil crusts on soil organic carbon sequestration in drylands: A Meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2021,803:150030.
- [5] Yan Shiwei, Yang Jianhao, Zhou Song, et al. Biological soil crusts alleviate the stress of arsenic on rice germination and the underlying immobilization mechanisms [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021,227:112839.

(下转第 76 页)

- cal shrubbery stands in the Yellow River Delta of China [J]. *Catena*, 2017, 156:315-324.
- [16] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Florio E L, et al. Interception loss, throughfall and stemflow by *Larrea divaricata*: The role of rainfall characteristics and plant morphological attributes [J]. *Ecological Research*, 2019, 34(6):753-764.
- [17] 杨全.黄土丘陵区典型草地群落冠层降雨截留容量特征及其影响因素[D].陕西 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020.
- [18] Zhang Yafeng, Wang Xinping, Hu Rui, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, Northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527:1084-1095.
- [19] Jian Shengqi, Hu Caihong, Zhang Guodong, et al. Study on the throughfall, stemflow, and interception of two shrubs in the semiarid Loess region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 279:1077-113.
- [20] O'Halloran L R, Borer E T, Seabloom E W, et al. Regional contingencies in the relationship between aboveground biomass and litter in the world's grasslands [J]. *Plos One*, 2013, 8(2):e54988.
- [21] 吴艳芹.云雾山典型草原枯落物分解特性及影响因子研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [22] Brady N C, Weil R R. The nature and properties of soils (14 th edition)[M]. Englewood:Prentice Hall, 2007.
- [23] Cheng Man, Xiang Yun, Xue Zhijing, et al. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2015, 124:77-84.
- [24] Hu Xia, Li Xiaoyan, Wang Pei, et al. Influence of enclosure on CT-measured soil macropores and root architecture in a shrub-encroached grassland in Northern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187: 21-30.
- [25] Sutanto S J, Wenninger J, Coenders-Gerrits A M J, et al. Partitioning of evaporation into transpiration, soil evaporation and interception: A comparison between isotope measurements and a HYDRUS-1 D model [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2605-2616.
- [26] Peng Huanhua, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, et al. Canopy interception by a spruce forest in the upper reach of Heihe River basin, Northwestern China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4):1734-1741.
- (上接第 68 页)
- [6] Rodriguez-Caballero E, Reyes A, Kratz A, et al. Effects of climate change and land use intensification on regional biological soil crust cover and composition in Southern Africa [J]. *Geoderma*, 2022, 406:115508.
- [7] 方海燕, 屈建军, 俎瑞平, 等. 防沙工程的结皮效应研究 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2):17-20.
- [8] 袁丹婷. VAc-MA 共聚物固沙抑尘剂的合成与研究[D]. 北京:北京化工大学,2012.
- [9] 蔡强国, 吴淑安, 陈浩, 等. 坡耕地地表土结皮对降雨径流和侵蚀产沙过程的影响[C]// 陈永宗, 等. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律试验研究文集. 北京:水利电力出版社, 1990.48-57.
- [10] 吴发启, 范文波. 土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(3):1-3.
- [11] 段争虎, 刘新民, 屈建军. 沙坡头地区土壤结皮形成机理的研究[J]. *干旱区研究*, 1996, 13(2):31-36.
- [12] 袁利, 张春强, 张芷温, 等. 淮河流域黄泛平原风沙区水土流失格局[J]. *中国水土保持*, 2019(12):10-13.
- [13] Ekwue E I. Effects of peat content, rainfall duration and aggregate size on soil crust strength [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 16(6):485-498.
- [14] Ahmad N, Roblin A J. Crusting of river estate soil, Trinidad, and its effect on gaseous diffusion, percolation, and seedling emergence [J]. *Journal of Soil Science*, 1971, 22(1):23-31.
- [15] Hussain S M, Smillie G W, Collins J F. Laboratory studies of crust development in Irish and Iraqi soils (I): Moisture content, penetration resistance, aggregate size and seedling emergence of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. *Soil and Tillage Research*, 1985, 5(1):33-53.
- [16] 吴发启, 范文波. 坡耕地黄壤土结皮的理化性质分析 [J]. *水土保持通报*, 2001, 21(4):22-24.
- [17] 李元元. 化学材料对风蚀调控试验研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [18] 王军, 陈世正. 四川紫色水稻土胶体比表面及其主要影响因素研究[J]. *西南农业大学学报*, 1991, 13(3):64-69.
- [19] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- [20] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5):105-113.