

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

徐红伟^{1,2}, 吴阳³, 乔磊磊⁴, 李袁泽⁵, 薛蕙^{1,4*}, 瞿晴⁵ (1.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; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学资环学院, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为分析黄土高原不同植被带植被恢复对土壤团聚体分布特征及其稳定性的影响, 以黄土高原从北到南不同纬度梯度分布的3个典型植被类型区域(草原带、森林草原带和森林带)为研究对象, 对不同植被类型和恢复年限下的土壤团聚体分布及其稳定性进行了研究。结果表明: 不同植被带对土壤团聚体分布及其稳定性影响显著, 大于0.25mm团聚体含量(WR_{0.25})、水稳性团聚体平均重量直径(E_{WMD})、水稳性团聚体几何平均直径(E_{GMD})和有机质含量(SOM)整体上都表现为: 森林带>森林草原带>草原带。不同植被带下不同恢复类型对土壤团聚体及其稳定性影响不一, 森林草原带表现为灌木>草地>乔木, 森林带则表现为乔木>草地。随植被恢复年限增大, 各种恢复类型 WR_{0.25}、 E_{GMD} 、SOM整体呈逐渐增加趋势, 团聚体结构破坏率(PAD)和可蚀性因子(K)呈现相反的变化趋势; 分形维数(D)无显著差异。冗余分析表明, 植被带对土壤团聚体及其稳定性的影响最大, 其次是恢复年限, 恢复类型与植被带和恢复年限具有较强的交互作用。本研究有利于加强对区域生态恢复过程机理的认识。

关键词: 黄土高原; 植被带; 生态恢复; 土壤团聚体稳定性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)06-2223-10

DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0235

Soil aggregates and stability in the ecological restoration process under different vegetation zones on loess plateau.

XU Hong-wei^{1,2}, WU Yang³, QIAO Lei-lei⁴, LI Yuan-ze⁵, XUE Sha^{1,4*}, QU qing⁵ (1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Institute of College of Natural Resources and Environment, North-west A & F University, Yangling 712100, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 5.Institute of College of Forestry college, North-west A & F University, Yangling 712100, China). *China Environmental Science*, 2018,38(6): 2223~2232

Abstract: With the aim to analyze the effects of vegetation restoration on soil aggregates on the Loess Plateau, various categories of the distribution and stability of soil aggregates in different restoration ages of vegetation zones were studied. With three typical restoration zones including the steppe zone, the forest-steppe zone and the forest zone at different latitude on the Loess Plateau as the object of this research. The results showed that the distribution and stability of soil aggregates were significantly influenced by vegetation zones. For the five indexes including >0.25mm soil water-stable aggregates (WR_{0.25}), mean weight diameter (E_{WMD}), geometric mean diameter (E_{GMD}) and soil organic matter (SOM), these indexes in the forest zone were the highest, followed by the forest-steppe zone, and these in the steppe zone were the lowest. Different vegetation restoration condition and vegetation zone had different impacts on soil aggregates and their stability, with the trend of shrubs> grasslands> trees in the forest-steppe zone and trees > grasslands in the forest zone. pectively, indexes including WR_{0.25}, E_{GMD} and SOM in different restoration conditions increased with restoration ages, but other indexes including percentage of aggregate destruction (PAD) and soil erodibility (K) decreased. No significant

收稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAC01B03); 科技基础性工作专项(2014FY210100); 中科院西部青年学者项目(XAB2015A05)

* 责任作者, 副研究员, xuesha100@163.com

difference has been found in the fractal dimension (D). The redundancy analysis showed that the distribution and stability of soil aggregates were mostly effected by the vegetation zones, and the restoration ages as following. The type of the restoration had a significant interaction with the vegetation zones and the restoration ages. This research is conducive to better understand the mechanism of regional ecological restoration process.

Key words: Loess Plateau; vegetation zones; ecological restoration; the stability of soil aggregates

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,也是有机质的载体,与土壤的结构和理化性质关系密切^[1],其数量和大小分布直接影响着土壤质量^[2],良好的土壤结构和稳定的团聚体对于提高土壤孔隙度、稳定性及改善土壤肥力具有重要作用^[3].植被覆盖可以减少溅蚀,有利于抵抗土壤侵蚀,进而增加土壤团聚体的稳定性^[4].植被生长良好的关键取决于土壤团聚体的稳定性^[5].一般把粒径大于 0.25mm 团聚体称为大团聚体^[6],相对其他粒径的团聚体,其更能充分地体现土壤团聚体的稳定性,其含量的多少在一定程度上反映了土壤结构好坏、持水性、通透性的高低,其基本性质是决定土壤稳定性、抗侵蚀能力和土壤肥力的关键因素^[7],其含量越高土壤质量越好^[8].土壤有机质对土壤结构稳定性和土壤资源的可持续利用起着重要的作用^[9].植被恢复是生态环境建设的有效措施,研究团聚体的稳定性是了解植被恢复效果与土壤质量好坏的有效途径.

土壤团聚体稳定性除了与母质、有机质、气候、微生物活动等内在理化性质有关外^[10],还受植被带、植被类型、恢复年限等外部因素的间接影响.相关研究表明,林地土壤团聚体稳定性显著高于荒地或农地^[11-14],也有研究认为天然草地土壤团聚体稳定性高于灌木林地^[15];同时,研究认为随植被恢复年限的增加土壤团聚体稳定性逐渐增加^[16-18].从以上分析看出目前多数研究主要集中于土地利用方式和恢复年限对团聚体稳定性的影响,而在区域尺度上的研究相对较少.已有的对黄土高原森林带和森林草原带的研究区域尺度相对较小,在反映区域对土壤团聚体及其稳定性的影响上存在一定不足.因此,本研究选择不同纬度的不同植被恢复类型和恢复年限的土壤为研究对象,分析了土壤团聚体及其稳定性的分

异特征,并在此基础上定量分析植被带、恢复类型和恢复年限对上述因子的影响程度.研究旨在从区域尺度揭示黄土高原地区植被恢复对土壤团聚体稳定性能的影响机制,为黄土高原区域生态恢复可持续健康发展和土壤质量管理与评价提供数据支持和理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究按照黄土高原纬度梯度从北至南选择草原带(神木)、森林草原带(绥德和安塞)和森林带(宜川和淳化)3个植被带的5个地区为研究区域(图1),在每个植被带根据野外调查情况选取不同恢复类型和年限的样地,其中草原带主要为不同年限的恢复草地,森林草原带为不同恢复年限的撂荒草地、柠条和刺槐,森林带为不同恢复年限的刺槐和撂荒草地.各研究区基本概况见表1.

1.2 土壤样品的采集与分析

结合各研究区植被类型、地形特征和恢复年限等因素,在3个研究区选取不同植被恢复类型下的样点共计43个(草原带8个、森林草原带24个、森林带11个),所选样点尽量保证具有典型性、代表性和一致性(植物群落特征、土壤类型、地形、坡度、坡位、坡向等环境条件应尽量保证一致或相似),样点基本情况见表2.每个样点设置3个10m×10m的样地,各样地距离间隔10m以上,在每个样地用土钻按随机点取样法采集0~20cm土层土壤样品10钻,充分混匀,用于测定土壤理化性质.每个样地用铝盒多点采集0~20cm深度原状土样,在野外将3个样地的原状土按照各三分之一混合为一个原状土密封带回实验室,然后沿土壤自然结构面轻轻掰开直径约1cm的小团块,自然风干后去除枯枝落叶和石块,用于测定土壤团聚体等指标.

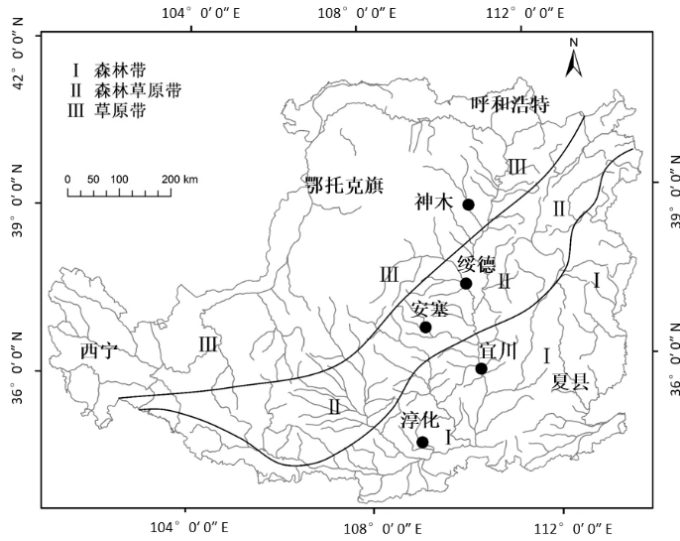


图 1 样点地理位置示意

Fig.1 Geographic location map of sample points

参考杜盛、刘国彬等《黄土高原植被恢复的生态功能》^[19]

表 1 研究区基本概况

Table 1 Basic introduction of the experimental areas

| 研究区域 | 植被带 | 纬度 | 海拔(m) | 多年平均降水(mm) | 多年平均气温(°C) |
|------|-------|---------------|--------------|------------|------------|
| 神木 | 草原带 | 38°13'~39°27' | 738.7~1448.7 | 437.9 | 8.4 |
| 绥德 | 森林草原带 | 37°16'~37°45' | 608~1287 | 475.4 | 8.7 |
| 安塞 | 森林草原带 | 36°30'~37°19' | 1010~1431 | 491 | 8.8 |
| 宜川 | 森林带 | 35°42'~36°23' | 388.8~1710.5 | 574 | 9.7 |
| 淳化 | 森林带 | 34°43'~35°03' | 630~1809 | 600.6 | 9.8 |

表 2 样点基本情况表

Table 2 Basic information of sample plots

| 植被带 | 研究区域 | 植被恢复类型 | 恢复年限(a) | 样点数 | 建群种 | 盖度(%) | 土壤类型 |
|-------|------|--------|---------|-----|--------------------------------------------------------|---------|------|
| 草原带 | 神木 | 草地 | 0~10 | 4 | 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) | 40~52 | 风沙土 |
| | | | 10~20 | 2 | 长芒草-兴安胡枝子 (<i>Stipa bungeana-Lespedeza davurica</i>) | 62~72 | 风沙土 |
| | | | >20 | 2 | 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) | 72~80 | 风沙土 |
| 森林草原带 | 绥德 | 草地 | 0~10 | 2 | 铁杆蒿 (<i>Artemisia argyi</i>) | 40~46 | 黄绵土 |
| | | | 10~20 | 2 | 铁杆蒿+长芒草 (<i>Artemisia argyi-Stipa bungeana</i>) | 45~65 | 黄绵土 |
| | | | >20 | 2 | 白羊草 (<i>Bothriochloa ischaemum</i>) | 46~73 | 黄绵土 |
| | 安塞 | 灌木 | 0~10 | 2 | 柠条 (<i>Caragana korshinskii</i>) | 45.5~51 | 黄绵土 |
| | | | 10~20 | 2 | 柠条 (<i>Caragana korshinskii</i>) | 45~65 | 黄绵土 |
| | | | >20 | 2 | 柠条 (<i>Caragana korshinskii</i>) | 50~68 | 黄绵土 |
| 森林带 | 宜川 | 草地 | 0~10 | 1 | 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) | 70~82 | 黄绵土 |
| | | | 10~20 | 1 | 长芒草-铁杆蒿 (<i>Stipa bungeana-Artemisia argyi</i>) | 80~82 | 黄绵土 |
| | | | >20 | 1 | 白羊草 (<i>Bothriochloa ischaemum</i>) | 82~90 | 黄绵土 |
| 森林带 | 淳化 | 乔木 | 0~10 | 3 | 刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>) | 78~82 | 黄绵土 |
| | | | 10~20 | 2 | 刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>) | 75~93 | 黄绵土 |
| | | | >20 | 3 | 刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i>) | 72~95 | 黄绵土 |

机械稳定性团聚体测定用干筛法^[20],水稳性团聚体的测定采用湿筛法^[20],有机质测定采用重铬酸钾氧化外加热法^[21].

1.3 数据处理

为了全面准确的反映土壤团聚体分布及其稳定性特征,选取大于 0.25mm 团聚体含量(WR_{0.25})、水稳性团聚体平均重量直径(E_{MWD})、水稳性团聚体几何平均直径(E_{GMD})、分形系数(D)、团聚体结构破坏率(PAD)、有机质含量(SOM)和土壤可蚀性因子(K)作为分析指标.文中团聚体为样点原状土混合样品测定的平均值,而化学性质指标为 3 个样地样品的平均值.

具体计算公式如下:

大于 0.25mm 团聚体含量 WR_{0.25}(%)^[22]:

$$WR_{0.25} = \frac{M_{i>0.25}}{M_T}$$

式中: $M_{i>0.25}$ 为直径大于 0.25mm 团聚体湿筛质量,g; M_T 为团聚体总质量,g.

水稳性团聚体的平均重量直径 E_{MWD}(mm)^[22]和水稳性团聚体的几何平均直径 E_{GMD}(mm)^[23]:

$$E_{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$E_{GMD} = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right]$$

式中: \bar{X}_i 为第 i 级的团聚体平均直径,mm; W_i 为第 i 级的团聚体组分的干重,g.

分形维数 D^[24]:

$$\left(\frac{\bar{X}_i}{X_{\max}} \right)^{3-D} = \frac{m_i}{M}$$

式中: X_{\max} 为最大团聚体的粒径,mm; m_i 为粒径小

于 X_i 的团聚体总质量,kg; M 为各粒级团聚体质量之和,kg.

团聚体结构破坏率 PAD(%)^[25]:

$$PAD = \frac{D_{r0.25} - M_{r0.25}}{D} \times 100$$

土壤可蚀性因子 K^[26]:

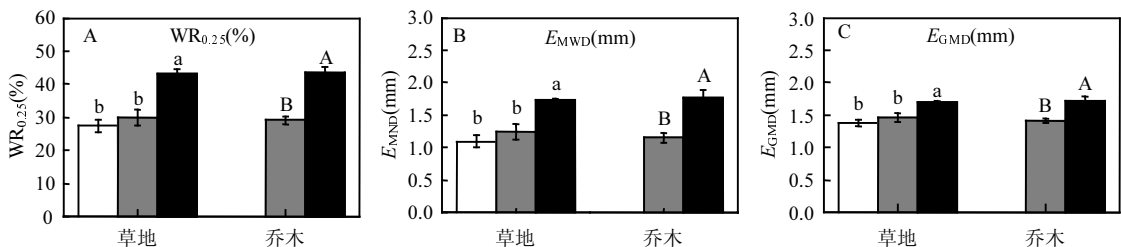
$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \times \text{Exp} \left[-0.5 \times \left(\frac{\log E_{GMD} + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\}$$

采用 Excel2013 和 SPSS21.0 对数据进行初步整理和统计分析,Duncan 法进行差异显著性检验,显著性水平 0.05;采用 Origin 9.0 进行数据绘图;冗余分析(RDA)应用 CANOCO5.0 进行.

2 结果与分析

2.1 植被带对团聚体分布及稳定性的影响

不同植被带对土壤团聚体分布及稳定性的影响有较显著差异($P < 0.05$) (图 2).在草地恢复类型中,WR_{0.25}、E_{MWD}、E_{GMD} 和 SOM(图 2A、B、C、G)在 3 个植被带均呈现出相同的变化趋势,即森林带>森林草原带>草原带,草原带和森林草原带与森林带均达到显著差异水平,而草原带和森林草原带差异不显著;PAD(图 2F)呈现出相反的变化趋势,且森林带与森林草原带和草原带差异显著; D (图 2D)和 K (图 2E)在 3 个植被带差异不显著.在乔木恢复类型中,除 D (图 2D)、 K (图 2E)和 PAD(图 2F)外均表现为森林带>森林草原带,且差异显著; D (图 2D)和 K (图 2E)在 3 个植被带差异不显著;PAD(图 2F)均表现为森林草原带>森林带,差异显著.



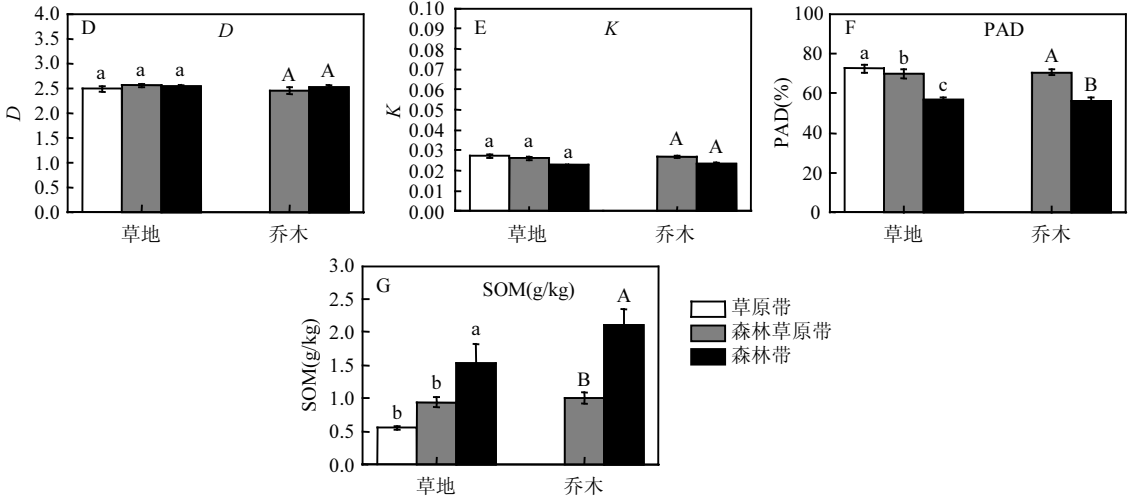


图 2 不同植被带土壤团聚体含量及稳定性指标变化

Fig.2 Changes of soil aggregate content and stability index in different vegetation zones

图中不同小写字母表示草地植被恢复类型下不同植被带在 5%水平上的差异性;不同大写字母表示乔木植被恢复类型下不同植被带在 5%水平上的差异性

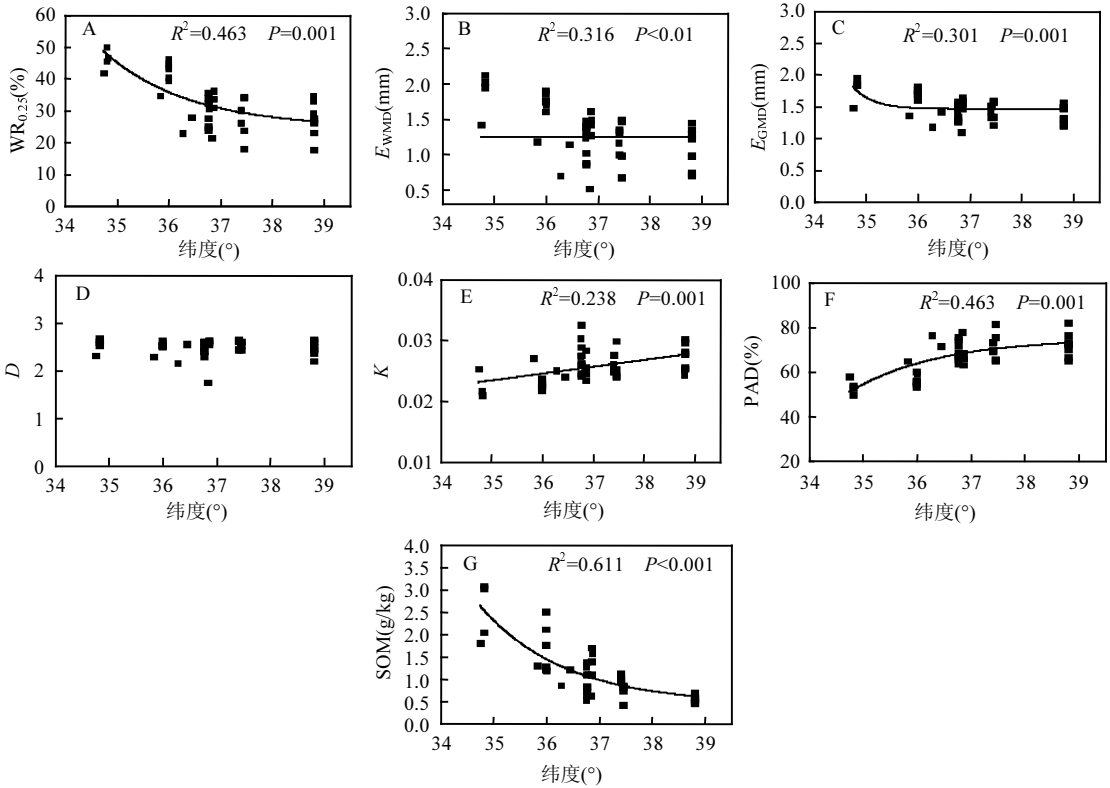


图 3 不同纬度区域土壤团聚体及稳定性指标变化特征

Fig.3 The stability of soil water-stable aggregates of different latitude in vegetation zones

通过对团聚体及稳定性指标和纬度进行拟合分析,表明除 D 以外其余各指标均与纬度有较

强的相关性(图 3),其中 $WR_{0.25}$ (图 3A)、 E_{MWD} (图 3B)、 E_{GMD} (图 3C)和 SOM(图 3G)随纬度变化均呈现为随纬度增大逐渐降低的变化趋势; D (图 3D)随纬度增大无显著变化; PAD (图 3F)和 K (图 3E)随纬度增大逐渐增加。

2.2 植被恢复类型对团聚体分布及稳定性的影响

不同植被类型对土壤团聚体分布及稳定性影响较小(表 3),除在森林草原带 SOM 表现为灌木>乔木>草地(其中灌木与草地差异达到显著水平),在森林带 SOM 表现为乔木显著大于草地外,各指标在不同植被带均未达到显著水平。

2.3 植被恢复年限对团聚体分布及稳定性的影响

植被恢复年限对土壤团聚体分布及稳定性有显著影响($P<0.05$),但在不同区域和恢复类型中表现规律不一(图 4)。在草原带, $WR_{0.25}$ 、 E_{MWD} 、

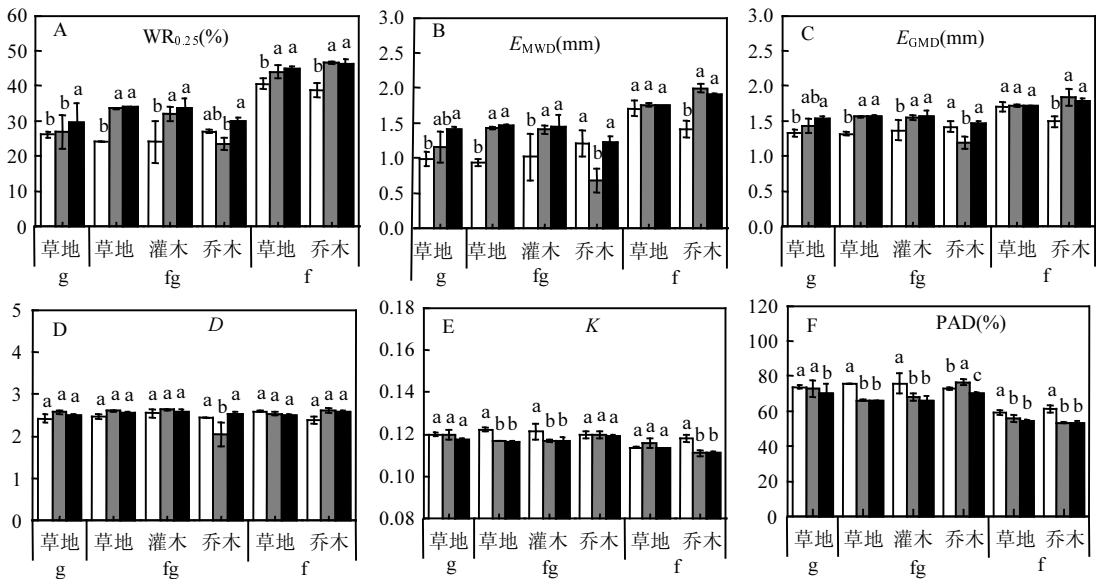
E_{GMD} 和 SOM 均呈现出随植被恢复年限增加逐渐增大的变化趋势,除 SOM 外各指标在 0~10a 和>20a 恢复年限均达到显著差异水平; PAD 呈现相反的变化趋势; D 和 K 无显著差异。在森林草原带,草地和灌木各指标呈现相同的变化特点,即除 D 、 K 、 PAD 外其余各指标均表现为随植被恢复年限增加逐渐增大, K 、 PAD 随植被恢复年限增加逐渐降低,且在 0~10a 和>20a 恢复年限差异显著; $WR_{0.25}$ 、 E_{MWD} 、 E_{GMD} 、 D 随乔木恢复年限增加先降低后增加, PAD 先增加后降低,且在 10~20a 和>20a 恢复年限达到显著差异水平。在森林带,除 $WR_{0.25}$ 、 PAD 、SOM 外各指标随草地恢复年限增加均无显著差异, $WR_{0.25}$ 、 E_{MWD} 、 E_{GMD} 和 SOM 随乔木恢复年限增加逐渐增大, K 和 PAD 逐渐降低,且在 0~10a 和>20a 恢复年限差异显著。

表 3 不同植被恢复类型土壤团聚体及稳定性指标变化

Table 3 Changes of soil aggregates and stability indexes in different vegetation restoration types

| 植被带 | 植被类型 | $WR_{0.25}(\%)$ | $E_{MWD}(mm)$ | $E_{GMD}(mm)$ | D | K | $PAD(\%)$ | SOM(g/kg) |
|-------|------|-----------------|---------------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 森林草原带 | 草地 | 29.91±2.36a | 1.24±0.12a | 1.46±0.06a | 2.55±0.04a | 0.03±0.00a | 69.96±2.35a | 0.94±0.08b |
| | 灌木 | 30.01±3.15a | 1.28±0.16a | 1.49±0.07a | 2.58±0.04a | 0.03±0.00a | 69.84±3.17a | 1.07±0.22a |
| | 乔木 | 29.24±1.17a | 1.15±0.08a | 1.42±0.04b | 2.45±0.07a | 0.03±0.00a | 70.61±1.17a | 1.00±0.08ab |
| 森林带 | 草地 | 43.20±1.35A | 1.74±0.02A | 1.71±0.01A | 2.52±0.02A | 0.02±0.00A | 56.61±1.41A | 1.54±0.29B |
| | 乔木 | 43.62±1.69A | 1.77±0.12A | 1.72±0.07A | 2.54±0.05A | 0.02±0.00A | 56.31±1.69A | 2.10±0.25A |

注:图中小写字母表示森林草原带不同植被恢复类型在5%水平上的差异性;大写字母表示森林带不同植被恢复类型在5%水平上的差异性。



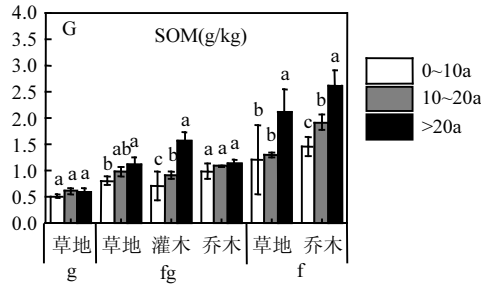


图 4 不同恢复年限土壤团聚体及稳定性指标变化特征

Fig.4 Characteristics of soil aggregates and stability indexes of soil aggregates in different restoration ages

g.草原带;fg,森林草原带;f,森林带

2.4 团聚体分布及其稳定性影响因子分析

通过对植被带、植被恢复类型和恢复年限 3 个因素与 $WR_{0.25}$ 、 E_{MWD} 、 E_{GMD} 、 D 、 K 、 PAD 、 SOM 进行 RDA 分析,以分析各因素对各稳定性指标影响的程度.结果表明植被带、植被恢复类型和恢复年限均与 $WR_{0.25}$ 、 E_{MWD} 、 E_{GMD} 、 D 、 K 、 PAD 和 SOM 存在相关关系(图 5).在 3 个影响因子中植被带和恢复年限与 $WR_{0.25}$ 、 E_{MWD} 、 E_{GMD} 和 SOM 存在较强的正相关性,与 K 和 PAD 存在较强的负相关性,且植被带箭头长,表明植被带对它们影响程度大于恢复年限.植被恢复类型与 $WR_{0.25}$ 、 E_{MWD} 、 E_{GMD} 、 D 和 SOM 相关性较弱,且与植被带和恢复年限呈锐角,其对土壤团聚体分布与稳定性的作用受两者的综合影响.

3 讨论

土壤团聚体结构对土壤质量产生重要的影响,其数量的多少决定了土壤蓄水保墒、储存养分及稳定性等能力的高低^[27].大于 0.25mm 团聚体含量^[28]、水稳性团聚体平均重量直径^[22]、水稳性团聚体几何直径^[23]、分形维数^[16]、土壤可蚀性因子^[29]、团聚体结构破坏率^[15]、土壤有机质含量^[30]常作为反映土壤团聚体稳定性的重要指标.本研究中,RDA 结果显示植被带是影响团聚体分布及其稳定性的重要因素,其中土壤团聚体稳定性总体呈现森林带>森林草原带>草原带.这与前人关于黄土丘陵区土壤团聚体研究结果类似^[18].首先,微生物对团聚体形成和团聚体的稳定性具有重要作用^[31].由于水热条件可以直接影响微生物活性^[32],随纬度增大,黄土高原地区降雨量和温度逐渐降低^[33],降低了微生物活性,减弱了土壤腐化作用和产糖能力^[31],从而使团聚体凝聚力减小,团聚体稳定性降低.其次,随着纬度增加,植物生物量降低,归还到土壤中的有机物来源减少^[34],导致对团聚体的黏结作用降低^[35];随着水分和温度的降低,有机物分解减弱^[32],根系分泌物降低,减弱了土壤团聚体的形成.此外,土壤有机质含量是影响团聚体稳定性的内在因素^[10],本研究结果表明纬度越大,有机质含量越低,进而降低土壤的团聚性.

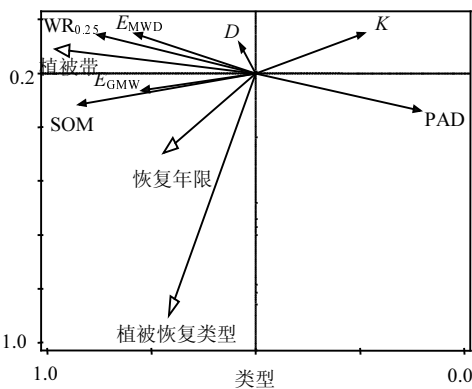


图 5 植被带、植被类型和年限与土壤稳定性因子的 RDA 排序

Fig.5 RDA sort graph of vegetation zones, vegetation types and ages, and soil stability factors

本研究中植被恢复类型对土壤团聚体稳定性影响较小,这与已有研究认为植被恢复类型是土壤团聚体稳定性重要影响因素的结论不一

致^[11-12,14],导致结果不一致的原因主要是前人研究多关注同一恢复年限下不同植被类型团聚体稳定性研究;同时,相同的植被恢复类型下土壤团聚体稳定性受植被带的影响较大^[18],而本研究中涉及相同植被带不同植被恢复类型下不同恢复年限,随着恢复年限增加,各指标整体呈现显著变化趋势,这样导致本研究中植被类型对土壤团聚体分布及其稳定性的影响不显著.因此为了减弱年限在植被类型中的影响,本研究按照恢复年限对不同阶段下的各恢复类型的土壤团聚体稳定性分别进行分析(图 6),结果表

明,在恢复年限<10a 时和>10a 时均表现出恢复类型对各指标具有显著的影响,也印证了植被恢复类型是影响土壤团聚体稳定性的一个重要的因子.进一步分析发现在相同恢复年限,森林草原带与森林带的草地恢复和乔木恢复类型呈现相反的变化趋势,而同一植被带不同恢复年限下的各恢复类型也整体呈现相反的变化趋势.表明植被带、恢复类型和恢复年限都是影响土壤团聚体分布与稳定性的重要因子,而三个因子在不同情景下的作用机制与影响程度不同,存在一定的交互作用.

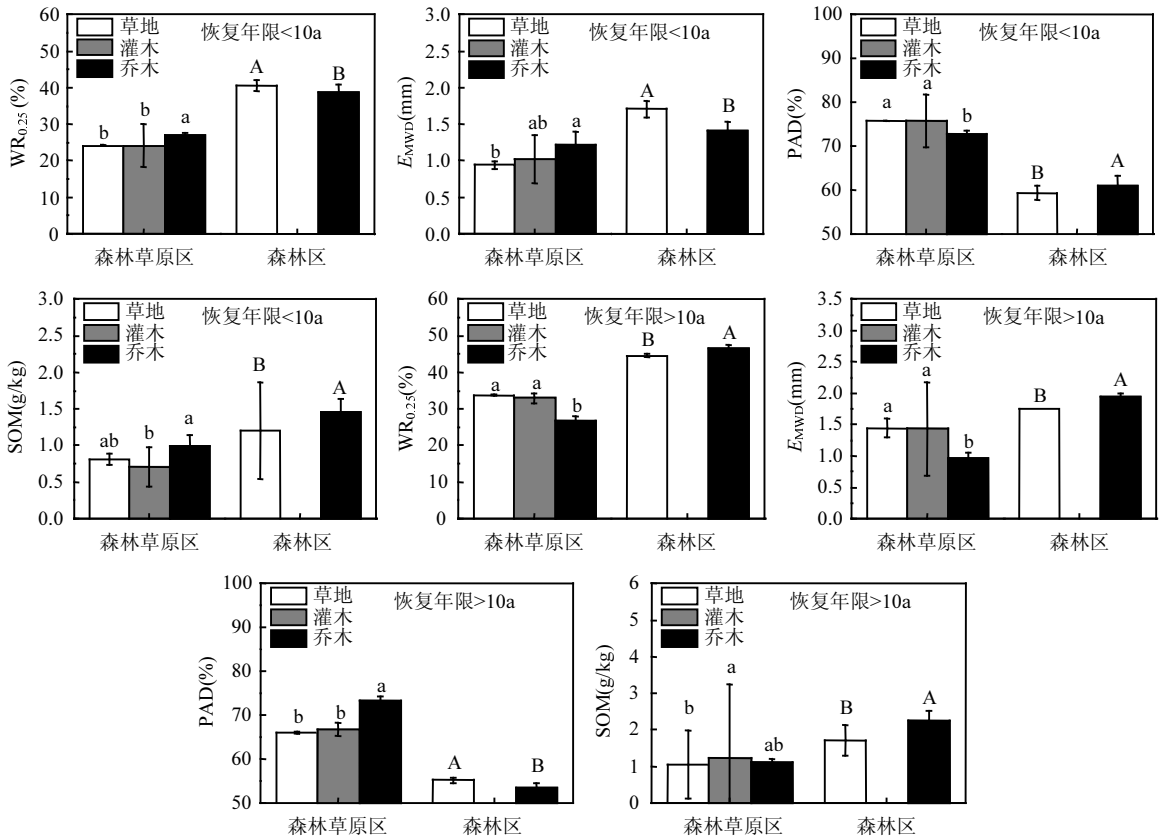


图 6 不同恢复年限对团聚体及稳定性指标的影响

Fig.6 Effects of different ages on agglomerates and stability indexes

从前面的分析结果表明植被恢复年限对土壤团聚体稳定性有显著影响,其稳定性随植被恢复年限增加逐渐增强,这与 Wang 等^[36]和陈文媛等^[37]研究结果一致.大量研究已经证实随着植被恢复,植物生物量逐渐增加,归还到土壤中的枯落

物也显著增加,促进了土壤有机质的增加^[38-39].同时,随着植被恢复,土壤微生物量和多样性显著增加,促进了枯落物和有机质的分解,增加了对土壤颗粒的粘结作用^[40].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^[41],促进了土

壤团聚体的形成与结构稳定。

4 结论

4.1 不同植被带对土壤团聚体分布与稳定性影响显著,整体表现为森林带>森林草原带>草原带。

4.2 随着植被恢复年限增加,各恢复类型土壤团聚体分布与稳定性整体呈现增加趋势。

4.3 不同植被带下,不同植被类型对土壤团聚体分布与稳定性的影响存在差异,森林草原带表现为灌木>草地>乔木,森林带则为乔木>草地。

4.4 植被类型对土壤团聚体稳定性的影响作用要低于植被带和恢复年限,但是与两个因素具有较强的交互作用。

参考文献:

- [1] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review [J]. *Geoderma*, 2005,124(1/2):3-22.
- [2] Lal Rattan. Restoring soil quality to mitigate soil degradation [J]. *Sustainability*, 2015,7(5):5875-5895.
- [3] Moebiusclune B N, van Es H M, Idowu O J, et al. Long-term soil quality degradation along a cultivation chronosequence in western Kenya [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1/2):86-99.
- [4] 赵珩航,曹斌挺,焦菊英.黄土丘陵沟壑区退耕坡地不同植物群落的土壤侵蚀特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2017,15(3):105-113.
- [5] Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, et al. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient [J]. *Plant & Soil*, 2013,373(1/2):285-299.
- [6] 赵红,袁培民,吕貽忠,等.施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响 [J]. *土壤*, 2011,43(2):306-311.
- [7] Lal R. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century [J]. *Soil Science*, 2000,165(3):191-207.
- [8] Nichols K A, Toro M. A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 111(2):99-104.
- [9] Haydu-Houdeshell C A, Graham R C, Hendrix P F, et al. Soil aggregate stability under chaparral species in southern California [J]. *Geoderma*, 2018,310:201-208.
- [10] Barthès Bernard, Roose Eric. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels [J]. *Catena*, 2002,47(2):133-149.
- [11] Wang H, Guan D, Zhang R, et al. Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field [J]. *Ecological Engineering*, 2014,70:206-211.
- [12] 胡阳,邓艳,蒋忠诚,等.典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响 [J]. *水土保持通报*, 2015,35(1):61-67.
- [13] 景航,史君怡,王国梁,等.皆伐油松林不同恢复措施下团聚体与球囊霉素分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(8):3056-3063.
- [14] 张嘉宁.黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [15] 刘梦云,常庆瑞,安韶山,等.土地利用方式对土壤团聚体及微团聚体的影响 [J]. *中国农学通报*, 2005,21(11):247-250.
- [16] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响 [J]. *环境科学学报*, 2017,37(4):1486-1492.
- [17] 徐磊,周俊,张文辉,等.植被恢复对重金属污染土壤有机质及团聚体特征的影响 [J]. *水土保持研究*, 2017,21(6):194-199.
- [18] 闫靖华,张风华,谭斌,等.不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响 [J]. *土壤学报*, 2013,50(6):1183-1190.
- [19] 王凯,张亮,刘锋,等.阜新露天煤矿排土场边坡土壤质量分异特征 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(7):2119-2128.
- [20] 王希通,李梦醒,刘淑英.土壤农化分析方法 [M]. 石家庄:河北人民出版社, 1980:91-92.
- [21] Bavel C H M V. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950,14(C):20-23.
- [22] Katz A J, Thompson A H. Fractal Sandstone Pores: Implications for Conductivity and Pore Formation [J]. *Physical Review Letters*, 1985,54(12):1325-1328.
- [23] 王丽,李军,李娟,等.轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014,25(3): 759-768.
- [24] 张强,周正朝,姚小萌.植被恢复过程中土壤团聚体分形特征研究 [J]. *河南科学*, 2017,35(1):94-100.
- [25] 杨玉盛,何宗明,林光耀,等.不同治理模式对严重退化红壤抗蚀性影响的研究 [J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996,2(2):32-37.
- [26] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984,48(1): 142-147.
- [27] 邱莉萍,张兴昌,张晋爱.黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布 [J]. *生态学报*, 2006,26(2):364-372.
- [28] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响 [J]. *环境科学学报*, 2017,34(4):1486-1492.
- [29] 李娅芸,刘雷,安韶山,等.应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵

- 区不同植被区及坡向对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响 [J]. 自然资源学报, 2016,31(2):287-298.
- [30] 董莉丽,李晓华,杨 波.无定河流域植被恢复对土壤团聚体及碳固定的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2017,35(1):277-282.
- [31] Bearden B N, Petersen L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol [J]. *Plant & Soil*, 2000,218(1/2):173-183.
- [32] 曹 瑞,吴福忠,杨万勤,等.海拔对高山峡谷区土壤微生物生物量和酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2016,27(4):1257-1264.
- [33] 王麒翔,范晓辉,王孟本.近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征 [J]. 生态学报, 2011,39(19):5512-5523.
- [34] Komiyama A, Ong J E, Pongparn S. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review [J]. *Aquatic Botany*, 2008,89(2):128-137.
- [35] 师阳阳.黄土丘陵区不同退耕年限及模式下植被生长特征研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
- [36] Wang B, Zhang G, Shi Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013,38(14):1725-1734.
- [37] Busse M D, Sanchez F G, Ratcliff A W, et al. Soil carbon sequestration and changes in fungal and bacterial biomass following incorporation of forest residues [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009,41(2):220-227.
- [38] Fu X, Shao M, Wei X, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010,155(1/2):31-35.
- [39] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, et al. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10):2224-2232.

作者简介: 徐红伟(1992-),男,河南驻马店人,中国科学院水利部水土保持研究所硕士研究生,主要从事土壤微生物生态研究.