

引用格式: 郝嘉航, 郭小平, 欧阳群文, 等. 不同年限喷播绿化对高速边坡土壤抗剪强度和抗蚀性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(6): 1221–1231. HAO Jiahang, GUO Xiaoping, OUYANG Qunwen, *et al.* Effects of different years of spray seeding greening on soil shear strength and anti-erodibility of expressway slope[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(6): 1221–1231.

## 不同年限喷播绿化对高速边坡土壤抗剪强度和抗蚀性的影响

郝嘉航<sup>1</sup>, 郭小平<sup>1</sup>, 欧阳群文<sup>1</sup>, 郭宇<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京绿之源生态科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 【目的】探究北京地区高速边坡喷播绿化工程施工后植被和土壤动态特征对边坡土壤抗蚀和抗剪性能的影响, 为制定可持续的道路边坡植被修复方案提供参考。【方法】从 3 条不同恢复年限 (5、10、15 a) 的高速公路上分别选取基本参数相似的坡面作为研究对象, 包括采用厚层基材喷播的阴坡、阳坡以及未人工干扰的自然阴、阳坡面 (对照), 每种坡面各选 1 块作为样地, 通过冗余分析和构建回归方程的方法, 探究边坡恢复过程中植被与土壤抗蚀和抗剪性能的变化规律。【结果】①随着恢复年限的增加, 边坡植被多样性和覆盖度呈极显著增加 ( $P < 0.01$ ), 但恢复 15 a 时仍未恢复至自然边坡水平。②在恢复 15 a 时土壤有机碳含量、几何平均直径和平均质量直径相较 5 a 时分别增长了 96.10%、12.17% 和 26.23%, 这表明土壤团聚体的稳定性逐渐增强, 在 15 a 时恢复至自然边坡水平。③植被特征和土壤指标对于土壤抗蚀和抗剪指标的解释率为 83.42%。土壤可蚀性  $K$  值随几何平均直径的增加线性降低 ( $R^2=0.902$ ) 或团聚体破坏率的增加线性增加 ( $R^2=0.776$ )。土壤黏聚力随多样性指数 ( $R^2=0.660$ ) 和容重的增加而线性增加 ( $R^2=0.750$ ), 内摩擦角则随饱和含水率减小而减小 ( $R^2=0.816$ )。【结论】容重、饱和含水率和几何平均直径是土壤抗蚀和抗剪性能的直接控制因子, 可作为评价优选指标。为更有效地提高坡面浅层土的抗蚀和抗剪性能, 建议在喷播绿化施工方案中采用喷播与栽种相结合的方式种植刺槐 *Robinia pseudocacia*, 并且在恢复 10 a 时对边坡进行适当追肥。图 4 表 4 参 31

**关键词:** 植被恢复; 边坡喷播绿化; 团聚体; 土壤抗蚀性; 抗剪强度

中图分类号: S157.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)06-1221-11

## Effects of different years of spray seeding greening on soil shear strength and anti-erodibility of expressway slope

HAO Jiahang<sup>1</sup>, GUO Xiaoping<sup>1</sup>, OUYANG Qunwen<sup>1</sup>, GUO Yu<sup>2</sup>

(1. Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Green Source Ecological Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to explore the effects of vegetation and soil dynamic characteristics on soil shear strength and anti-erodibility of spray seeding matrix after the construction of high-speed slope spray seeding greening project in Beijing, and to provide reference for the formulation of sustainable road slope vegetation restoration scheme. [Method] A shady slope and a sunny slope sprayed with thick-layer base material, and a natural slope without artificial disturbance (ck) with similar basic parameters were selected from 3 expressways with different restoration years (5, 10, 15 a). The change law of anti-erodibility and shear strength of vegetation and soil during slope restoration was explored by redundancy analysis and regression equation. [Result] (1) The diversity and coverage of slope vegetation increased significantly with the increase

收稿日期: 2025-01-13; 修回日期: 2025-05-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0504406); 内蒙古自治区科技重大专项 (2020ZD0021); 林业行业标准修订项目 (2023-LY-057)

作者简介: 郝嘉航 (ORCID: 0009-0005-2682-3720), 从事工程绿化研究。E-mail: [hao\\_jiahang@163.com](mailto:hao_jiahang@163.com)。通信作者: 郭小平 (ORCID: 0000-0002-4216-1991), 教授, 博士生导师, 从事工程绿化和矿山修复研究。E-mail: [guoxp@bjfu.edu.cn](mailto:guoxp@bjfu.edu.cn)

of restoration years ( $P < 0.01$ ), but did not return to the level of natural slope at 15 a. (2) The soil organic carbon content, geometric mean diameter and mean weight diameter increased by 96.10%, 12.17% and 26.23% at 15 a compared with 5 a. The stability of soil aggregates gradually increased and returned to the level of natural slope at 15 a. (3) Vegetation characteristics and soil indexes explained 83.42% of the soil anti-erodibility and shear resistance indexes. The  $K$  value of soil anti-erodibility decreased linearly with the geometric mean diameter ( $R^2=0.902$ ) or increased linearly with the aggregate destruction rate ( $R^2=0.776$ ). The soil anti-erodibility increased linearly with the diversity index ( $R^2=0.660$ ) and bulk density ( $R^2=0.750$ ), and the internal friction angle decreased with the saturated water content ( $R^2=0.816$ ). [Conclusion] Bulk density, saturated water content and geometric mean diameter are the direct control factors of soil anti-erodibility and shear strength, which can be used as evaluation indexes. In order to better improve the anti-erodibility and shear strength of shallow soil on the slope, it is recommended to adopt the spray seeding and planting method to plant *Robinia pseudocacia* in the spray seeding greening construction scheme, and to carry out appropriate topdressing on the slope when it is restored for 10 years. [Ch, 4 fig. 4 tab. 31 ref.]

**Key words:** vegetation restoration; slope spray seeding greening; aggregate; soil anti-erodibility; shear strength

高速公路作为重要的基础设施和跨境运输网络,在山区修建过程中所形成的高、陡边坡不可避免地沿沿线生态系统造成一定程度的损毁<sup>[1]</sup>,容易发生滑坡、崩塌、沟蚀等水土流失问题<sup>[2]</sup>,严重威胁生态环境和道路行车安全。喷播绿化作为一种植被修复手段被广泛应用到边坡生态治理工程中<sup>[3]</sup>,是目前针对高陡挖填边坡最普遍、最有效的生态修复方法。其主要作用是在保证基质稳定和抗侵蚀能力的前提下,为植被生长提供相对良好的养分和水分环境<sup>[4]</sup>。

土壤可蚀性常被用来反映土壤是否易受侵蚀营力破坏,而从土力学角度看,土壤剪切变形本身就是一种常见的土壤侵蚀破坏形式<sup>[5]</sup>,土壤可蚀性  $K$  值和抗剪强度是表示土壤剥离过程和径流通过期间土壤抗蚀、抗剪性能较为合适的指标<sup>[6]</sup>,对防治土壤侵蚀和提高浅土层稳定性具有重要意义。有研究表明:在浅层土层中,植物通过根系的力学加固作用以及改变土壤水文的抗蚀效应共同影响边坡浅层土体的稳定性<sup>[7]</sup>。一方面,植被通过林冠截流、茎秆和凋落物层减缓地表径流,增加入渗<sup>[8]</sup>,同时通过蒸腾作用增加土壤孔隙中的孔隙水压力和基质吸力,增强边坡的水文加固作用<sup>[9]</sup>。另一方面,植被根系产生分泌物作为胶结剂促进土壤团聚体的形成和转化<sup>[10]</sup>,并与土壤缠绕形成根土复合体<sup>[11-12]</sup>,发挥加筋和锚固作用,通过改变土壤的结构<sup>[13]</sup>、水稳性团聚体特征<sup>[14]</sup>和微量元素含量<sup>[15]</sup>等土壤理化性质,间接影响土壤的结构稳定性和养分含量,从而提高土壤抗剪强度和抗侵蚀能力<sup>[16-17]</sup>。对于喷播绿化工程来说,植被恢复在一定程度上影响土壤的理化性质,而土壤理化性质也控制着植被生长过程,同时又长期决定着土壤的力学特性,影响坡面浅层土的稳定性,进而影响工程施工质量、后期养护投入和边坡生态恢复效果。因此,厘清较长时序的植被恢复和土壤改良情况,对揭示不同恢复时期坡面喷播土壤抗蚀和抗剪能力意义重大,同时也对边坡喷播绿化工程的施工方案、后期养护具有重要指导意义。

当前对于北京地区高速公路喷播绿化工程的恢复效果研究,多集中于施工后短期成效或单一恢复年限的公路边坡,缺少较长时序的动态研究,同时对于边坡喷播基质的抗蚀和抗剪性能鲜有研究,尚未清楚高速公路边坡在喷播建植后边坡基质抗蚀和抗剪能力与自然边坡的协调程度,以及植被和土壤性质对指标的影响。本研究选取北京地区采用相同植物、基材配方的厚层基材喷播方式的3种不同恢复年限的高速公路边坡以及对应的自然边坡作为研究对象,探究植被恢复过程中基质层稳定性的变化规律,分析恢复年限、植被特征、土壤理化性质与喷播基质抗蚀、抗剪性能间的关系,明确边坡恢复过程中喷播基质抗蚀和抗剪性能动态变化与影响因素,为北京地区高速公路边坡喷播绿化工程提供参考依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

北京地区位于华北平原北部,39°26′~41°03′N,115°25′~117°30′E,地处燕山山脉和太行山脉,地势

西北高、东南低，属于典型的温带大陆性季风气候，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，年平均气温为 11.4℃，1 月最低，7 月最高，无霜期为 191 d。年均降水量为 585 mm，集中在夏季。土壤类型自低向高为山地褐土、山地棕壤、山地草甸土。代表植物主要有乔木如侧柏 *Platycladus orientalis*、油松 *Pinus tabuliformis*、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、山杨 *Populus davidiana*、蒙古栎 *Quercus mongolica* 等；灌木如紫穗槐 *Amorpha fruticosa*、荆条 *Vitex negundo*、胡枝子 *Lespedeza bicolor*、山杏 *Armeniaca sibirica*、酸枣 *Ziziphus jujuba* 等；草本以狗尾草 *Setaria viridis*、紫花苜蓿 *Medicago sativa* 为主。

1.2 样地设置与样品采集

采用空间代替时间的方法，分别从京礼高速（恢复建植 5 a）、京昆高速（10 a）、京承高速（15 a）等 3 条不同恢复年限高速公路上选取坡度、坡长等基本参数相似，采用厚层基材喷播的阴坡、阳坡以及未受人工干扰的自然阴、阳坡（ck）各 1 块，共 12 块样地。样地气候、水文和基岩条件基本一致，植生基材采用当地山坡表层土，并配备相同植物以及黏合剂、保水剂等材料，喷播厚度均为 15 cm。每块样地坡上、中、下布设草本样方（1 m×1 m），灌木样方（5 m×5 m）各 3 个作为重复，共 108 个样方。样地基本特征见表 1。去除地表凋落物后，采用体积为 100 cm<sup>3</sup> 的环刀取土并称量，此外，按五点取样法采集表层 0~10 cm 的土壤样品，装入塑封袋带回实验室，风干、研磨、过筛以进行后续土壤理化性质测定。同时采集各样方内 0~10 cm 的原状土，装入铝盒带回实验室，按照土壤自然纹理轻掰为小土块，剔除石块、根系和动植物残体等，以进行后续团聚体筛分。

表 1 样地基本情况

| Table 1 Basic information of sampling sites |            |                   |                                                                                                                                              |     |          |          |            |
|---------------------------------------------|------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------|----------|------------|
| 恢复方式                                        | 恢复<br>年限/a | 桩号                | 植被类型                                                                                                                                         | 坡向  | 坡高/<br>m | 坡长/<br>m | 坡度/<br>(°) |
| 自然坡面                                        |            |                   | 荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i> 、胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 、<br>紫花地丁 <i>Viola philippica</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i> | 阴坡  | 36.1     | 110.1    | 36.3       |
|                                             |            |                   | 胡枝子、紫花地丁、狗尾草                                                                                                                                 | 阳坡  | 37.5     | 115.6    | 38.4       |
|                                             |            |                   | 荆条、胡枝子、侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>                                                                                                      | 阴坡  | 41.7     | 190.2    | 33.1       |
|                                             |            |                   | 荆条、狗尾草                                                                                                                                       | 阳坡  | 39.6     | 205.7    | 36.2       |
|                                             |            |                   | 荆条、牵牛 <i>Ipomoea nil</i> 、刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 、<br>紫穗槐 <i>Amorpha fruticosa</i>                                                   | 阴坡  | 33.5     | 130.1    | 35.2       |
|                                             |            |                   | 刺槐、紫穗槐、牵牛                                                                                                                                    | 阳坡  | 37.2     | 150.7    | 35.8       |
| 厚层基材<br>喷播+框格梁                              | 5          | K114+100-K114-230 | 紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> 、紫穗槐、狗尾草                                                                                                         | 阳坡  | 44.7     | 130.4    | 38.9       |
|                                             | 5          | K114+100-K114-230 | 紫穗槐、紫花苜蓿、青蒿 <i>Artemisia caruifolia</i>                                                                                                      | 阴坡  | 35.3     | 130.1    | 33.8       |
|                                             | 10         | K40+220-K40+435   | 荆条、紫穗槐、狗尾草、鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>                                                                                                          | 半阳坡 | 43.1     | 214.6    | 37.3       |
|                                             | 10         | K40+212-K40+415   | 紫穗槐、荆条、牵牛                                                                                                                                    | 半阴坡 | 30.3     | 213.4    | 35.2       |
|                                             | 15         | YK27+400-YK27+540 | 荆条、牵牛、刺槐                                                                                                                                     | 阳坡  | 32.4     | 139.5    | 32.1       |
|                                             | 15         | ZK26+982-ZK27+102 | 紫穗槐、牵牛、刺槐                                                                                                                                    | 阴坡  | 30.1     | 120.1    | 30.6       |

1.3 植被特征计算

利用 α 多样性指数分析群落的物种多样性特征，Shannon-Wiener 多样性指数 (*H*)、Pielow 均匀度指数 (*E*)、Simpson 优势度指数 (*D*) 计算公式如下：

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \times \ln P_i;$$

(1)

$$E = H / \ln S;$$

(2)

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (N_i / N)^2。$$

(3)

式 (1)~(3) 中：*P<sub>i</sub>* 是物种 *i* 的数量在样方中所占比例，即 *P<sub>i</sub>*=*N<sub>i</sub>*/*N*，其中 *N<sub>i</sub>* 是样方内物种 *i* 的个体数，*N* 是样方内所有物种的个体数；*S* 是样方内植物种类总数。

植被覆盖度采用目估法测算。

#### 1.4 土壤理化性质测定

土壤容重、总孔隙度、田间持水量、饱和含水率用环刀浸水法 (100 cm<sup>3</sup>) 测定; pH 采用 pH 计测定 (水土体积比 2.5:1.0); 全氮采用半微量凯氏法测定; 有机碳采用重铬酸钾稀释热法测定。

#### 1.5 土壤团聚体水稳性测定

取风干土过筛后得到大团聚体 (> 2.000 mm)、中团聚体 (> 0.250~2.000 mm)、微团聚体 (> 0.053~0.250 mm) 和黏粉粒级团聚体 (≤ 0.053 mm) 等 4 个粒径的团聚体, 将各粒级土粒称量, 计算各级团聚体所占百分比, 按百分比配成 50 g 土样, 供湿筛分析。将供试土壤装入套筛 (孔径分别为 2.000、0.250、0.053 mm) 中沿沉降桶小心加水至筛边缘 2/3 处, 浸湿 5 min 后开机振荡 30 min, 振荡频率为 30 r·min<sup>-1</sup>。振荡结束后, 将各粒级土壤冲洗进称好质量的铝盒, 烘干后称质量, 计算各粒级百分比。团聚体稳定性指标, 平均质量直径 ( $D_{MW}$ )、几何平均直径 ( $D_{GM}$ )、团聚体破坏率 ( $D_{PA}$ ) 和土壤可蚀性  $K$  值的相关计算公式如下:

$$D_{MW} = \sum_{i=1}^n x_i w_i; \quad (4)$$

$$D_{GM} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln x_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right]; \quad (5)$$

$$D_{PA} = \frac{A - A_{WS}}{A} \times 100\%; \quad (6)$$

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \exp \left[ -0.5 \times \left( \frac{\lg D_{GM} + 1.675}{0.6989} \right)^2 \right] \right\}. \quad (7)$$

式 (4)~(7) 中:  $x_i$  为每粒级团聚体的平均直径 (mm);  $w_i$  为第  $x_i$  级的团聚体的质量百分比;  $A_{WS}$  为粒径 > 0.250 mm 水稳性团聚体的含量;  $A$  为粒径 > 0.250 mm 干筛稳定性团聚体的含量。

#### 1.6 土壤抗剪能力测定

用直径为 61.8 mm、高度为 40.0 mm 的环刀分别从样方内各取 4 个含根土块, 采样时去除植被茎叶、凋落物、砾石, 露出土壤面。采样完成后用保鲜膜密封。修整表面后, 用透水石将根土复合体挤入直剪盒。根据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》的规定, 试验时的最大剪切位移为 6 mm, 剪切速率为 0.8 mm·min<sup>-1</sup>, 在 4 种不同的法向应力 ( $\sigma=100$ 、200、300、400 kPa) 下进行试验。直剪试验采用全自动应变控制式直剪仪, 设备自动采集剪应力和位移数据并分析。根据 Mohr-Coulomb 公式计算土壤内摩擦角 [ $\varphi$ , (°)] 和黏聚力 ( $c$ , kPa):

$$\tau_{\max} = \sigma \times \tan \varphi + c. \quad (8)$$

式 (8) 中:  $\tau_{\max}$  为抗剪强度 (kPa), 取剪切位移为 4 mm 时的剪应力值;  $\sigma$  为轴向荷载 (kPa)。

#### 1.7 数据分析

采用 Excel 2021 对数据进行处理, 采用 SPSS 的多重比较法 (LSD)、单因素方差分析 (one-way ANOVA) 对不同恢复年限植被特征、土壤理化性质、水稳性团聚体稳定性、基质抗蚀性和抗剪能力进行差异显著性分析。采用冗余分析 (RDA) 确定上述各指标之间的相关性并建立回归方程。利用 Origin 2020 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同恢复年限的植被特征

如表 2 所示: 3 个不同恢复年限边坡植物群落主要物种属豆科 Fabaceae、禾本科 Gramineae、菊科 Asteraceae 和唇形科 Lamiaceae。在 5~15 a 的恢复过程中, 边坡植被群落经历了以紫穗槐+紫花苜蓿+青

蒿→紫穗槐+荆条+狗尾草→紫穗槐+荆条+刺槐为主的多年生草本向灌草，再向乔灌草群落的演替过程。此外，植被群落特征在边坡恢复的过程中不断变化，Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H$ )、Pielow 均匀度指数 ( $E$ )、Simpson 优势度指数 ( $D$ ) 和植物覆盖度的变化范围分别为 1.08~2.00、0.90~0.94、0.61~0.83、52.96%~89.39%，均随恢复年限的增加呈现上升趋势。其中，多样性指数、优势度指数以及植被覆盖度均呈现极显著增加趋势 ( $P<0.01$ )，恢复 10、15 a 与恢复 5 a 相比，分别增加了 14.80%、8.20%、20.77% 和 44.44%、22.95%、40.45%，与自然边坡的差距逐渐减小，但尚未达到自然边坡水平，均匀度指数没有显著差异。

表 2 不同恢复年限植被特征

Table 2 Vegetation characteristics of different restoration years

| 恢复年限/a | Shannon-Wiener 多样性指数( $H$ ) | Pielow均匀度指数( $E$ ) | Simpson优势度指数( $D$ ) | 植被覆盖度/%       | 植被类型            |
|--------|-----------------------------|--------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| ck     | 2.00±0.29 a                 | 0.91±0.03 ab       | 0.83±0.07 a         | 89.39±7.07 a  | 荆条、胡枝子、紫花地丁、狗尾草 |
| 5      | 1.08±0.29 c                 | 0.90±0.04 b        | 0.61±0.11 b         | 52.96±11.68 d | 紫穗槐、紫花苜蓿、狗尾草、青蒿 |
| 10     | 1.24±0.28 c                 | 0.91±0.03 b        | 0.66±0.10 b         | 63.96±7.38 c  | 荆条、紫穗槐、狗尾草、鬼针草  |
| 15     | 1.56±0.24 b                 | 0.94±0.01 a        | 0.75±0.06 a         | 74.38±6.66 b  | 荆条、紫穗槐、牵牛、刺槐    |

说明：数据为平均值±标准差，不同小写字母表示不同恢复年限间差异显著 ( $P<0.05$ )。3 个自然边坡数据取平均值， $n=54$ ；不同恢复年限阴、阳坡数据取平均值， $n=18$ 。

## 2.2 不同恢复年限的土壤理化性质特征

不同恢复年限边坡的土壤理化性质之间有显著差异 (表 3)。随着恢复年限不断增加，土壤容重和 pH 均呈现下降趋势，变化范围分别为 1.01~1.19  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和 7.46~7.71，人工边坡的土壤容重始终低于自然边坡，pH 整体呈弱碱性，从 5 a 到 10 a 的恢复过程中，pH 逐渐下降至低于自然边坡。土壤饱和含水率和全氮质量分数均随着恢复年限的增加而呈现极显著增加趋势 ( $P<0.01$ )，在 10 a 向 15 a 恢复进程中超过自然边坡水平，在 15 a 时分别达 54.62% 和 1.53  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤总孔隙度和土壤有机碳质量分数变化范围分别为 50.11%~54.6% 和 3.85~7.55  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中土壤有机碳质量分数大幅度升高，呈现随恢复年限增加而增加的趋势，但研究区段内均未达到自然边坡水平。

表 3 不同恢复年限土壤理化性质

Table 3 Physicochemical properties of soil at different years of restoration

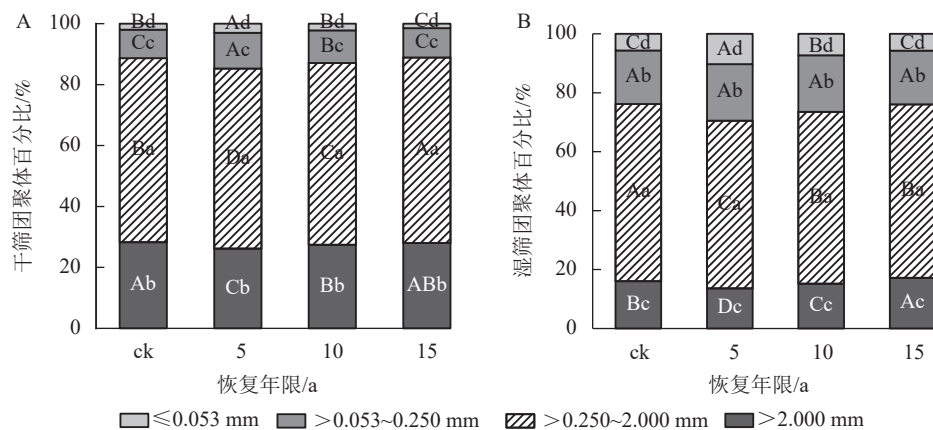
| 恢复年限/a | 容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 总孔隙度/%       | 饱和含水率/%      | 土壤pH         | 土壤全氮/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ | 土壤有机碳/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$ |
|--------|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| ck     | 1.21±0.06 a                         | 58.73±2.23 a | 49.26±2.27 b | 7.67±0.18 ab | 1.38±0.14 ab                          | 7.78±1.17 a                            |
| 5      | 1.17±0.04 a                         | 50.11±1.80 d | 44.02±2.24 c | 7.71±0.17 a  | 0.82±0.20 c                           | 3.85±1.77 c                            |
| 10     | 1.10±0.07 b                         | 52.50±1.76 c | 45.65±2.22 c | 7.60±0.13 b  | 1.26±0.32 b                           | 6.13±1.16 b                            |
| 15     | 1.01±0.08 c                         | 54.62±1.38 b | 52.26±3.80 a | 7.46±0.11 c  | 1.53±0.35 a                           | 7.55±1.18 a                            |

说明：数据为平均值±标准差，不同小写字母表示不同恢复年限间差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.3 不同恢复年限土壤团聚体分布和稳定性特征

由图 1 可知：3 个不同恢复年限边坡的水稳性团聚体主要以  $>0.250\sim 2.000$  和  $>0.053\sim 0.250$  mm 粒径为主，总体上占比从高到低依次为中团聚体、微团聚体、大团聚体、黏粉粒团聚体。边坡恢复过程中，大团聚体和中团聚体占比呈现极显著上升趋势 ( $P<0.01$ )，边坡恢复 15 a 中团聚体占主导地位，占比为 59%，接近自然边坡水平，大团聚体占比 17%，超过自然边坡水平。与之相反，微团聚体和黏粉粒团聚体在边坡恢复过程中比例呈现极显著下降趋势 ( $P<0.01$ )，与边坡恢复 5 a 相比，15 a 下降 1% 和 4%。

由表 4 可知：土壤团聚体几何平均直径 ( $D_{\text{GM}}$ )、平均质量直径 ( $D_{\text{MW}}$ ) 以及团聚体破坏率 ( $D_{\text{PA}}$ ) 随恢复年限的增加与自然边坡差距逐渐减小， $D_{\text{GM}}$  和  $D_{\text{MW}}$  分别从低于自然边坡 9.34% 和 19.88% 增长至高于自然边坡， $D_{\text{PA}}$  从高于自然边坡 18.01% 降至低于自然边坡。土壤团聚体稳定性从大到小依次为 15 a、ck、10 a、5 a。土壤可蚀性  $K$  值在边坡恢复过程中，在恢复 5 和 10 a 时分别高于自然边坡 24.41% 和 9.42%，在 15 a 时恢复至低于自然边坡 1.07%，土壤抗蚀性恢复至自然边坡水平。



不同大写字母表示不同恢复年限间差异显著( $P<0.05$ ), 不同小写字母表示不同粒径间差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 不同恢复年限干、湿筛团聚体粒径分布

Figure 1 Particle size distribution of wet sieve aggregates with different recovery years

表 4 不同恢复年限土壤团聚体稳定性指标

Table 4 Soil aggregate stability indexes of different restoration years

| 恢复年限/a | 几何平均直径( $D_{GM}$ )/mm | 平均质量直径( $D_{MW}$ )/mm | 团聚体破坏率( $D_{PA}$ )/% | 土壤可蚀性 $K$ 值   |
|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------|
| ck     | 0.76±0.05 a           | 1.27±0.05 a           | 14.67±1.25 c         | 0.047±0.003 c |
| 5      | 0.61±0.04 c           | 1.15±0.04 c           | 17.31±0.59 a         | 0.058±0.004 a |
| 10     | 0.69±0.06 b           | 1.22±0.05 b           | 15.72±1.21 b         | 0.051±0.005 b |
| 15     | 0.77±0.06 a           | 1.29±0.05 a           | 14.46±1.78 c         | 0.046±0.003 c |

说明: 数据为平均值±标准差, 不同小写字母表示不同恢复年限间差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.4 不同恢复年限边坡表土土壤抗剪强度变化特征

不同恢复年限边坡土壤剪应力-位移曲线如图 2A 和 B 所示。取位移 4 mm 时剪应力, 拟合成不同恢复年限边坡表土抗剪强度变化曲线如图 2C 所示。边坡恢复 5 和 10 a 时的抗剪强度拟合曲线位于自然边坡上方, 而恢复 15 a 时的土壤抗剪强度拟合曲线与自然边坡相交, 说明边坡恢复 5 和 10 a 时土壤抗剪强度高于自然边坡。自然边坡和 3 个不同恢复年限的土壤平均抗剪强度分别为 114.22、121.83、124.31 和 110.55 kPa, 呈现先增加后减小的趋势。

3 种不同恢复年限的土壤抗剪强度指标结果如图 2D 所示。边坡恢复 5、10、15 a 和自然边坡的黏聚力分别为 27.83、28.67、30.21 和 15.18 kPa, 随着恢复年限的不断增加, 人工边坡的内摩擦角比自然边坡分别提高了 83.33%、88.87%、99.01%。边坡恢复 5 和 10 a 的内摩擦角均低于自然边坡水平, 没有显著差别, 在恢复 15 a 时有较大下降, 变化幅度为 18.16%。

## 2.5 不同恢复年限喷播基质抗蚀和抗剪能力的影响因素

冗余分析 (图 3) 表明: 植被特征和土壤指标对表土稳定性在第 I 轴和第 II 轴的解释量分别为 70.82% 和 12.60%。各影响因素中, 饱和含水率、几何平均直径、多样性指数和团聚体破坏率显著影响土壤稳定性指标, 其贡献率分别为 65.7%、11.8%、6.3% 和 5.0%。其中土壤可蚀性  $K$  值与容重、团聚体破坏率显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与饱和含水率、团聚体几何平均直径、团聚体平均质量直径显著负相关 ( $P<0.05$ ); 黏聚力与饱和含水率、多样性指数显著正相关 ( $P<0.05$ ), 与容重显著负相关 ( $P<0.05$ ); 而内摩擦角则与饱和含水率显著正相关, 与容重显著负相关 ( $P<0.05$ )。

进一步对植被特征、土壤指标与土壤稳定性指标进行回归分析 (图 4) 发现: 土壤可蚀性  $K$  值可表征为容重 ( $R^2=0.627$ )、饱和含水率 ( $R^2=0.699$ )、团聚体几何平均直径 ( $R^2=0.902$ ) 和团聚体破坏率 ( $R^2=0.776$ ) 的线性函数。黏聚力可以表征为多样性指数 ( $R^2=0.660$ ) 和容重 ( $R^2=0.750$ ) 的线性函数, 以及饱和含水率 ( $R^2=0.816$ ) 的幂函数。内摩擦角则可以表征为容重 ( $R^2=0.813$ ) 和饱和含水率 ( $R^2=0.699$ ) 的幂函数。

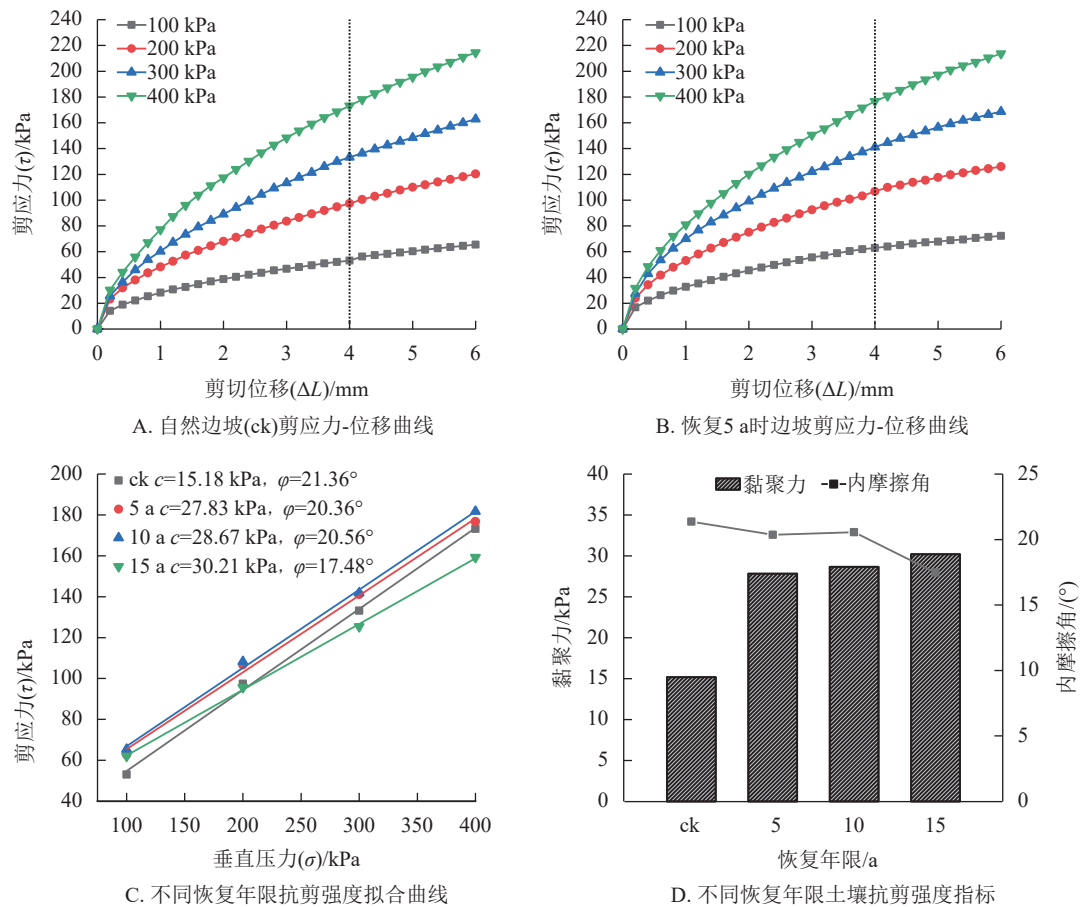


图 2 不同恢复年限下土壤黏聚力和内摩擦角对比

Figure 2 Comparison of soil cohesion and internal friction angle of matrix layer under different restoration years

### 3 讨论

#### 3.1 不同恢复年限对植被特征的影响

在本研究区的植被恢复过程中, 豆科、禾本科、菊科和唇形科植物为主要优势种。菊科、禾本科植物通过增加根系生物量来吸收更多水分, 同时通过增加根冠比来减少水分散失, 豆科植物可以与根瘤菌共生, 增加土壤氮含量, 改善土壤条件, 促进植物生长, 植被开始由 1 年生或 2 年生物种逐渐向多年生物种演替<sup>[18]</sup>。随着恢复年限的增加, 边坡植被的 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、植物覆盖度均呈现显著上升趋势, 恢复 10 a 向 15 a 过程中指标涨幅大于恢复初期, 但仍低于自然边坡。这可能是由于在植被演替过程中, 灌乔木的生长改善了边坡水热条件, 为植被生长提供有利条件, 随着植被多样性和覆盖度的增加, 减弱了降水对土壤的侵蚀, 有利于土壤养分积累, 从而进一步促进植被的生长<sup>[19]</sup>。但指标的快速增长出现在刺槐演替成为优势种的过程中, 喷播施工方案中刺槐仅采用种子喷播的方式, 刺槐的萌发和生长会受到先锋草本植

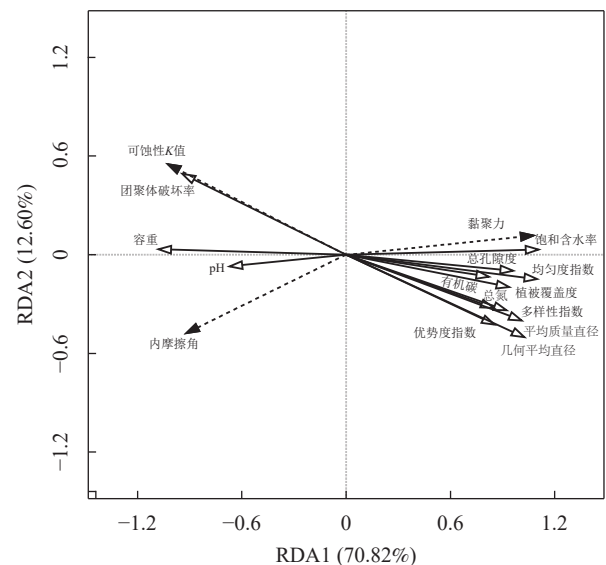


图 3 植被特征、土壤性质与土壤抗蚀和抗剪指标相关性

Figure 3 Correlation between vegetation characteristics, soil properties and soil anti-erodibility, shear strength indexes

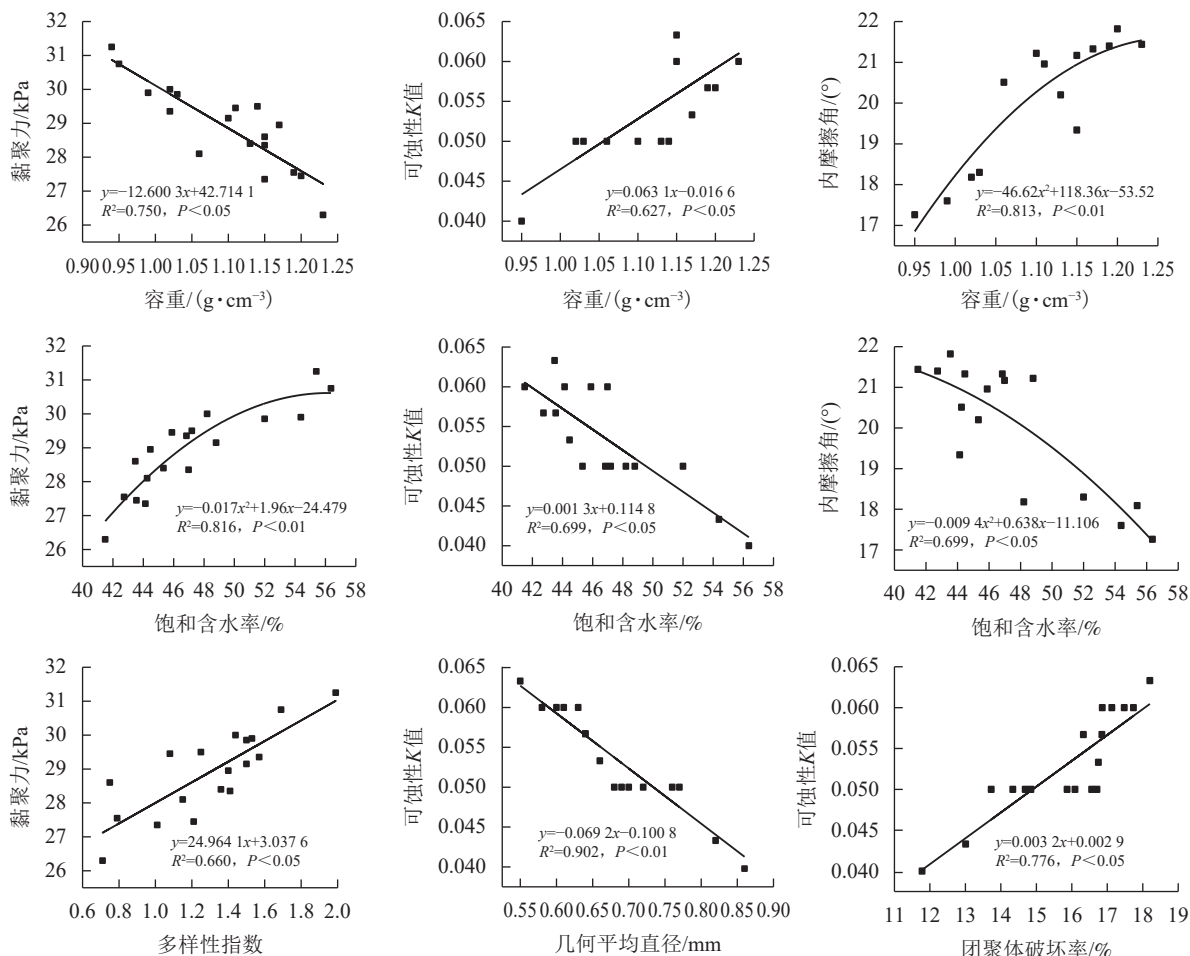


图4 土壤理化性质与土壤抗蚀和抗剪性指标回归分析

Figure 4 Regression analysis of soil physical and chemical properties and soil erosion resistance and shear strength index

物的影响, 建议在施工时采用喷播+栽植的方式适当提高刺槐数量。

### 3.2 不同恢复年限对土壤理化性质和团聚体分布特征的影响

在边坡植被恢复过程中, 植被和土壤的协同作用会改变土壤结构和养分<sup>[20]</sup>。本研究结果显示: 随着边坡恢复年限的不断增加, 土壤容重不断减小, 总孔隙度以及土壤水稳性大团聚体和中团聚体占比上升, 在研究区段内指标变化幅度均表现出恢复后期快于前期的特征, 并在恢复 15 a 时超过自然边坡水平, 这表明土壤结构在恢复过程中得到改善。这可能是由于紫穗槐、刺槐等灌木数量不断增多, 土壤中根系发达, 在释放分泌物增强胶结作用促进团聚体向大粒级转化的同时, 固结、缠绕、挤压土体<sup>[21]</sup>, 此外, 由于植被覆盖度的变化, 减少了土壤水分蒸发和外力对团聚结构的冲击<sup>[22]</sup>, 土壤结构得到改善, 使得土壤的保水性能得到提升, 所以饱和含水率随恢复年限的增加逐渐上升, 在恢复 10~15 a 过程中, 饱和含水率的涨幅是恢复 5~10 a 时的 4.06 倍, 较高的土壤含水量也适宜刺槐等高耗水植物的生长<sup>[23]</sup>。土壤全氮和有机碳含量随着恢复时间的延长不断增长, 恢复 15 a 比恢复 5 a 时分别增长了 86.59% 和 96.1%, 但恢复后期的增长幅度低于前期, 且有机碳含量未达到自然边坡水平。这可能是植物的固氮作用以及碳循环的增强使得土壤全氮和有机碳含量上升, 但乔木的快速生长消耗了过多土壤养分<sup>[24]</sup>, 使得微量元素增长速率下降, 建议在恢复 10 a 时对边坡进行合理追肥, 以提高碳、氮含量。

### 3.3 不同恢复年限对喷播基质抗蚀和抗剪性能的影响

通常, 土壤可蚀性  $K$  值用来表征土壤抗蚀能力<sup>[25]</sup>, 而黏聚力和内摩擦角用来表征土壤抗剪能力<sup>[26]</sup>。本研究结果显示: 土壤可蚀性  $K$  值随恢复年限的增加而减小, 这是由于土壤团聚体几何平均直径、平均质量直径上升, 团聚体破坏率下降, 团聚体稳定性更高, 土壤抵抗径流冲刷等外力作用的能力提升, 与此同时, 全氮、有机碳等养分的增加, 以及土壤总孔隙度的增加, 为土壤水、肥、气、热提供了良好条件, 土壤表层根系发育较好, 有效改善土壤孔隙结构<sup>[27]</sup>, 使得降雨能够更快渗透, 削弱降雨对土壤的侵

蚀,提升土壤抗侵蚀能力<sup>[28]</sup>。另一方面根系长度、直径和细根数量增加,加大了与土壤的接触面积,根系的加筋效应提高,土壤所受剪应力更多转化为根系拉应力<sup>[29]</sup>,同时植被消耗土壤水分,增加了土壤基质的吸力<sup>[30]</sup>,使得土壤黏聚力不断增加,土壤的抗剪强度不断增加,在恢复 5 和 10 a 时均高于自然边坡,而恢复 15 a 时低于自然边坡,是因为内摩擦角在恢复 15 a 时下降 18.16%,这可能是在一定土壤含水量范围内,土壤黏聚力和内摩擦角会随着土壤含水量的增加而增加,土壤抗剪强度增加,但当土壤含水量超过一定阈值时,颗粒间摩擦性能减弱,内摩擦角减小,削弱了土壤抗剪性能,使得土壤抗剪强度降低<sup>[31]</sup>。但人工边坡内摩擦角数值在恢复过程中一直低于自然边坡,这与抗剪强度的变化趋势并不一致,所以本研究黏聚力对抗剪强度的影响更为重要。

## 4 结论

随植被恢复年限的增加,植被群落发生正向演替,边坡植被多样性和覆盖度显著增加,并在刺槐成为优势种的过程中呈现快速增长。同时,土壤结构和养分不断提升,在 15 a 时恢复至自然边坡水平,但土壤理化性质指标在恢复后期的增长幅度低于前期。植被恢复和土壤性质的改善可以显著提高土壤抗蚀和抗剪性能,解释率为 83.42%。土壤抗蚀能力可表征为平均质量直径、几何平均直径、团聚体破坏率的线性函数,  $R^2$  为 0.77~0.90,而土壤黏聚力随多样性指数和容重线性增加,内摩擦角随饱和含水率减小,虽然一定程度上降低了土壤的抗剪性能,但黏聚力对土壤抗剪能力影响更强,从高到低为 15 a、ck、10 a、5 a。因此,建议在喷播绿化施工方案中采取喷播+栽种方式种植刺槐,并且在恢复 10 a 时对边坡进行适当追肥,同时,可以优先采用上述 6 个指标对土壤抗蚀和抗剪性能进行分析,这对边坡喷播绿化植物选配和后期养护具有一定的参考意义。但当前研究仅关注了地上植被与土壤性质的关系,后续研究应该结合植物根系相关指标进一步探讨植被对土壤抗蚀抗剪性能的影响。

## 5 参考文献

- [1] LANE P N J, HAIRSINE P B, CROKE J C, *et al.* Quantifying diffuse pathways for overland flow between the roads and streams of the mountain ash forests of central Victoria Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2006, **20**(9): 1875–1884.
- [2] NYSSSEN J, POESEN J, MOEYERSONS J, *et al.* Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, **27**(12): 1267–1283.
- [3] 张崇军. 北京山区高速公路边坡绿化植物筛选及配置模式研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.  
ZHANG Chongjun. *Study on the Selection and Disposition Pattern of Greening Plants on Slope of Beijing Expressway in Mountains Area*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [4] 赵佳愉. 椰丝纤维长度对喷播基材的加强作用及机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.  
ZHAO Jiayu. *Study on the Reinforcement Effect and Mechanism of Coir Fiber Length on Spray-seeding Substrate*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.
- [5] ASHWORTH A J, OWENS P R, ALLEN F L. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling[J/OL]. *Geoderma*, 2020, **361**: 114062[2025-01-02]. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114062.
- [6] FOX D M, DARBOUX F, CARREGA P. Effects of fire-induced water repellency on soil aggregate stability, splash erosion, and saturated hydraulic conductivity for different size fractions [J]. *Hydrological Processes*, 2007, **21**(17): 2377–2384.
- [7] 王凯畅. 浅层滑坡区植被恢复条件下土体水力特征对边坡稳定的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.  
WANG Kaichang. *Influence of Soil Hydraulic Characteristics on Slope Stability under Vegetation Restoration in Shallow Landslide Area*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [8] 邢书昆, 张光辉, 朱平宗. 黄土丘陵沟壑区退耕年限对根—土复合体抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(4): 41–48, 54.  
XING Shukun, ZHANG Guanghui, ZHU Pingzong. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and gully region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, **35**(4): 41–48, 54.
- [9] ABD I A, FATTAH M Y, MEKKIYAH H. Relationship between the matric suction and the shear strength in unsaturated soil [J/OL]. *Case Studies in Construction Materials*, 2020, **13**: e00441[2025-01-02]. DOI:10.1016/j.cscm.2020.e00441.
- [10] 刘爱霞, 高照良, 李永红, 等. 关中平原高速公路边坡不同植被恢复年限土壤团聚体分形特征研究[J]. 水土保持学报,

- 2011, **25**(1): 219–223, 237.
- LIU Aixia, GAO Zhaoliang, LI Yonghong, *et al.* Fractal characteristics research on soil aggregates during highway slope vegetation restoration of different ages in Guanzhong Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(1): 219–223, 237.
- [11] WANG Xia, HONG Miaomiao, HUANG Zheng, *et al.* Biomechanical properties of plant root systems and their ability to stabilize slopes in geohazard-prone regions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, **189**: 148–157.
- [12] LI Jia, WANG Xia, JIA Haixia, *et al.* Effect of herbaceous plant root density on slope stability in a shallow landslide-prone area [J]. *Natural Hazards*, 2022, **112**(3): 2337–2360.
- [13] 柳洋. 陇中黄土丘陵区不同林龄刺槐林根系特征及边坡稳定性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- LIU Yang. *Research on the Root System Characteristics and Slope Stability of Robinia pseudoacacia L. Forests with Different Stand Ages in the Loess Hilly area of Central Gansu*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [14] 陈曦, 王改玲, 刘焕焕, 等. 黄土高原吕梁山不同撂荒年限土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征[J]. 土壤, 2021, **53**(2): 375–382.
- CHEN Xi, WANG Gailing, LIU Huanhuan, *et al.* Stability and organic carbon distribution of soil aggregates with different fallow years in Lüliang Mountains in Loess Plateau [J]. *Soils*, 2021, **53**(2): 375–382.
- [15] 陈伯洲, 胡建华, 吴威, 等. 白龙江流域不同植被类型修复模式下土壤理化性质与边坡稳定性[J]. 山地学报, 2024, **42**(2): 260–277.
- CHEN Bozhou, HU Jianhua, WU Wei, *et al.* Physicochemical properties of soil under restoration of different vegetation types and resulting slope stability in the Bailong River Basin, China [J]. *Mountain Research*, 2024, **42**(2): 260–277.
- [16] ZHANG Yue, ZHONG Xiaoyan, LIN Jinshi, *et al.* Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of Southern China[J/OL]. *Geomorphology*, 2020, **351**: 106956[2025-01-02]. DOI: [10.1016/j.geomorph.2019.106956](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106956).
- [17] ZHANG Baojun, ZHANG Guanghui, YANG Hanyue, *et al.* Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. *CATENA*, 2019, **173**: 375–383.
- [18] 赵啸龙, 谢玉鸿, 马旭君, 等. 科尔沁沙质草地不同恢复年限草本层群落结构及其与土壤理化性质的关系[J]. 中国沙漠, 2022, **42**(2): 134–141.
- ZHAO Xiaolong, XIE Yuhong, MA Xujun, *et al.* Vegetation structure and its relationship with soil physicochemical properties in restoring sandy grassland in Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Desert Research*, 2022, **42**(2): 134–141.
- [19] 贺启坤, 陈大岭, 李邵宇, 等. 阴山北麓不同恢复年限弃耕地植物群落生物量与土壤养分变化[J]. 中国草地学报, 2022, **44**(10): 30–37.
- HE Qishen, CHEN Daling, LI Shaoyu, *et al.* Changes of plant community biomass and soil nutrients in abandoned farmland in different restoration years at the northern piedmont of Yinshan Mountain [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, **44**(10): 30–37.
- [20] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 等. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J]. 生态学报, 2017, **37**(2): 416–424.
- ZHANG Xiaoxia, YANG Zongru, ZHA Tonggang, *et al.* Changes in the physical properties of soil in forestlands after 22 years under the influence of the Conversion of Cropland into Farmland Project in loess region, western Shanxi Province[J/OL]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 416–424.
- [21] 张钦弟, 刘剑荣, 杨磊, 等. 半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J]. 生态学报, 2022, **42**(22): 9057–9068.
- ZHANG Qindi, LIU Jianrong, YANG Lei, *et al.* Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(22): 9057–9068.
- [22] ZHONG Yangquanwei, YAN Weiming, WANG Ruiwu, *et al.* Differential responses of litter decomposition to nutrient addition and soil water availability with long-term vegetation recovery [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, **53**(8): 939–949.
- [23] 南国卫, 王静慧, 秦淑莹, 等. 不同恢复年限刺槐林林下草本层的物种多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(5): 978–985.

- NAN Guowei, WANG Jinghui, QIN Shuying, *et al.* Diversity characteristics of herbaceous species under *Robinia pseudoacacia* forest in different years [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(5): 978–985.
- [24] 王冰怡, 张勇, 吴翠蓉, 等. 不同造林年限马尾松林碳密度结构特征及其影响因素[J]. 浙江农林大学学报, 2025, **42**(2): 291–301.
- WANG Bingyi, ZHANG Yong, WU Cuirong, *et al.* Characteristics and influencing factors of carbon density structure in *Pinus massoniana* forests with different afforestation years [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(2): 291–301.
- [25] 陈涛, 周利军, 齐实, 等. 华蓥市山区典型林分土壤团聚体稳定性及抗蚀能力[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(6): 1161–1169.
- CHEN Tao, ZHOU Lijun, QI Shi, *et al.* Soil aggregate stability and anti-erodibility of typical forest stands in Huaying mountain area [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(6): 1161–1169.
- [26] 文慧, 倪世民, 王艺彤, 等. 赣南崩岗区不同植被类型粉砂质土壤抗剪强度及其影响因素[J]. 土壤学报, 2022, **59**(6): 1517–1526.
- WEN Hui, NI Shimin, WANG Yitong, *et al.* A study on silty soil shear strength and its influencing factors in different vegetation types in Benggang erosion area of southern Jiangxi [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(6): 1517–1526.
- [27] 沙晓玮, 武昱鑫, 贾国栋, 等. 冀北山地植被恢复对不同坡位土壤可蚀性与养分的影响[J]. 水土保持学报, 2024, **38**(4): 11–19, 28.
- SHA Xiaowei, WU Yuxin, JIA Guodong, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil erodibility and nutrients at different slope sites in northern Hebei mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, **38**(4): 11–19, 28.
- [28] 陈国靖, 蔡进军, 马璠, 等. 宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(5): 49–53, 60.
- CHEN Guojing, CAI Jinjun, MA Fan, *et al.* Effects of typical forest and grass vegetation structure on soil water-stable aggregates in Hilly Loess Plateau of Ningxia Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(5): 49–53, 60.
- [29] 王月, 杜峰, 周敏, 等. 陕北林草混交根土复合体抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(2): 213–219.
- WANG Yue, DU Feng, ZHOU Min, *et al.* Research on shear strength of root-soil composite in a forest and grass standing site in northern Shaanxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(2): 213–219.
- [30] YILDIZ A, GRAF F, RICKLI C, *et al.* Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus [J]. *Catena*, 2018, **166**: 98–113.
- [31] 田愉琴, 王兵, 汪建芳, 等. 黄土丘陵区典型草本根系特征对土壤抗剪特性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, **31**(3): 153–159.
- TIAN Yuqin, WANG Bing, WANG Jianfang, *et al.* Influence of typical herbaceous root characteristics on soil shear properties in loess hilly regions [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, **31**(3): 153–159.