



黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响

王文鑫¹, 王文龙^{1,2}, 郭明明¹, 王天超¹, 康宏亮¹, 杨波¹, 赵满¹, 陈卓鑫¹

(¹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; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 【目的】沟头是黄土高原沟壑区发育最活跃的地貌部位, 关系着整个塬坡沟系统的水土流失。探明黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土壤团聚体特征及土壤可蚀性的影响, 为区域生态环境修复和水土保持效益评价提供科学依据。【方法】以仍进行耕作利用的农地沟头为对照, 研究撂荒后自然恢复植被沟头不同土层(0—10、10—25、25—40 cm)土壤团聚体特征及土壤可蚀性随植被恢复年限(3—30 a)的变化。通过干筛法和湿筛法测定土壤团聚体组成, 计算>0.25 mm水稳性团聚体含量($WR_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)、团聚体分形维数(D)等团聚体特征值, 测定土壤机械组成及有机质含量, 计算土壤可蚀性因子(K)。【结果】(1)与农地沟头相比, 恢复3—30 a植被沟头土壤 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 分别增加11.49%—84.43%、0.18—2.05倍、7.53%—108.62%, 三者随植被恢复年限的增加呈线性递增关系($P < 0.01$), 且均随土层深度增加而减小;(2)植被沟头土壤 PAD 、 D 随植被恢复年限增加以线性方式递减($P < 0.01$), 较农地沟头分别减小3.81%—32.14%、0.55%—6.63%, 二者随土层深度增加而增大;(3)随着植被恢复年限增加沟头土壤可蚀性因子 K 以线性关系递减($P < 0.01$), 较农地沟头减小5.43%—14.44%, K 随着土层深度增加而增大。【结论】植被恢复条件下有机质含量的提升对团聚体形成和稳定性起着重要的作用。沟头土壤可蚀性的减小与水稳性团聚体含量的增加、团聚体稳定性的提高密切相关, 自然恢复条件下植被恢复22—30 a沟头土壤团聚体稳定性和抗蚀性能得到明显提升。

关键词: 团聚体; 土壤可蚀性; 植被恢复; 沟头; 黄土高原沟壑区

Effects of Natural Vegetation Restoration on Characteristics of Soil Aggregate and Soil Erodibility of Gully Heads in Gully Region of the Loess Plateau

WANG WenXin¹, WANG WenLong^{1,2}, GUO MingMing¹, WANG TianChao¹, KANG HongLiang¹,
YANG Bo¹, ZHAO Man¹, CHEN ZhuoXin¹

(¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: 【Objective】 Gully head was the most active geomorphic part in gully region of the Loess Plateau, which was related to the soil erosion of the entire slope gully system. This research aimed at evaluating the effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics and soil erodibility of gully heads in gully region of the Loess Plateau. The research results could

收稿日期: 2019-05-09; 接受日期: 2019-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(41571275)

联系方式: 王文鑫, Tel: 18829353176; E-mail: wangwxc@nwfau.edu.cn. 通信作者王文龙, Tel: 13669222856; E-mail: wlwang@nwsuaf.edu.cn

provide a scientific basis for regional ecological environment restoration and soil and water conservation benefit evaluation. 【Method】 With the farmland as control check, an investigation about soil aggregate characteristics and soil erodibility of different soil layers (0-10, 10-25, 25-40 cm) with different natural vegetation restoration ages (0-30 a) of gully heads was carried out. The aggregates amount, water-stable aggregate content ($WR_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), destruction rate (PAD) and fractal dimension (D) were examined by dry and wet sieving methods. Soil mechanical composition and organic matter content were determined which were used for calculating soil erodibility factor K . 【Result】 (1) $WR_{0.25}$, MWD and GMD of vegetation gully heads increased by 11.49%- 84.43%, 0.18-2.05 times, and 7.53%-108.62%, respectively, compared with the CK (farmland of gully heads). These three indicators linear increased with vegetation restoration years increasing ($P < 0.01$), and decreased with the increase of soil depth; (2) PAD and D of soil aggregate of vegetation gully heads decreased with linear increase of vegetation restoration time ($P < 0.01$), which was 3.81%-32.14% and 0.55%-6.63% lower than that of CK, respectively. Both of them increased with the increase of soil layer; (3) K decreased linearly with the increase of vegetation restoration period ($P < 0.01$), which was 5.43%-14.44% lower than that of CK, and K increased with the increase of soil depth. 【Conclusion】 The increase of organic matter content under vegetation restoration conditions played an important role in the formation and stability of aggregate. The decrease of soil erodibility of gully heads was closely related to the increase of water-stable aggregate content and stability of aggregate. Under natural recovery conditions, soil aggregate stability and soil anti-erodibility of gully heads were significantly improved during the restoration period of 22-30 a.

Key words: soil aggregate; soil erodibility; vegetation restoration; gully head; gully region of the Loess Plateau

0 引言

【研究意义】黄土高原沟壑区是黄土高原水土流失最严重的地区之一,沟头溯源侵蚀剧烈,塬面水流入沟携带大量泥沙,淤积下游河道,威胁人类安全^[1-4]。为控制水土流失,自20世纪70年代起该区开始实施一系列水土保持治理措施,尤其是1999年开始实施“退耕还林还草工程”后,沟头溯源侵蚀的发生受到明显抑制,该区土壤侵蚀得到较好的控制^[1,3-4]。由此可见植被恢复可以有效地防治沟头水土流失、改善当地生态环境。因此,开展黄土高原沟壑区植被恢复对沟头土体稳定性及土壤可蚀性影响的研究,对该区“固沟保塬”植被恢复模式的选择科学意义重大。【前人研究进展】土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,影响着土壤的孔隙状况、肥力、通气性、保水性以及抗侵蚀性等特征,在促进植物生长、防止土壤退化方面具有深远的影响^[5-9]。研究发现植被恢复会对土壤团聚体的组成、分布以及稳定性等特征产生较大影响:同一成土母质基础上发育的土壤,因植被类型不同,团聚体的组成和数量会有较大差异^[9-12],如在黄土丘陵陵区森林植被带水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径要高于森林草原带^[9],自然恢复草地团聚体团聚度要优于人工灌木和人工草地等^[12];植被不同演替年限对土壤团聚体影响显著^[13-17],如水稳性团聚体含量、平均重量直径会随着植被恢复年限的延长不断增大^[13,15-16],团聚体分形维数会随着植被恢复年限的增加而减小^[14,17]等;同时,植被恢复还会影响团聚体的空间分布,有

研究发现植被恢复会使 > 0.25 mm的水稳性团聚体更多的集中在土壤表层,使表层土壤团聚体更稳定^[8,17]。许多学者把土壤团聚体的水稳性作为评价土壤可蚀性的重要指标,认为通过提高土壤水稳性团聚体的数量和稳定性可以提高土壤的抗侵蚀能力,降低土壤可蚀性^[9,11,14]。因此在黄土高原地区推行退耕还林还草、促进植被恢复是增加团聚体稳定性和土壤抗蚀性、减少土壤侵蚀的有效方法。【本研究切入点】目前报道的关于黄土高原植被恢复对土壤团聚体特征及土壤可蚀性影响的研究多集中于丘陵沟壑区坡面^[9,13-14,19-20],关于高原沟壑区的研究相对较少,涉及沟头的研究更为鲜见。而沟头作为黄土高原沟壑区发育最活跃的地貌部位,关系着整个塬坡沟系统的水土流失,加强对沟头的防护,既可以抑制其向塬心溯源前进,保护塬面,又可以控制沟床下切、沟岸扩张,减缓沟谷发育。因此探究植被恢复对沟头土壤团聚体稳定性及土壤可蚀性的影响,对科学评价黄土高原沟壑区沟头植被恢复的水土保持效益和指导植被建设与优化意义重大。【拟解决的关键问题】鉴于此,本研究以黄土高原沟壑区沟头自然恢复草地为研究对象,通过研究不同恢复年限草地的土壤团聚体特征和土壤可蚀性的变化,探讨植被恢复对沟头土壤团聚体稳定性及土壤可蚀性的影响,为区域植被建设和水土保持效益评价提供科学参考。

1 材料与amp;方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原沟壑区南小河流域($35^{\circ}41'$

—35°45'N, 107°30'—107°37'E)。该流域是泾河支流蒲河的一级支沟, 流域面积 36.3 km², 地貌以塬面、梁峁坡和沟谷为主, 具有典型的黄土高原沟壑区地貌特征。该区气候属于温带大陆季风性气候, 多年平均降雨量为 556.5 mm, 降雨集中在 7—9 月, 且多为暴雨, 侵蚀作用较强。土壤类型以黄绵土和黑垆土为主, 表层土壤基本为黄土所覆盖, 土质疏松, 抗蚀能力弱, 塬面汇集的大量径流集中对沟头进行冲刷, 沟头溯源侵蚀严重, 塬面不断被蚕食破坏。为了控制沟头、坡面和沟道的水土流失, 该流域自 20 世纪 70 年代起开展了大规模的水土流失综合治理, 有效地控制了水土流失蔓延, 使其成为改善生态环境的示范性区域^[21]。目前该流域植被主要包括刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 等人工林灌以及白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*) 等自然恢复草被。

1.2 样地选取与样品采集

1.2.1 样地选取 调查采样时间在 2018 年 7—8 月。首先对南小河流域支沟沟头展开调查, 结果表明南小河流域支沟沟头大都是自然恢复的、人为扰动较小的退耕地, 退耕年限在 3—30 a, 有极少数沟头仍在进行耕作, 沟头的土壤多为黄绵土, 沟头坡度在 2°—7°, 多集中在 4°。该流域沟头退耕地上的恢复植被大

都停留在草本群落阶段, 沟头植被演替均经历了大体相近的一年生草本群落阶段到多年生蒿类、禾本类草本群落阶段, 主要植物种为猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、冰草、铁杆蒿、白羊草等, 构成了依次为优势种且以其他物种为主要伴生种的群落^[15, 22-23]。在进行样地选择时, 利用生态学领域常用的“空间代替时间”的方法, 在流域内选择坡度、坡向、海拔、土壤类型等相似, 植被长势均匀稳定的群落作为研究样地, 此法虽然无法保证所有条件完全一致, 但尽可能缩小坡度、坡向、海拔、土壤类型等立地条件因素的差异, 从而认为这些因素对结果的影响可忽略^[24]。按照植被演替规律和恢复年限选择 15 个具有典型性和代表性的草本群落样地, 分别为 3 个恢复 3 a 猪毛蒿群落、3 个恢复 8 a 冰草+铁杆蒿群落、3 个恢复 15 a 铁杆蒿群落、3 个恢复 22 a 铁杆蒿+白羊草群落、3 个恢复 30 a 白羊草群落, 选择的样地坡度在 2°—6°, 坡向为阳坡或半阳坡, 样地间高程差不超过 100 m, 土壤类型为黄绵土, 恢复年限通过走访农户、咨询专家并结合植被演替规律确定。每个样地按从上到下斜对角线方式布设 3 个 2 m × 2 m 样方进行植被调查, 通过计算样方内各植物种重要值确定样地优势种群落。通过对样方垂直拍照, 将照片导入 Image 计算得到植被覆盖度。对照组选择了 3 个未退耕的、种植玉米 (*Zea mays*) 的农地沟头。采样地点见图 1, 样地基本信息如表 1 所示。

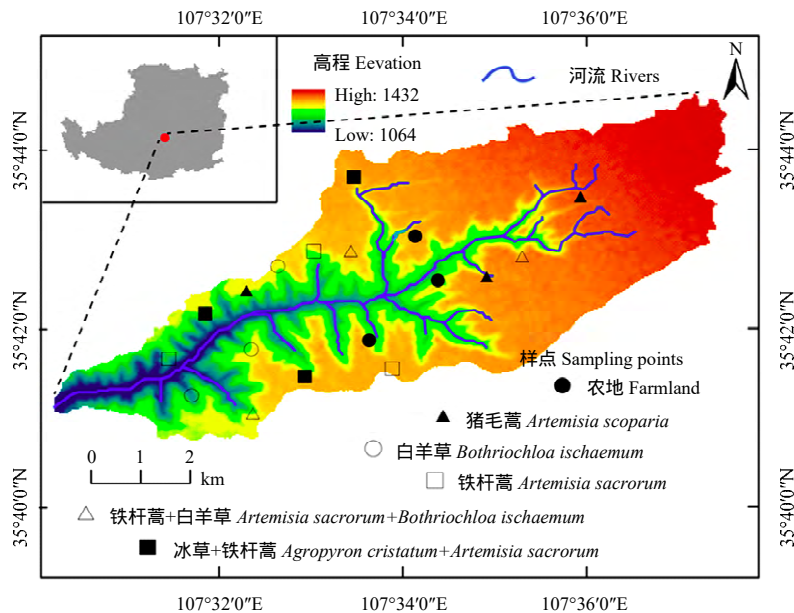


图 1 研究区及采样点

Fig. 1 Research area and sampling points

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of each experimental site

样地编号 Site code	恢复年限 Restoration age (a)	优势种群落 Dominant species	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	海拔 Altitude (m)	植被覆盖度 Vegetation coverage (%)
CK	0	玉米 <i>Zea mays</i>	2	N66°E	1301	-
			2	S	1275	-
			3	N52°E	1358	-
NR3	3	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	2	S30°W	1360	45
			3	S30°E	1323	46
			4	S36°W	1351	44
NR8	8	冰草+铁杆蒿 <i>Agropyron cristatum+Artemisia sacrorum</i>	4	S41°W	1269	55
			5	S48°E	1303	55
			5	E	1271	58
NR15	15	铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i>	3	N62°E	1267	63
			4	N49°E	1272	64
			5	S	1289	61
NR22	22	铁杆蒿+白羊草 <i>Artemisia sacrorum+Bothriochloa ischaemum</i>	6	S43°E	1343	72
			6	S25°W	1278	76
			7	S	1302	78
NR30	30	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	3	E	1262	83
			4	S	1272	75
			5	S51°E	1265	76

1.2.2 样品采集 在所选取的 15 个植被沟头样地和 3 个农地沟头样地上采样, 在距离沟头 0.5—1.0 m 的位置设置 3 个 1 m × 1 m 的取样点, 分别挖取 0—40 cm 深的土壤剖面, 按土壤表层 (0—10 cm)、中层 (10—25 cm)、下层 (25—40 cm) 逐层采集原状土样各 1 kg, 共采集原状土样 162 个 (1 个/层 × 3 层/样点 × 3 样点/样地 × 18 样地)。将采集的原状土样装入硬纸盒中, 防止在运输过程中受到挤压破坏。将所采集土样运回室内, 在阴凉处自然风干, 在风干过程中沿团聚体间自然裂隙轻轻掰分成直径 1 cm 左右的小土块, 剔除其中植物残体和小石块, 用于土壤团聚体的测定。

1.3 样品分析

土壤机械稳定性团聚体分级采用干筛法。将孔径分别为 5、2、1、0.5、0.25 mm 的土筛按孔径由大到小叠放成一组套筛, 称取 500 g 原状风干土样并放置于土筛上, 筛分成不同粒级团聚体, 称质量并计算其质量比例。

土壤水稳性团聚体组成的测定采用湿筛法。用 TTF-100 型土壤团聚体分析仪, 将 50 g 样品放置于孔径自上而下为 5、2、1、0.5 和 0.25 mm 的各级套筛之

上, 先用水缓慢湿润 10 min 后, 以每 40 r/min 的频率, 振荡 20 min。将各筛上的团聚体分别冲洗至铝盒当中在 60 °C 下烘干, 称取质量。分别得到 > 5、5—2、2—1、1—0.5、0.5—0.25、< 0.25 mm 等 6 级土壤团聚体。

土壤颗粒组成采用 MS2000 型激光粒度仪测定, 土壤颗粒分级采用美国制。土壤有机质含量 (SOM) 的测定采用重铬酸钾外加热法。每个土壤样品测定 3 次颗粒组成和有机质含量, 取平均值记录结果。

1.4 指标计算

(1) > 0.25 mm 团聚体含量采用计算公式^[25]:

$$R_{0.25} = M_{r>0.25} / M_T \times 100\% \quad (1)$$

式中, $R_{0.25}$ 为 > 0.25 mm 团聚体含量, $M_{r>0.25}$ 为 > 0.25 mm 团聚体质量 (g); M_T 为团聚体总质量 (g)。

(2) 平均重量直径和几何平均直径是反映团聚体大小分布、评价团聚体稳定性的重要指标, 计算公式如下^[26-27]:

$$MWD = \sum X_i W_i / \sum W_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp(\sum W_i \ln X_i / \sum W_i) \quad (3)$$

式中, MWD 为团聚体平均重量直径 (mm); GMD

为团聚体几何平均直径 (mm) ; X_i 为团聚体各粒径的平均直径 (mm) ; W_i 为团聚体各粒径的百分含量。

(3) 团聚体破坏率是表征土壤团聚体水稳性的主要指标, 计算式为^[28] :

$$PAD=(DR_{0.25}-WR_{0.25})/DR_{0.25} \times 100\% \quad (4)$$

式中, PAD 为 > 0.25 mm 团聚体破坏率, $DR_{0.25}$ 是 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体的含量, $WR_{0.25}$ 是 > 0.25 mm 水稳性团聚体的含量。

(4) 土壤团聚体质量分形维数是评价土壤团聚体特征更敏感、更准确的参数。本文采用杨培岭等^[29]的土壤颗粒分形模型计算 :

$$D_i=3-\lg(M_i/M_T)/\lg(X_i/X_{max}) \quad (5)$$

式中, D_i 为团聚体质量分形维数, M_i 为团聚体粒径 $< X_i$ 的累计质量 (g) ; X_{max} 为团聚体最大粒级的平均直径。

(5) Williams 等在 1990 年建立了 EPIC (erosion-productivity impact calculator) 模型, 该模型在土壤侵蚀预测模块中采用土壤有机碳和粒径组成资料来估算土壤可蚀性 K 值, 公式为^[30] :

$$K=\{0.2+0.3\exp[-0.0256SAN(1.0-SIL/100)]\} \times [SIL/(CLA+SIL)]^{0.3} \times \{1.0-0.25C/[C+\exp(3.72-2.95C)]\} \times \{1.0-0.7SN_i/[SN_i+\exp(-5.51+22.9SN_i)]\} \quad (6)$$

式中, SAN 为砂粒 (0.05—2.0 mm) 含量 (%), SIL 为粉粒 (0.002—0.05 mm) 含量 (%), CLA 为黏粒 (< 0.002 mm) 含量 (%); C 为有机碳含量 (%), $C=0.583 \times SOM$, SOM 为土壤有机质含量 (%) ^[23]; $SN_i=1-SAN/100$; K 为土壤可蚀性因子, K 值单位是美国制, 计算后将 K 值乘以 0.1317 转化为国际制单位, $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot hm^2$ 。

1.5 数据处理

采用 SPSS 16.0 对试验数据进行统计分析, 其中采用 Duncan 法对不同恢复年限不同土层 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 、 PAD 、 D 、 K 等指标进行差异性检验 ($P < 0.05$), 采用线性回归分析对 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 、 PAD 、 D 、 K 等指标与植被恢复年限进行回归分析, 采用 Pearson 相关分析法对 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 、 PAD 、 D 、 K 等指标进行相关性分析; 采用 Origin 2016 软件绘制图形。

2 结果

2.1 植被恢复对沟头土壤水稳性团聚体 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 的影响

通过湿筛法所得到的沟头土壤水稳性团聚体 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 见表 2。随着植被群落的恢复演替, $WR_{0.25}$

逐渐增大, 其在恢复 0—3 a 增长较小, 0—40 cm 土层较农地平均增加 11.49%, 恢复 8—30 a 较农地显著增大 ($P < 0.05$), 较农地增加 34.45%—84.43%, 其中恢复 22—30 a $WR_{0.25}$ 显著大于其他恢复年限。在猪毛蒿群落向白羊草群落的演替过程中, 同一样地 $WR_{0.25}$ 随着土层深度的增加逐渐减小, 且土壤表层 (0—10 cm) $WR_{0.25}$ 显著大于下层 (25—40 cm) ($P < 0.05$)。回归分析表明, 沟头表层、中层 (10—25 cm)、下层土壤水稳性团聚体含量 $WR_{0.25}$ 随植被恢复年限的增加均呈极显著递增的线性关系 ($R^2=0.969, 0.976, 0.910$; $P < 0.01$)。

由表 2 可知, 土壤团聚体平均重量直径 MWD 随着恢复年限的增加逐渐增大, 恢复 3 a 猪毛蒿群落 0—40 cm 土层 MWD 较农地平均增加 0.18 倍, 与之差异不显著 ($P > 0.05$), 恢复 8、15、22、30 a 团聚体 MWD 较农地分别显著增加 0.64、0.91、1.74、2.05 倍 ($P < 0.05$)。恢复 0—30 a 每一样地 MWD 随着土层深度的增加逐渐减小, 恢复 3、8、22、30 a 土壤表层与中层 MWD 没有显著差异 ($P > 0.05$), 而恢复 0—30 a 表层 MWD 均显著大于下层 ($P < 0.05$)。回归分析表明, 沟头表层、中层、下层土壤 MWD 随植被恢复年限的增加均呈极显著递增的线性关系 ($R^2=0.981, 0.967, 0.976$; $P < 0.01$)。

在猪毛蒿群落向白羊草群落的演替过程中土壤团聚体几何平均直径 GMD 逐渐增大, 在恢复初期 (0—3 a) GMD 增长较缓, 较农地平均增加 7.53%, 恢复 8—30 a 较农地增加显著 ($P < 0.05$), 分别增加 28.67%、48.08%、88.31%、108.62%。每一样地 GMD 随着土层深度的增加均逐渐减小, 且表层土壤 GMD 始终显著大于下层, 除恢复 8、15 a 外其他恢复年限中层 GMD 同样显著大于下层 ($P < 0.05$)。回归分析表明, 沟头表层、中层、下层土壤 GMD 随植被恢复年限的增加均呈极显著递增的线性关系 ($R^2=0.987, 0.977, 0.980$; $P < 0.01$)。此外, 当恢复年限达到 22 a、30 a 时, MWD 、 GMD 要显著大于其他恢复年限, 同时, 恢复 8 a 铁杆蒿群落的出现和恢复 22 a 白羊草群落的出现使 MWD 、 GMD 均较其前一恢复年限 (5 a、15 a) 显著增大 ($P < 0.05$), 分别增加了 0.39 倍、19.69%, 0.44 倍、27.21%。

2.2 植被恢复对沟头土壤团聚体破坏率 (PAD) 及分形维数 (D) 的影响

沟头不同恢复年限样地土壤团聚体破坏率 (PAD)、团聚体分形维数 (D) 如图 2 所示, PAD 、 D 均随恢

表 2 沟头不同恢复年限样地 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD Table 2 $WR_{0.25}$, MWD and GMD of different restoration age sites of gully heads

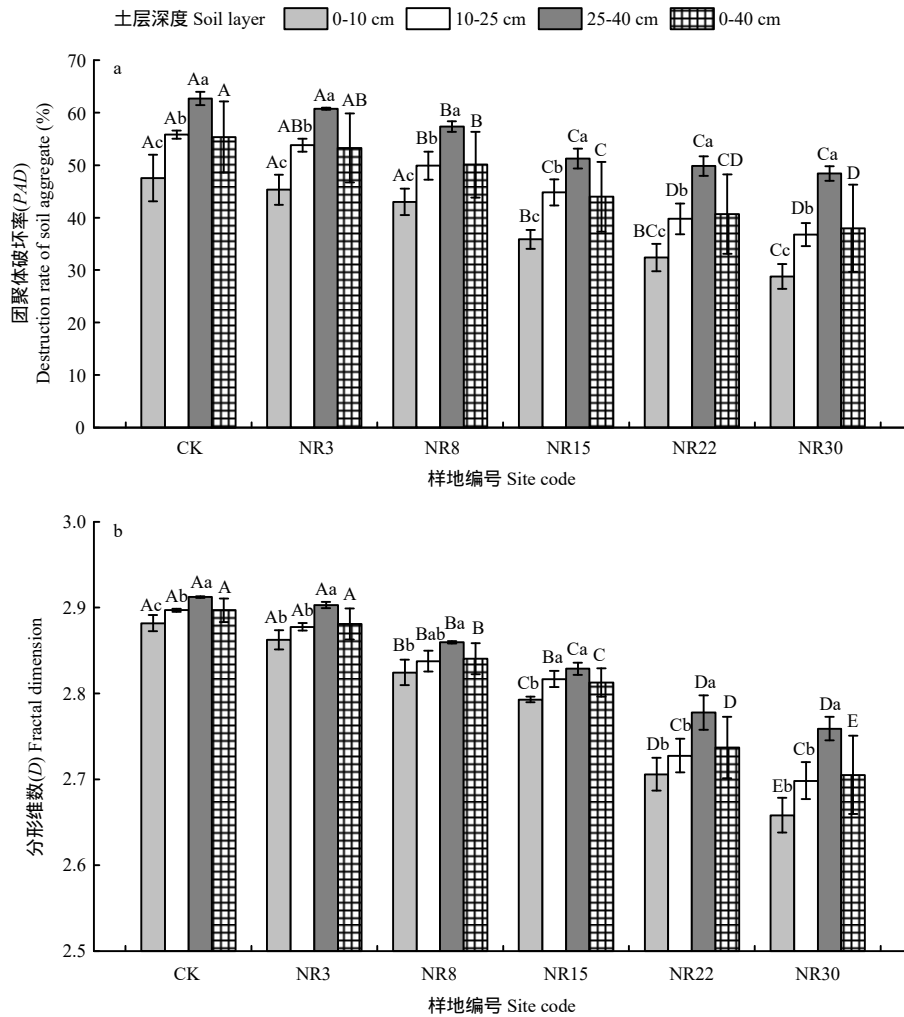
样地编号 Site code	土层 Soil layer (cm)	$WR_{0.25}$ (%)	MWD (mm)	GMD (mm)
CK	0—10	28.194±2.239Da	0.442±0.037Da	0.210±0.010Ea
	10—25	26.410±1.248Dab	0.374±0.014Cb	0.196±0.002Da
	25—40	22.910±0.304Db	0.311±0.005Dc	0.181±0.001Db
	0—40	25.838±2.653D	0.376±0.058E	0.196±0.013E
NR3	0—10	32.519±2.440Da	0.520±0.043Da	0.230±0.013DEa
	10—25	29.335±0.735Da	0.460±0.018Ca	0.213±0.004Da
	25—40	24.757±0.421Db	0.352±0.017Db	0.189±0.002Db
	0—40	28.870±3.518D	0.444±0.075E	0.211±0.019E
NR8	0—10	38.078±2.010Ca	0.674±0.060Ca	0.271±0.016Da
	10—25	35.183±1.727Ca	0.625±0.050Bab	0.255±0.013Cab
	25—40	30.944±0.983Cb	0.539±0.003Cb	0.230±0.003Cb
	0—40	34.735±3.353C	0.613±0.072D	0.252±0.021D
NR15	0—10	44.081±1.227Ca	0.784±0.012Ca	0.315±0.005Ca
	10—25	40.119±1.705Bb	0.694±0.037Bb	0.285±0.012Cb
	25—40	37.946±1.326Bb	0.651±0.028Bb	0.269±0.008Bb
	0—40	40.715±2.917B	0.710±0.062C	0.290±0.021C
NR22	0—10	48.641±2.158ABa	1.139±0.072Ba	0.412±0.024Ba
	10—25	46.441±2.370Aa	1.061±0.079Aab	0.382±0.023Ba
	25—40	39.771±1.237ABb	0.877±0.082Ab	0.316±0.021Ab
	0—40	44.951±4.261A	1.026±0.135B	0.370±0.046B
NR30	0—10	52.439±2.424Aa	1.312±0.064Aa	0.477±0.035Aa
	10—25	49.297±1.889Aa	1.168±0.081Aa	0.419±0.028Aa
	25—40	41.383±1.247Ab	0.952±0.053Ab	0.336±0.016Ab
	0—40	47.706±5.030A	1.144±0.162A	0.411±0.064A

不同大写字母表示相同土层不同样地之间差异显著, 不同小写字母表示同样地不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different capital letters and lowercase letters indicate significant difference at 5% level between different sites in the same soil layer and between different soil layers in the same site, respectively. The same as below

复年限的增加逐渐减小。由图 2 可见, 在恢复 3 a 团聚体破坏率 PAD 较农地减小 3.81%, 与之差异不显著 ($P > 0.05$), 后随着恢复年限增加 PAD 较农地显著减小 ($P < 0.05$), 恢复 8—30 a 较农地减小 9.57%—32.14%。在猪毛蒿群落向白羊草群落的演替过程中, 同样地 PAD 随着土层深度的增加逐渐增大, 且 3 个土层 PAD 差异显著 ($P < 0.05$)。回归分析表明, 沟头表层 (0—10 cm)、中层 (10—25 cm)、下层 (25—40 cm) 土壤团聚体破坏率均与植被恢复年限呈极显著递减的线性关系 ($R^2=0.982, 0.988, 0.926$; $P < 0.01$)。

由图 2 知, 在恢复 3 a 团聚体分形维数 (D) 与农地差异不显著 ($P > 0.05$), 相比减小 0.55%, 在恢复 3—30 a 内 D 较农地减小 1.95%—6.63%, 且恢复 22—30 a 分形维数 D 显著大于其他恢复年限。每一样地 D 随着土层深度的增加均逐渐增大, 且土壤表层 (0—10 cm) D 始终显著大于下层 (25—40 cm), 除恢复 8、15 a 外其他恢复年限土壤中层 (10—25 cm) D 同样显著大于下层 ($P < 0.05$)。回归分析表明, 沟头表层、中层、下层土壤团聚体分形维数 D 均与植被恢复年限呈极显著递减的线性关系 ($R^2=0.984, 0.971, 0.978$; $P < 0.01$)。



不同大写字母表示相同土层不同样地之间差异显著，不同小写字母表示同样地不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Different capital letters and lowercase letters indicate significant difference at 5% level between different sites in the same soil layer and between different soil layers in the same site, respectively. The same as below

图2 沟头不同恢复年限样地土壤团聚体破坏率 (PAD)、分形维数 (D) 的变化

Fig. 2 Variation of destruction rate of soil aggregate and fractal dimension of different restoration age sites of gully heads

2.3 植被恢复对沟头土壤可蚀性因子 (K) 的影响

表3反映的是恢复0—30 a沟头土壤机械组成与有机质含量的变化。由表3知，恢复3—30 a沟头土壤黏粒含量 *CLA*、粉粒含量 *SIL* 均较农地有所增加，二者较农地分别增加5.11%—29.43%、0.09%—2.74%，砂粒含量 *SAN* 较农地减小11.99%—27.40%，且随着土层深度增加，土壤黏粒含量 *CLA*、粉粒含量 *SIL* 呈逐渐增大的趋势，砂粒含量 *SAN* 呈减小趋势。此外，沟头土壤有机质含量 *SOM* 随恢复年限的增加逐渐增大，恢复3—30 a较农地增加0.31—2.02倍，且均较农地显著增大 ($P < 0.05$)。除恢复3 a外，其他恢复年限样地土壤有机质含量

SOM 随着土层深度增加均逐渐减小，表层 (0—10 cm) 土壤有机质含量始终显著大于10—40 cm土层 ($P < 0.05$)。

如图3所示，随着恢复群落的演替，沟头土壤可蚀性因子 *K* 逐渐减小。沟头农地 (CK) 3个土层 *K* 平均为 $0.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，随着恢复时间的不断增加，*K* 均较农地显著减小 ($P < 0.05$)，恢复3、8、15、22、30 a较农地分别减小5.43%、6.73%、10.57%、13.19%、14.44%，当恢复年限达到22 a、30 a时，*K* 较其他恢复年限显著增大。在猪毛蒿群落向白羊草群落的演替过程中，沟头每一样地 *K* 随着土层深度的增加均逐渐增加，恢复0—15 a *K* 在3

表 3 沟头不同恢复年限样地土壤颗粒组成及有机质含量

Table 3 Soil mechanical composition and organic matter content of different restoration year sites of gully heads

样地编号 Site code	土层 Soil layer (cm)	黏粒含量 <i>CLA</i> Clay content (%)	粉粒含量 <i>SIL</i> Silt content (%)	砂粒含量 <i>SAN</i> Sand content (%)	有机质含量 <i>SOM</i> Soil organic matter content (%)
CK	0—10	17.95±0.38BCa	64.40±1.00ABb	17.66±0.75BCa	0.81±0.04Da
	10—25	16.44±0.45Cab	65.77±0.35Bab	17.78±0.70Aa	0.77±0.01Ea
	25—40	14.98±1.49Cb	66.76±1.06Ba	18.26±1.84Aa	0.56±0.05Ab
	0—40	16.46±1.52C	65.65±1.30C	17.90±1.24A	0.72±0.12F
NR3	0—10	20.11±1.73ABa	66.33±0.95ABab	13.56±0.94Ca	1.00±0.27Da
	10—25	19.70±0.99ABa	65.63±0.37Bb	14.67±0.62Ba	1.02±0.05Da
	25—40	18.05±0.50Ba	67.50±0.36Ba	14.46±0.80Ba	0.79±0.12Ba
	0—40	19.28±1.49B	66.49±0.99ABC	14.23±0.93CD	0.94±0.20E
NR8	0—10	17.93±0.45BCa	65.99±1.08ABa	16.08±0.91BCa	1.52±0.03Ca
	10—25	19.40±1.31Ba	66.83±0.51ABa	13.77±1.66BCa	1.21±0.03Cb
	25—40	18.62±0.21Ba	67.62±0.59Ba	13.76±0.54BCa	1.09±0.04Cc
	0—40	18.65±1.01B	66.81±1.02AB	14.54±1.58BC	1.27±0.19D
NR15	0—10	20.43±1.15Aa	63.91±0.49Bc	15.66±1.46BCa	1.76±0.10Ca
	10—25	21.96±0.38Aa	65.95±0.26Bb	12.09±0.32Cb	1.26±0.08Cb
	25—40	21.51±2.32Aa	67.26±0.63Ba	11.24±1.99CDb	1.15±0.04Cb
	0—40	21.30±1.64A	65.71±1.46BC	13.00±2.39D	1.39±0.28C
NR22	0—10	17.85±0.41Ca	66.52±0.98Ab	15.64±0.69BCa	2.20±0.11Ba
	10—25	19.59±1.99ABa	65.83±1.79Bb	14.58±1.12Ba	1.82±0.15Bb
	25—40	20.63±0.48ABa	69.97±0.56Aa	9.40±0.56Db	1.19±0.00Cc
	0—40	19.36±1.66B	67.44±2.19A	13.21±2.85CD	1.73±0.43B
NR30	0—10	14.05±0.81Dc	64.49±1.47ABb	21.46±2.23Aa	3.06±0.24Aa
	10—25	16.19±0.18Cb	67.90±0.59Aa	15.91±0.74ABb	2.09±0.11Ab
	25—40	21.65±1.06Aa	68.46±1.26ABa	9.89±0.22Dc	1.33±0.03Dc
	0—40	17.30±3.29C	66.96±2.11A	15.75±4.92B	2.16±0.72A

个土层中没有显著差异 ($P > 0.05$), 恢复 22—30 a 表层 (0—10 cm) 土壤 K 要显著小于 10—40 cm 土壤 ($P < 0.05$)。回归分析表明沟头表层 (0—10 cm)、中层 (10—25 cm)、下层 (25—40 cm) 土壤可蚀性因子 K 均随植被恢复年限的增加以线性关系递减变化 ($R^2=0.950, 0.869, 0.849; P < 0.01$)。

2.4 沟头土壤可蚀性与土壤团聚体特征的相关性

表 4 反映的是沟头土壤团聚体特征、机械组成、有机质含量与土壤可蚀性之间的相关性。由表 4 可知, 土壤团聚体水稳性团聚体含量 ($WR_{0.25}$)、平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、团聚

体破坏率 (PAD)、团聚体分形维数 (D)、土壤可蚀性因子 (K) 与有机质含量 (SOM) 关系密切, 其中 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 与 SOM 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), PAD 、 D 、 K 与 SOM 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 而土壤团聚体以及土壤可蚀性与土壤的机械组成即砂粒、粉粒、粘粒的含量没有显著的相关性 ($P > 0.05$)。土壤可蚀性与土壤团聚体密切相关, 土壤可蚀性因子 (K) 与 $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与 PAD 、 D 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 其中 K 与 $WR_{0.25}$ 相关性明显高于其他指标。

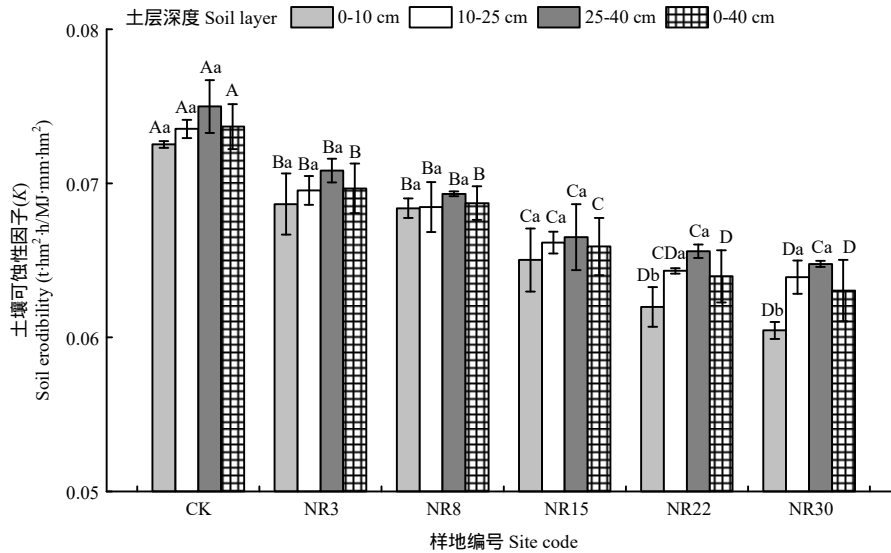


图3 沟头不同恢复年限样地土壤可蚀性因子 (K) 的变化

Fig. 3 Variation of soil erodibility of different restoration age sites of gully heads

表4 沟头土壤可蚀性与土壤团聚体特征、机械组成、有机质含量的相关性

Table 4 Correlate relationships between characteristic of soil aggregate, mechanical composition, organic matter content and soil erodibility of gully heads

指标 Index	$WR_{0.25}$	MWD	GMD	PAD	D	CLA	SIL	SAN	SOM	K
$WR_{0.25}$	1									
MWD	0.970**	1								
GMD	0.969**	0.994**	1							
PAD	-0.907**	-0.851**	-0.873**	1						
D	-0.972**	-0.999**	-0.997**	0.860**	1					
CLA	0.042	-0.078	-0.142	0.088	0.097	1				
SIL	-0.050	0.055	-0.018	0.377	-0.030	0.252	1			
SAN	-0.007	0.031	0.116	-0.254	-0.058	-0.876**	-0.687**	1		
SOM	0.917**	0.919**	0.946**	-0.903**	-0.929**	-0.278	-0.237	0.326	1	
K	-0.961**	-0.940**	-0.933**	0.838**	0.940**	-0.155	-0.041	0.137	-0.885**	1

**表示显著 $P < 0.01$ 水平 **Correlation is significant at 0.01 levels

3 讨论

本研究中随着植被恢复年限的增加，沟头土壤水稳性团聚体含量 $WR_{0.25}$ 、平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 逐渐增加，团聚体破坏率 (PAD)、团聚体分形维数 (D) 逐渐减小，这与 WANG 等^[31]、徐红伟等^[32] 研究结果一致。作为反映土壤团聚体稳定性的重要指标， $WR_{0.25}$ 、 MWD 、 GMD 值越大， PAD 、 D 值越小，土壤团聚体越稳定，土壤抗侵蚀

能力越强^[25,28,33-34]。本研究中恢复 30 a 白羊草群落土壤水稳性团聚体含量、平均重量直径和团聚体分形维数分别为 47.71%、1.14 mm、2.71，而陈文媛等^[17] 在黄土丘陵区的研究发现恢复 10 a 草地土壤水稳性团聚体含量、平均重量直径和团聚体分形维数分别为 59.89%、1.82 mm、2.74，当恢复 25 a 时三者分别达到了 72.69%、2.71 mm、2.61，明显大于本研究结果，这是因为高原沟壑区与丘陵区相比在降雨、土壤、地貌形态及侵蚀状况等方面均存在较大差异，这种侵蚀

环境的差异性对 2 个区域的植被恢复种类、植被演替规律、植被群落特征等产生较大影响,使 2 个区域植被改良土壤团聚体和提高土壤抗侵蚀能力的进程产生了较大差别^[35-36],从而导致 2 个区域研究结果差异明显。而郭明明等^[15]、丁康等^[37]研究得到的黄土高原沟壑区坡面土壤水稳性团聚体含量、*MWD* 值等较本研究结果也有较大增加,这是因为与坡面相比沟头土壤要多一个侵蚀面即沟头立壁,沟头土壤会受到更多的水力、风力、重力侵蚀,这对沟头植被的生长、有机质的积累等产生较大影响,从而使土壤水稳性团聚体数量和稳定性降低,使土壤抗侵蚀能力减弱。本研究中,相关分析表明,有机质含量与 *WR*_{0.25}、*MWD*、*GMD* 呈极显著正相关,与 *PAD*、*D* 呈极显著负相关,说明植被恢复条件下有机质含量的提升对水稳性团聚体形成和稳定性起着重要的作用,这也与王晓娟等^[39]得出的有机肥处理可显著提高土壤水稳性团聚体含量、平均质量直径和团聚体稳定性的结论相吻合。土壤中微团聚体通过有机质的黏合、胶结作用形成水稳性大团聚体,土壤有机质是影响团聚体形成和稳定的主要机制^[40-41]。因此,增加土壤有机质含量是提升团聚体稳定性,防止土壤侵蚀的有效途径。

土壤可蚀性是土壤内在性质对外营力综合作用的集中反映,表征的是土壤对外界侵蚀的敏感性,*K* 值越小,土壤抗侵蚀能力越强^[38]。本研究发现,植被恢复年限对土壤可蚀性有显著影响,土壤可蚀性因子 *K* 会随着恢复年限增加呈极显著线性递减,这与 GUO 等^[23]研究结果相吻合。恢复 3—30 a 植被沟头土壤黏粒含量、粉粒含量、有机质含量较农地分别增加 5.11%—29.43%、0.09%—2.74%、0.31—2.02 倍,砂粒含量较农地减小 11.99%—27.40%,这说明随着植被的恢复演替,沟头土壤有机质含量增加,土壤逐渐偏离沙化,土壤的黏结性更好,使土壤中细小颗粒不易流失,团粒间胶结作用增强,提高了水稳性团聚体的数量和稳定性,从而降低了沟头土壤的可蚀性,这也与严方晨等^[14]对黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段土壤抗蚀性的研究结果相吻合。恢复年限达到 22 a、30 a 时,*WR*_{0.25}、*MWD*、*GMD* 均较其他恢复年限显著增大,*D*、*K* 均较其他恢复年限显著减小,说明黄土高原沟壑区沟头在自然恢复 22—30 a 时土壤团聚体稳定性和抗蚀性能得到明显提升。此外,本研究中在植被恢复 30 a 时土壤可蚀性仍有减小的趋势,而 WANG 等^[31]研究发现土壤可蚀性随撂荒年限增加而减小并在恢复 28 a 后趋于稳定,说明了虽然植被恢复可以促

进土壤团聚体改良,减小土壤对侵蚀的敏感性,但在沟头区域自然恢复条件下团聚体稳定性的提高、土壤可蚀性的减小是一个更加漫长的过程,因此对沟头的防护显得尤为重要。本研究中土壤可蚀性与土壤团聚体表现出显著相关性,*K* 与 *WR*_{0.25}、*MWD*、*GMD* 呈极显著负相关,与 *PAD*、*D* 呈极显著正相关。大量研究已经证实随着植被恢复年限增加,植被覆盖度逐渐增大,地上生物量逐渐增加,归还到土壤中的枯落物也随之增加,枯落物的分解增加了土壤的有机质含量,有机质的胶结作用得以加强,从而使团聚体的团聚作用增强^[42-44];同时枯落物作为土壤微生物碳源,枯落物增加使土壤微生物量和多样性增加,进而产生更多促进土壤团聚体形成的黏合剂,使水稳性团聚体数量和稳定性增加^[41,45],此外植被恢复增加了根系生物量和根系分泌物,改善土壤结构^[23,32],促进了土壤团聚体的形成与结构稳定,从而提高土壤抗侵蚀能力,土壤可蚀性降低。

4 结 论

本试验研究了黄土高原沟壑区不同植被恢复年限(3—30 年)沟头土壤团聚体及土壤可蚀性的变化特征,主要结论如下:沟头土壤团聚体稳定性随植被恢复年限增加逐渐增强,随土层深度增加而减弱。植被恢复条件下有机质含量的提升对团聚体形成和稳定性起着重要的作用。沟头土壤可蚀性因子随植被恢复年限增加而减小,随土层深度增加而增大。沟头土壤可蚀性的减小与水稳性团聚体含量的增加、团聚体稳定性的提高密切相关。自然恢复条件下植被恢复 22—30 年沟头土壤团聚体稳定性和抗蚀性能得到明显提升。

References

- [1] 陈绍宇,许建民,王文龙,赵安成,李怀友.黄土高原沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀特征及其防治途径.水土保持通报,2009,29(4):37-41.
CHEN S Y, XU J M, WANG W L, ZHAO A C, LI H Y. Erosion features of head-cut and its control measures on Dongzhiyuan of the Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 37-41. (in Chinese)
- [2] 陈绍宇,许建民,王文龙.高塬沟壑区董志塬沟头溯源侵蚀典型调查研究.中国农学通报,2009,25(9):258-263.
CHEN S Y, XU J M, WANG W L. The research on erosional types and process of head-cut on Dongzhiyuan of Loess Plateau. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(9): 258-263. (in Chinese)

- [3] 郭明明. 黄土高原沟壑区退耕草地沟头溯源侵蚀及形态演化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
GUO M M. Gully headward erosion and its morphology evolution characteristics of rehabilitated grass land in the gully region of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [4] 康宏亮. 黄土高原沟壑区土地利用方式对沟头溯源侵蚀过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
KANG H L. Effect of landuse on gully headward erosion process in the gully region of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [5] LAL R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. *Soil Science*, 2000, 165(3): 191-207.
- [6] ZHOU X, PENG X, PETH S, XIAO T Q. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 17-23.
- [7] 祁迎春, 王益权, 刘军, 于雄胜, 周彩景. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340-347.
QI Y C, WANG Y Q, LIU J, YU X S, ZHOU C J. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 340-347. (in Chinese)
- [8] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 文月荣, 徐娜, 吴得峰. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5067-5077.
TANG J, DANG T H, XUE J, WEN Y R, XU N, WU D F. Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5067-5077. (in Chinese)
- [9] 刘雷, 安韶山, 黄华伟. 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响. *生态学报*, 2013, 33(20): 6670-6680.
LIU L, AN S S, HUANG H W. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetation on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6670-6680. (in Chinese)
- [10] AN S S, MENTLER A, MAYER H, BLUM W E H. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2010, 81(3): 226-233.
- [11] AN S S, ZHENG F L, ZHANG F, VAN P S, HAMMER U, FRANZ M. Soil quality degradation processes along a deforestation chronosequence in the Ziwuling area, China. *Catena*, 2008, 75(3): 248-256.
- [12] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 宋籽霖, 张昌胜. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征. *中国农业科学*, 2011, 44(3): 507-515.
ZHANG C, LIU G B, XUE S, SONG Z L, ZHANG C S. Fractal features of rhizosphere soil microaggregate and particle-size distribution under different vegetation types in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(3): 507-515. (in Chinese)
- [13] 马祥华, 焦菊英, 温仲明, 白文娟, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 17-21.
MA X H, JIAO J Y, WEN Z M, BAI W J, JIAO F. The changes of soil physical properties in abandoned lands during vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1): 17-21. (in Chinese)
- [14] 严方晨, 焦菊英, 曹斌挺, 于卫洁, 魏艳红, 寇萌, 胡澍. 黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性——以坊塌流域为例. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 64-72.
YAN F C, JIAO J Y, CAO B T, YU W J, WEI Y H, KOU M, HU S. Soil anti-erodibility of abandoned lands during different succession stages of plant community in hilly-gullied region of the Loess Plateau: Take Fangta small watershed as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 64-72. (in Chinese)
- [15] 郭明明, 王文龙, 康宏亮, 杨波. 黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 138-146.
GUO M M, WANG W L, KANG H L, YANG B. Effect of natural vegetation restoration age on slope soil anti-scourability in gully region of Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(22): 138-146. (in Chinese)
- [16] 吴彦, 刘世全, 付秀琴, 王金锡. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(1): 45-49.
WU Y, LIU S Q, FU X Q, WANG J X. Study on improving soil's water stable aggregates amounts by botanic roots. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(1): 45-49. (in Chinese)
- [17] 陈文媛, 徐学选, 华瑞, 丁康, Shahmir Ali Kalhor, 杜峰. 黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响. *环境科学学报*, 2017, 37(4): 1486-1492.
CHEN W Y, XU X X, HUA R, DING K, SHAHMIR A K, DU F. Effects of forestlands and grasslands on soil aggregates under different vegetation restoration ages in loess hilly region. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4): 1486-1492. (in Chinese)

- [18] 曾全超, 董扬红, 李鑫, 李娅芸, 刘雷, 安韶山. 基于 Le Bissonnais 法对黄土高原森林植被带土壤团聚体及土壤可蚀性特征研究. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1093-1101.
ZENG Q C, DONG Y H, LI X, LI Y Y, LIU L, AN S S. Soil aggregate stability and erodibility under forest vegetation in the Loess Plateau using the Le Bissonnais method. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(9): 1093-1101. (in Chinese)
- [19] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 66-70, 82.
AN S S, ZHANG Y, ZHENG F L. Fractal dimension of the soil aggregate and its responds to plant rehabilitation in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(2): 66-70, 82. (in Chinese)
- [20] 郭曼, 郑粉莉, 安韶山, 刘雨, 王彬, Frederic Darboux. 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区土壤团聚体稳定性. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 68-73.
GUO M, ZHENG F L, AN S S, LIU Y, WANG B, FREDERIC D. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability in the hilly-gully region. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(2): 68-73. (in Chinese)
- [21] 夏露, 宋孝玉, 符娜, 李怀有, 李焱林. 陇东黄土塬区不同下垫面条件下侵蚀产沙的降雨阈值. 水科学进展, 2018, 29(6): 828-838.
XIA L, SONG X Y, FU N, LI H Y, LI Y L. Threshold standard of erosive rainfall under different underlying surface conditions in the Loess Plateau Gully Region of East Gansu, China. *Advances in Water Science*, 2018, 29(6): 828-838. (in Chinese)
- [22] 梁明易, 刘谓承, 曾嘉强, 汪涛. 陇东董志塬植被生态现状及评价. 生态科学, 2010, 29(4): 351-357.
LIANG M Y, LIU X C, ZENG J Q, WANG T. The investigation and evaluation of the natural vegetation in Dongzhi Plateau, eastern Gansu Province. *Ecological Science*, 2010, 29(4): 351-357. (in Chinese)
- [23] GUO M M, WANG W L, KANG H L, YANG B. Changes in soil properties and erodibility of gully heads induced by vegetation restoration on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land* 2018, 10(5): 712-725.
- [24] 李强, 刘国彬, 许明祥, 张正, 孙会. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质. 农业工程学报, 2013, 29(10): 153-159.
LI Q, LIU G B, XU M X, ZHANG Z, SUN H. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(10): 153-159. (in Chinese)
- [25] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 李保国. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
ZHOU H, LÜ Y Z, YANG Z C, LI B G. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1973-1979. (in Chinese)
- [26] VAN B C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 1949, 14: 20-23.
- [27] GARDNER W R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1956, 20: 151-153.
- [28] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 袁国军. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量. 农业工程学报, 2018, 34(3): 159-165.
YUAN J J, TONG Y A, LU S H, YUAN G J. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(3): 159-165. (in Chinese)
- [29] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.
YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Fractal features of soils characterized by grain weight distribution. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896-1899. (in Chinese)
- [30] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.
- [31] WANG B, ZHANG G H, SHI Y Y, ZHANG X C, REN Z P, ZHU L J. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14): 1725-1734.
- [32] 徐红伟, 吴阳, 乔磊磊, 李袁泽, 薛蕙, 瞿晴. 不同植被带生态恢复过程土壤团聚体及其稳定性—以黄土高原为例. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2223-2232.
XU H W, WU Y, QIAO L L, LI Y Z, XUE S, QU Q. Soil aggregates and stability in the ecological restoration process under different vegetation zones on loess plateau. *China Environmental Science*, 2018, 38(6): 2223-2232. (in Chinese)
- [33] IMESON A C, VERSTRAETEN J M. The microaggregation and erodibility of some semi-arid and Mediterranean soils. *Catena Supplement*, 1989, 14: 11-24.
- [34] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. 土壤学报, 1999, 36(2): 162-167.
WU C Z, HONG W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 162-167. (in Chinese)
- [35] 陈浩, 方海燕, 蔡强国, 周金星, 黄鑫. 黄河中游的侵蚀环境与植被恢复前景. 地理研究, 2007, 26(4): 735-744.

- CHEN H, FANG H Y, CAI Q G, ZHOU J X, HUANG X. The impact of environmental variables on sediment yield and vegetation recovering prospect in the middle Yellow River. *Geographical Research*, 2007, 26(4): 735-744. (in Chinese)
- [36] 杜华栋. 黄土丘陵沟壑区优势植物对不同侵蚀环境的适应研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- DU H D. Study on adaptations of dominant plants to different soil erosion environments in hilly-gully region of the Loess Plateau[D]. Yangling: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education), 2013. (in Chinese)
- [37] 丁康. 长武塬边坡不同植被对土壤物理性质的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- DING K. Influence of different vegetation types on soil physical properties in Changwu tableland slope[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018. (in Chinese)
- [38] 魏慧, 赵文武, 王晶. 土壤可蚀性研究述评. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2749-2759.
- WEI H, ZHAO W W, WANG J. Research progress on soil erodibility. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2749-2759. (in Chinese)
- [39] 董莉丽, 陈益娥, 李晓华. 吴起县退耕还林对土壤团聚体水稳性和养分含量的影响. *林业科学*, 2014, 50(5): 140-146.
- DONG L L, CHEN Y E, LI X H. Effects of the Returning Farmland to Forests on Content of Water Stable Soil Aggregates and the Nutrients in Wuqi County. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(05): 140-146. (in Chinese)
- [40] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 韩清芳, 丁瑞霞, 杨保平, 崔荣美. 旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 159-165 .
- WANG X J, JIA Z K, LIANG L Y, HAN Q F, DING R X, YANG B P, CUI R M. Effects of organic manure application on dry land soil organic matter and water stable aggregates. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 159-165. (in Chinese)
- [41] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征. *林业科学*, 2011, 47(4): 95-100.
- DONG L L. Characteristics of soil water stable aggregates under different land-use types. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(4): 95-100. (in Chinese)
- [42] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, COMBRINK C. Soil structure and organic matter: I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681-689.
- [43] 苏永中, 王芳, 张智慧, 杜明武. 河西走廊中段边缘绿洲农田土壤性状与团聚体特征. *中国农业科学*, 2007, 40(4): 741-748.
- SU Y Z, WANG F, ZHANG Z H, DU M W. Soil properties and soil aggregate characteristics in marginal farmlands of oasis in Middle Hexi Corridor Region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(4): 741-748. (in Chinese)
- [44] 马建辉, 叶旭红, 韩冰, 李文, 虞娜, 范庆锋, 张玉玲, 邹洪涛, 张玉龙. 膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体分布特征的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3561-3571.
- MA J H, YE X H, HAN B, LI W, YU N, FAN Q F, ZHANG Y L, ZOU H T, ZHANG Y L. Effects of different controlled irrigation low limits on the size distribution of soil aggregates with drip irrigation under film mulching in a greenhouse soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(18): 3561-3571. (in Chinese)
- [45] SIX J, BOSSUYT H, DEGRYZE S, DENEK K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79 (1): 7-31.

(责任编辑 李云霞)