

# 基于多因素回归分析黄河流域地铁建设 水土流失特性研究

张翼鹏

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年1月5日; 录用日期: 2026年2月11日; 发布日期: 2026年2月26日

## 摘要

随着城市化进程与交通需求的发展, 地铁建设在城市化建设中效果显著, 在江河流域城市中, 地铁的建设会改变地形地貌、扰动土壤、破坏原有植被、造成水土流失, 引发如堵塞河道、污染水质等严重的水土问题。为研究黄河流域城市地铁建设的水土流失特性, 定量评估地铁建设时期水土流失程度, 得到多种因素对地铁车辆段建设水土流失的影响规律。采用插钎法、径流小区法监测黄河流域地区地铁建设项目车辆段边坡及周围道路水土流失情况, 利用SPSS、Origin软件对监测结果进行回归分析, 建立径流小区产砂量的多元逐步回归模型。研究表明: 车辆段插钎区域土壤流失量与月降雨的回归方程为 $y = 10.04176 + 0.00911x$ ; 车辆段径流小区产砂量的多元逐步回归模型方程为 $y = 257.729 - 1.107x_4 + 0.426x_1$ , 其中自变量为降雨量和土壤厚度。表明地铁建设时期土壤受到扰动更易发生水土流失, 降雨量的增大使得车辆段道路周围土壤高度降低, 水土流失严重。降雨量与土壤厚度是径流小区产砂量的主要影响因素, 边坡坡度与植被覆盖率为次要影响因素。建议在黄河流域地区的地铁建设水土保持工作中, 做好降雨预警、及时增加临时防护措施; 保护现有土壤、规划土方调配、适当增加土层厚度是最有效的措施。

## 关键词

黄河流域, 地铁建设, 多元逐步回归, 水土保持监测

# Research on the Characteristics of Soil Erosion in Metro Construction in the Yellow River Basin Based on Multivariate Regression Analysis

Yipeng Zhang

School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power,  
Zhengzhou Henan

文章引用: 张翼鹏. 基于多因素回归分析黄河流域地铁建设水土流失特性研究[J]. 水土保持, 2026, 14(1): 1-15.  
DOI: 10.12677/ojswc.2026.141001

## Abstract

With the development of urbanization and transportation demands, the construction of subways has achieved remarkable results in urbanization. In cities along river basins, the construction of subways can alter the topography and landforms, disturb the soil, damage the original vegetation, cause soil erosion, and lead to serious soil and water problems such as blocking rivers and polluting water quality. By employing the erosion pin and runoff plot methods to monitor soil and water loss on depot slopes and surrounding roads of subway construction projects in the Yellow River Basin, this study aims to characterize soil erosion, quantitatively evaluate its severity during the construction period, and identify the underlying patterns influenced by various factors. The monitoring results were analyzed by regression using SPSS and Origin software, and a multiple stepwise regression model for the sand production of the runoff plot was established. The research shows that the regression equation of soil loss in the vehicle depot brazing area and monthly rainfall is  $y = 10.04176 + 0.00911x$ ; The multiple stepwise regression model equation for the sediment yield of the vehicle depot runoff plot is  $y = 257.729 - 1.107x_4 + 0.426x_1$ , where the independent variables are rainfall and soil thickness. It indicates that during the subway construction period, the soil is more prone to soil erosion due to disturbance. The increase in rainfall leads to a decrease in the soil height around the vehicle depot roads, resulting in severe soil erosion. Rainfall and soil thickness are the main influencing factors of sand production in runoff plots, while slope gradient and vegetation coverage rate are secondary influencing factors. It is suggested that in the soil and water conservation work of metro construction in the areas through which the Yellow River flows, proper rainfall warnings should be issued and temporary protective measures should be added in a timely manner. Protecting the existing soil, planning the earthwork allocation and appropriately increasing the thickness of the soil layer are the most effective measures.

## Keywords

The Yellow River Basin, Metro Construction, Gradual Return of Diversity, Soil and Water Conservation Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水土流失是我国面临的分布广泛、危害严重的生态环境诸多显著问题之一，集中反映了生态环境是否退化，严重的水土流失会导致耕地减少，严重影响我国的农业发展[1]。据全国水利普查统计，我国水土流失量大、水土保持面积小，土壤侵蚀面积占普查范围总面积的31.12%，属于水土流失情况严重的国家之一[2]。水土流失改变了部分土地利用现状，使土地基本丧失第一性质的生产能力，威胁到国家粮食安全。特别是在一些贫困地区，如黄土高原地区，水土流失加剧了贫困问题，形成了“越穷越垦、越垦越穷”的恶性循环；此外水土流失也会造成江河湖库淤积与洪涝灾害，流失的大量泥沙被水流携带至下游，淤积在河道、湖泊和水库中，导致河床抬高、库容减小，行洪能力下降。保护水土资源是国家可持续发展的基础，也是制约经济发展和社会进步的主要环境因素，我国属于人口众多、自然资源相对匮乏、灾

害频发的农业大国,保护作为耕地资源基本保证的水土资源是我国面临的一项艰巨而又紧急的任务[3]。

对于城市而言,城市化建设避免不了要对现有土地进行改造,一些农田耕地被建筑物与城轨交通线路的建设占用,截止至2024年,我国内地累计有59个城市投运城轨道交通线路11232.65公里[4]。其中,地铁作为城市轨道交通的主要形式,占据了相当大的比例。地铁施工采用的方法有明挖法、暗挖法、盖挖法等,都会扰动大面积的土地,车辆段和地铁主体的建设会涉及到土石方开挖、回填、堆放等施工活动,将为水土流失的发生提供充足的物质来源,开挖形成的边坡在强降雨作用下,易诱发小型崩塌,滑塌和滑坡等,造成严重水土流失[5]。除此之外,土地扰动会使大量的地表植被被清除,缺少了植物根系对土壤的保护作用,大量的泥沙被雨水冲刷进入排水管道,使得城市生态环境难以恢复。在轨道建设水土保持的相关研究中,Chen Huihua等[6]学者通过整合层次分析过程(AHP)和物质元素分析(MEA)开发了一种全面的定量评估方法,以评估铁路建设过程活动对当地水土环境造成的不利影响,为后续铁路建设提供可持续的评估体系。Tang Hongliang等[7]学者根据工程经验和现有研究,将影响工程建设项目水土流失的影响因素分为自然条件(NC)、建筑活动(CA)、养护措施(CM)和管理措施(MM),并且同样利用层次分析法建立了特大城市建设项目土壤侵蚀风险评估模型,确定了各种影响因素的权重,对影响建设项目的水土流失风险进行排序,确定了管理措施是最重要因素,自然条件对水土流失影响较大,但不同地区差异较大。Nogueira Keiller等[8]学者通过提出一种基于深度学习的新框架,利用Arcgis创建了新的土壤侵蚀识别数据集,将地铁建设时期土壤侵蚀程度识别由人类识别转换为机器自主识别。

一些国内学者依托地铁建设案例对轨道建设的水土保持进行了相关研究,储召蒙等[9]以深圳地铁8号线为例,分析了地铁施工期生活区可能发生的水土流失危害并提出防治措施。姜云保等[10]以南昌地铁4号线为例,划分了项目区不同水土流失强度区域,并研究了区域内水土流失动态变化,提出了水土流失防治措施体系。焦莹等[11]研究了雨洪资源利用与林草恢复措施对缓解城市水土流失的响应机理。

国外学者对轨道建设水土保持领域的研究多在利用运筹学方法分析轨道建设项目中影响水土流失的因素,建立水土流失风险评估模型,而国内学者以一些城市的轨道建设项目为例,针对各案例生产建设中因施工引发的水土流失危害,分析了城市水土流失危害机理并提出了一系列针对性的防治措施和体系。

城市轨道交通项目的水土流失是一个多尺度、长时期的监测过程[12],除了预防建设时期引起的水土流失灾害以外,还要通过长期监测总结轨道建设水土流失规律,预测轨道运营时期的水土流失程度。因此,本文以黄河流域中段地区两条走向不同的地铁线路车辆段为例,通过无人机遥感技术、径流小区法、插钎法等监测方法,并基于多元回归分析建立地铁建设区域降雨量、植被覆盖率、边坡坡度等因素与产砂量的关系,并得出结论,为轨道建设水土保持长期监测提供理论和数据支持。

## 2. 地铁建设水土保持概况

### 2.1. 项目概况

本文依托黄河流域中原段地区东西走向的A号地铁线路与南北走向的B号地铁线路展开研究,其中A号线位于北方土石山区山地丘陵保土水源涵养区和豫西黄土丘陵保土蓄水区,属淮河流域、平原地貌,温暖带大陆性季风气候,多年平均气温14.2摄氏度,多年平均降水量640.9 mm,主要土壤类型为褐土,植被类型属温带落叶阔叶林带,土壤侵蚀以微度水力侵蚀为主,项目区属省级水土流失重点治理区,该线的具体走向如图1所示,线路为东西走向,共设车站12座,线路长约43.5 km,设有A车辆段一座,车辆基地地块南北向长约1500 m,东西向宽约300 m,占地面积约30.65 hm<sup>2</sup>,地块内原地貌为耕地、住宅用地、交通运输用地。

B号线属于黄河流域、平原地貌,全线走向由北至南,路线所经区域地表广泛覆盖第四系冲、洪、积层,局部为风积层,其土质特征以砂质潮土最多,整个表层土壤疏松,土壤类型主要为潮土和褐土,所

在区域植被类型属落叶阔叶林带，多年平均气温 14.2 摄氏度，多年平均降水量 640.9 mm，线路全长约 29.3 km，全线设车站 21 座，该线走向示意图如图 2 所示。该线 B 车辆段地块东西长约 1200 m，南北宽约 250 m，占地面积约 10.30 hm<sup>2</sup>，地块内原地貌以商业用地、鱼塘、住宅用地、为主。

## 2.2. 地铁水土保持监测

水土保持监测方法主要采用实地量测、定位观测的方法：实地量测是指定期采取调查的方式，通过现场实地勘测应采用无人机拍摄和拍照获取，按标段测定不同防治区的地表扰动情况以及不同类型的面积[13]；定位观测是指结合了传统监测技术和现代科技手段，主要包括径流小区监测法、插钎法、排水沟法、沉砂池法等，以精准、高效地定位监测水土流失量。水土保持径流小区是研究水土流失形成与变化的基本单元，径流小区监测设施包括径流、泥沙和降水观测设施，其中含沙量是径流小区泥沙观测中的重要指标，快速准确地测量径流小区坡面径流的泥沙含量直接决定了水土流失研究的科学性与土壤侵蚀预报的可靠性[14]。插钎法是根据不同水土流失强度、施工进度等因素在不同区域布设测钎监测点，以钎杆到土体表面或坡面的高度量化水土流失程度[15]。针对本文依托的黄河流域中原段地区 A、B 两条线路的车辆段区域水土保持监测研究，采用径流小区监测法和插钎法作为主要监测方法。

### 2.2.1. 径流小区监测法

在车辆段区域选取若干适当坡面，布设径流小区，尺寸为 1 m×3 m，四周用 1 mm 厚钢板围合(插入地下 0.15 m，地上露出 0.15 m)。在小区底部放置集流槽，与小区等宽，底面紧贴地面，紧靠小区底端；然后，在集流槽下方出口挖一个直径与小区等宽、深 0.5 m 的圆坑，用以放置收集泥沙样品的径流储存容器，效果图如图 3。

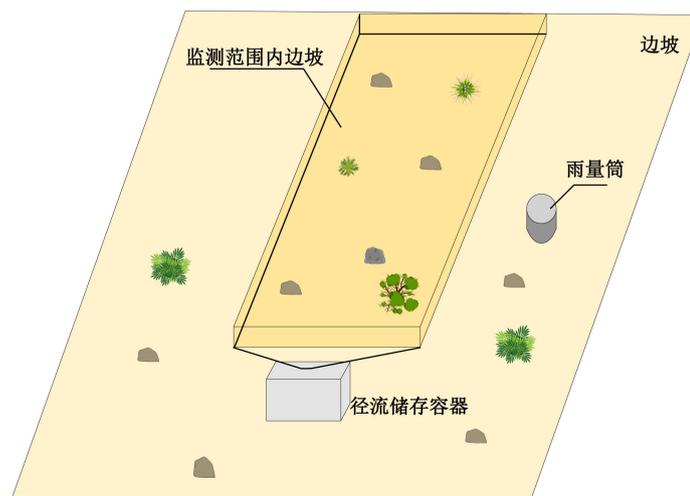


Figure 1. Runoff plot monitoring method  
图 1. 径流小区监测法

在径流小区周围放置雨量筒用于获取该区域内某时段有效和高精度的降雨信息待次降雨结束后，收集集流桶中侵蚀泥沙，随后带回实验室，采用烘干法烘干称重，获取侵蚀泥沙量，并做记录。选取 A 号线 A 车辆段带有植被的三处平地布置径流小区并标号 1~3 号，B 号线 B 车辆段带有裸露土层的三面边坡上布置径流小区并标号①~③号，如图 2、图 3 所示，实际布置的径流小区尺寸为 1 m×2 m，将 5L 容量的量筒用作径流储存容器，分别收集该径流小区范围内土壤流失的雨水泥沙混合物，径流小区信息见表 1 [16]。



Figure 2. Runoff plot in vehicle section A  
图 2. A 车辆段径流小区



Figure 3. Runoff plot in vehicle section B  
图 3. B 车辆段径流小区

Table 1. Runoff area information  
表 1. 径流小区信息

编号	位置	小区面积/m <sup>2</sup>	坡度/(°)	土壤类型	土层厚度/mm	植被覆盖率/%
1	A 车辆段	2.95	13	褐土	240	10
2	A 车辆段	2.96	10	褐土	237	40
3	A 车辆段	2.98	11	褐土	242	20
①	B 车辆段	3.12	34	潮土	217	5
②	B 车辆段	3.03	35	潮土	220	5
③	B 车辆段	3.06	35	潮土	221	4

### 2.2.2. 插钎法

在车辆段区域内草地坡面布设插钎点位。选用直径 0.5 至 1 cm 范围均可，长度为 35 cm 钢钎拆入土中，并在钢钎与地表接触处做上标记，周围应贴上“水土保持，请勿动”等相关标语。为了保证实验数据的可信度，在 A 车辆段与 B 车辆段区域内分别布设 20 个插钎点位。待每场降雨结束后，观测土层对应测钎刻度值的变化，以此来反映车辆段土壤流失情况，插钎法如图 4、图 5 所示。

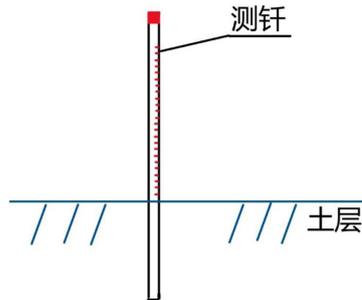


Figure 4. Insertion method

图 4. 插钎法



Figure 5. Brazing in vehicle section A

图 5. A 车辆段测钎

## 3. 监测结果

### 3.1. 降雨量

具体到 9 月份，根据气象局公开的降雨数据，该地共有四次降雨记录，平均降雨量 110 mm，较多年均值 71 mm 偏多，结合气象局数据与径流小区雨量筒实测数据，2023 年 9 月份此地区 A 号线 A 车辆段区域与 B 号线 B 车辆段区域降雨信息见表 2。

Table 2. Rainfall information of vehicle sections in September

表 2. 9 月份车辆段降雨信息

时间	场次	地点	1~3 号 24 小时降雨量/mm			降雨等级
2023.9.10	1	B 车辆段	7.6	7.0	7.2	小雨
		A 车辆段	4.0	4.2	4.0	小雨

续表

2023.9.13	2	B 车辆段	2.0	1.8	2.4	小雨
		A 车辆段	7.6	7.0	7.2	小雨
2023.9.20	3	B 车辆段	47.0	48.0	47.2	大雨
		A 车辆段	76.0	76.6	76.2	暴雨
2023.9.26	4	B 车辆段	24.0	23.4	23.6	中雨
		A 车辆段	18.8	20.0	19.0	中雨

A 车辆段土质多为褐土，具有粘粒含量高、质地较紧、蓄水能力差等特性，相对容易发生水土流失，但 A 车辆段径流小区坡度较小，且部分植物根系对土壤有加固作用，所以通常情况下强度较小的小雨和中雨不会造成显著的水土流失现象；相比之下 B 车辆段土质多为含有大量粘粒的潮土，由于其结构紧密，水分不易渗透，容易导致水分在土壤表面聚集，形成径流，并且 B 车辆段径流小区的边坡坡度较大，缺少植物根系的加固作用，在持续且强烈的降雨作用下，径流小区内的土壤遭受雨水渗透与侵蚀，进而催生出坡面径流。随着降雨强度的提升，即单位时间降雨量的增加，降雨对土壤的侵蚀力显著增强，有可能引发地面径流与土壤内部产流并存的情况，造成显著的水土流失现象[17]。

### 3.2. 车辆段水土流失监测结果

#### 3.2.1. 径流小区产沙量特征

从每次开始降雨时计时，24 小时内降雨停止并再无新的雨量增加，记录为一次完整次降雨。待次降雨结束后，及时收集 A 车辆段和 B 车辆段径流小区内的雨量筒，静置于实验室超过 24 小时后，倒掉上清液，将剩余的水样和泥沙倒入铝盆中进行烘干操作，烘干温度为 105°，烘干时间为 10 小时，最后称量并记录，样品如图 6、图 7 所示，产沙量监测记录见表 3。



Figure 6. Sample in vehicle section B runoff plots  
图 6. B 车辆段径流小区泥沙样本



**Figure 7.** Sample in vehicle section A runoff plots  
**图 7.** A 车辆段径流小区泥沙样本

**Table 3.** Record of sand production in runoff plots

**表 3.** 径流小区产沙量记录

日期	降雨量/mm	径流小区	水样体积/ml	盒重/g	盒 + 干土重/g	泥沙重/g
9月10日	7.6	B-1	1000	52.20	60.26	8.06
	7	B-2	950	55.27	63.44	8.17
	7.2	B-3	750	52.36	59.79	7.43
	4	A-1	460	52.93	53.04	0.11
	4.2	A-2	500	56.47	57.08	0.61
	4	A-3	300	52.49	52.78	0.29
9月13日	2	B-1	200	52.38	55	2.62
	1.8	B-2	200	55.60	58.02	2.42
	2.4	B-3	200	52.17	54.5	2.33
	7.6	A-1	800	53.02	53.5	0.48
	7	A-2	800	56.49	56.6	0.11
	7.2	A-3	800	52.51	52.6	0.09
9月20日	47	B-1	2500+	52.4	110.56	58.16
	48	B-2	2500+	55.38	110.58	55.2
	47.2	B-3	2500+	52.41	108.94	56.53
	76	A-1	2500+	53.12	60.31	7.19
	76.6	A-2	2500+	56.5	70.85	14.35
	76.2	A-3	2500+	52.77	63.11	10.34
9月26日	24	B-1	2500+	52.5	76.44	23.94
	23.4	B-2	2500+	55.5	98.23	42.73
	23.6	B-3	2500+	52.5	71.51	19.01
	18.8	A-1	1900	53.5	55.41	1.91
	20	A-2	2000	56.5	62.12	5.62
	19	A-3	1600	53	55.21	2.21

上表记录了两个不同车辆段共六组径流小区在四次降雨条件下的产沙量情况。试验数据包括降雨量、水样体积、泥沙重等多个参数。随着降雨量的增加，部分径流小区的泥沙重也相应增加，表明降雨量是影响产沙量的重要因素之一。B-1 径流小区，当降雨量从 7.2 毫米增加到 47 毫米时，泥沙重显著增加。并非所有小区的产沙量都严格遵循这一趋势。A-2 径流小区在降雨量从 7.4 毫米增加到 18.5 毫米时，泥沙重的增加并不明显，这反映了不同径流小区地质条件、植被覆盖率、边坡坡度等条件的差异对产沙量的影响；部分小区在不同日期的产沙量表现出相对稳定的趋势，如 A-3 小区在多次观测中泥沙重均较低，这表明该小区可能具有较好的水土保持能力。

### 3.2.2. 插钎坡面土层特征

以 2023 年 9 月至 2024 年 2 月为监测时段，以 9 月 2 日在 A 车辆段和 B 车辆段选择的监测坡面上布设的各 20 根测钎和土壤表面对应的刻度为初始参考值，之后每月初对两车辆段测钎处土壤表面对应的刻度进行重新测量并记录数据，与初始参考值进行比对，用地表土壤降低的高度量化土壤流失程度。A 车辆段监测数据见表 4。

**Table 4.** Brazing in vehicle section A monitoring table

**表 4.** A 车辆段测钎监测表

钎号	9月2日	10月1日	11月2日	12月1日	1月3日	2月1日
1	10	9.7	9.6	9.5	9.5	9.5
2	9.8	9.6	9.5	9.4	9.3	9.2
3	10	9.7	9.6	9.6	9.5	9.5
4	10.4	10.3	10.2	10.1	10	9.8
5	11.1	10.8	10.7	10.7	10.6	10.6
6	10.7	10.4	10.3	10.2	10.1	10.1
7	10.8	10.8	10.4	10.3	10.2	10.1
8	10.1	9.8	9.7	9.7	9.6	9.5
9	9.7	9.5	9.4	9.3	9.2	9.3
10	10.2	10.1	10	9.8	9.7	9.8
11	11.2	11	10.9	10.8	10.8	10.6
12	10.8	10.6	10.5	10.4	10.3	10.2
13	10.4	10.1	10	9.8	9.7	9.7
14	11.2	10.9	10.7	10.6	10.5	10.4
15	10.3	10	9.8	9.8	9.7	9.6
16	10	9.8	9.7	9.6	9.5	9.4
17	10.3	10.1	9.9	9.9	9.8	9.6
18	10	9.8	9.6	9.6	9.4	9.5
19	10.2	9.8	9.7	9.5	9.3	9.3
20	10.4	10.1	10	9.8	9.7	9.6

土层对应的刻度在不同日期之间有所波动，整体上呈现出不太明显的下降趋势。这可能表明在这段时间内，土层高度变化较为稳定。依据前文中降雨量，得钎长的减少量与降雨量成正比，初步判断土层最低刻度存在季节性变化。虽然这些数据与表格中的刻度数据在时间上有所对应，但直接的因果关系可能并不明确，降雨量的变化可能会影响土壤湿度、植被覆盖率等因素，进而间接影响土层对应刻度的测量值。为了深入探讨降雨量与土层高度变化之间的关系，可能需要进一步数据分析。

## 4. 回归分析

回归分析是研究一个随机变量  $Y$  (因变量)对另一个( $X$ )或一组( $X_1, X_2, \dots, X_k$ )变量(自变量)的相依关系的统计分析方法。按变量数量可分为一元回归分析和多元回归分析。一元回归分析涉及一个自变量和一个因变量，而多元回归分析则涉及两个或两个以上的自变量。按关系类型：可分为线性回归分析和非线性回归分析。线性回归分析假设自变量和因变量之间存在线性关系，即可以用一条直线来近似表示它们之间的关系；而非线性回归分析则不局限于线性关系，可以处理更复杂的关系。

### 4.1. 插钎法回归分析

A 和 B 车辆段水土保持插钎法监测得到的数据如图 8、图 9 所示，两个车辆段布设测钎的土壤表面所对应的刻度在随着时间不断下降。

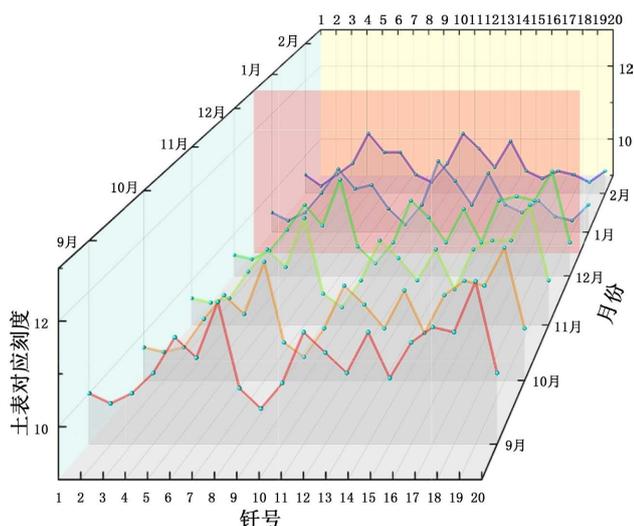


Figure 8. Brazing in vehicle section A monitoring chart

图 8. A 车辆段钎长监测图

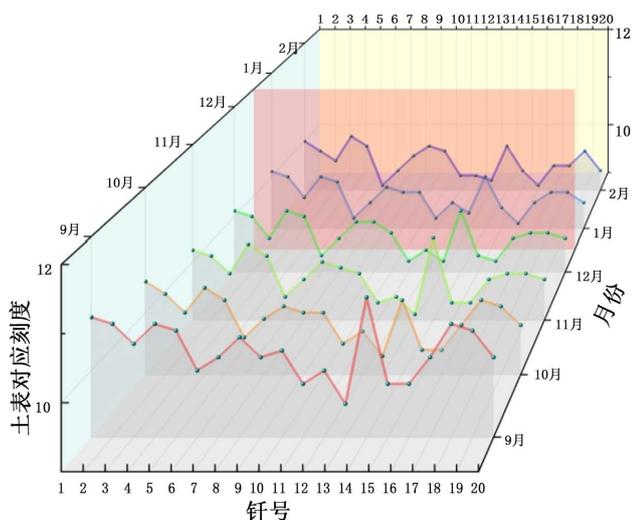


Figure 9. Brazing in vehicle section B monitoring chart

图 9. B 车辆段钎长监测图

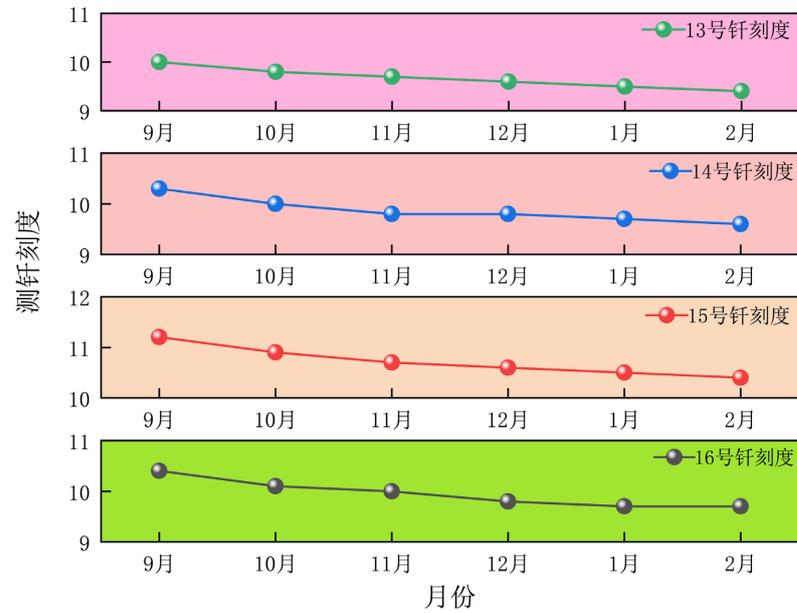


Figure 10. Brazing 13~16 in vehicle section A monitoring chart

图 10. A 车辆段 13~16 号钎监测图

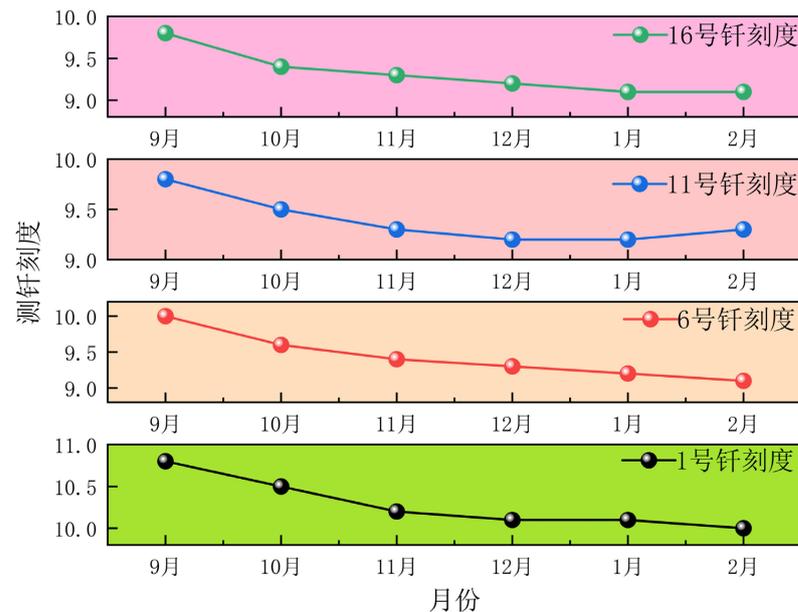
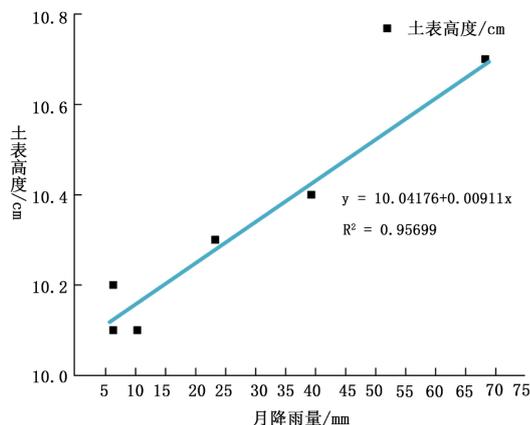


Figure 11. Sample brazing in vehicle section B monitoring chart

图 11. B 车辆段抽样钎监测图

为研究测钎土壤表面对应刻度的变化趋势与降雨量的关系，通过整群取样的方式取 A 车辆段 13~16 号测钎为研究对象，其监测时间内的测钎刻度值变化趋势如图 10 所示。通过系统取样的方式，以四个样本为间隔，分别取 1 号、6 号、11 号、16 号测钎为研究对象，其监测时间内的测钎刻度值变化趋势如图 11 所示。两组样本数据都在 9~10 月有明显的下降趋势，剩余月份下降趋势趋于稳定，与监测时间段当地降雨量趋势相符，为进一步确定土表高度与降雨量之间关系的显著性，利用 IBM SPSS Statistics 27、Origin 2024 对二者进行回归分析，结果如图 12 所示。



**Figure 12.** Relationship between soil surface height and monthly rainfall  
**图 12.** 土表高度与月降雨量的关系

经过分析可知插钎法中土体表面对应刻度与月降雨量呈线性正相关，测钎尾部对应的土体表面高度随着月降雨量的增大而增大，回归方程为  $y = 10.04176 + 0.00911x$ ，调整后的  $R^2$  为  $0.956 > 0.5$  且接近于 1，拟合效果良好，显著性 Sig 为  $0.0007 < 0.001$ ，回归检验显著，模型合理有效。

回归分析得到的数据表明降雨量直接影响土表的高度变化，但降雨量的变化也可能会影响土壤湿度、植被覆盖率等因素，进而间接影响水土流失量。为了深入探讨水土流失量于其他影响因素之间的关系，对径流小区监测结果进行多元逐步回归分析[18]。

#### 4.2. 径流小区多元逐步回归分析

研究两个或两个以上自变量对一个因变量的数量变化关系，称为多元线性回归分析，表现这一数量关系的数学公式，称为多元线性回归模型。其中多元逐步回归分析与传统的多元线性回归分析不同，逐步回归分析通过一系列自动化的步骤来选择对模型有显著贡献的自变量，从而构建一个更加简洁且预测能力强的模型。

从前文得知，在测钎法监测中，测钎底部对应的土壤表层高度与月降雨量呈线性正相关，从而得出水土流失程度与降雨量的关系，但对于径流小区，存在一些其他因素如边坡的坡度、监测范围内的植物覆盖率等因素都可能对产沙量造成一定的影响，为探究径流小区产沙量与哪些因素相关，确定相关回归方程，本文利用多元逐步回归方法将四种指标：降雨量  $X_1$ 、植被覆盖率  $X_2$ 、坡度  $X_3$ 、土壤厚度  $X_4$ ，与自变量产沙量  $Y$  进行回归分析，确定最优模型并建立方程。

逐步回归分析方法的基本思路是将自变量逐个引入，引入的条件是其偏回归平方和经检验后是显著的。将降雨量  $X_1$ 、植被覆盖率  $X_2$ 、坡度  $X_3$ 、土壤厚度  $X_4$  依次引入，每引入一个新的自变量后，要对旧的自变量逐个检验，剔除偏回归平方和不显著的自变量。这样一直边引入边剔除，直到既无新变量引入也无旧变量删除为止，步步步骤如表 5。

**Table 5.** Steps for entering and removing variable a

**表 5.** 输入与除去变量 a 的步步步骤

模型	输入的变量	除去的变量	方法
1	土壤厚度	/	步进(条件: 要输入的 F 的概率 $\leq 0.050$ , 要除去的 F 的概率 $\geq 0.100$ )
2	降雨量	/	步进(条件: 要输入的 F 的概率 $\leq 0.050$ , 要除去的 F 的概率 $\geq 0.100$ )

因变量：产沙量。

表中无除去的变量，说明坡度、降雨量两种指标均对产沙量影响显著，所以无除去变量。模型 1 输入了变量“土壤厚度”，说明“土壤厚度”相较于其他三个影响因素来说对自变量影响效果最大，优先选用。

经 IBM SPSS Statistics 27 软件逐步回归线性分析后的两种模型结果如表 6，R 值为相关系数，其绝对值越接近于 1 表明变量之间越有相关关系，接近于 0 表明变量之间几乎没有相关关系； $R^2$  用于评估模型对数据的拟合程度，其取值范围在 0 到 1 之间， $R^2$  越接近 1，说明模型拟合得越好，能够解释的变异越多，然而，需要注意的是， $R^2$  高并不一定意味着模型就是好的；调整后的  $R^2$  考虑了模型中自变量的数量，有助于比较不同复杂度的模型。当添加自变量导致  $R^2$  显著增加，但调整后的  $R^2$  增加不多时，可能意味着新添加的自变量对模型没有实质性贡献，或者模型存在过拟合现象；标准估算的误差是估计量的标准偏差，用于衡量估计量的精确程度。在回归分析中，较小的标准估算误差意味着估计值更接近于真实值 [19]。

**Table 6.** Summary of models  
**表 6.** 模型摘要

模型	R	$R^2$	调整后的 $R^2$	标准估算的误差
1	0.536a	0.287	0.255	16.55679
2	0.766b	0.587	0.548	12.89629

(a) 预测变量：(常量)，土壤厚度；(b) 预测变量：(常量)，土壤厚度，降雨量。

输入第二个变量“降雨量”后，其相关系数(R)、 $R^2$  以及调整后的  $R^2$  均增大，标准估算的误差减小，说明模型 2 相较于模型 1 为更优的回归模型。

**Table 7.** Analysis of variances  
**表 7.** 变异数分析

模型		平方和	自由度 df	均方	F	显著性 Sig.
1	回归	2430.235	1	2430.235	8.865	0.007b
	残差	6030.800	22	274.127		
	总计	8461.035	23			
2	回归	4968.435	2	2484.218	14.937	<0.001c
	残差	3492.599	21	166.314		
	总计	8461.035	23			

因变量：产沙量；预测变量：(常量)，土壤厚度；预测变量：(常量)，土壤厚度，降雨量。

如表 7 所示，在多元逐步回归过程中，输入两次变量后的两个模型的回归关系显著性检验的变异数分析结果。可以看出模型 1 中，当“土壤厚度”被输入到回归方程后， $F = 8.865$ ，显著性  $\text{Sig} < 0.01$ ，说明模型的回归关系检验具有很高的显著性；在模型 2 中，当“土壤厚度”、“降雨量”被输入到回归方程后， $F = 14.937$ ，显著性  $\text{Sig} < 0.001$ ，说明模型不同处理组之间的均值差异较大，回归关系检验具有极高的显著性。

如表 8 所示，土壤厚度与降雨量均是影响水土流失的关键因素，其中土壤厚度呈显著负相关( $B = -1.107$ )，而降雨量呈显著正相关( $B = 0.426$ )，且模型 2 的显著性极高( $p < 0.001$ )，能够更全面地解释流失规律。

**Table 8.** Regression coefficients and t-test a  
**表 8.** 回归系数及 t 检验 a

模型		未标准化系数		标准化系数 Beta		
		B	标准错误		t	显著性 Sig
1	(常量)	237.092	75.088	-0.536	3.158	0.005
	土壤厚度	-0.973	0.327		-2.977	0.007
2	(常量)	257.729	58.725		4.389	<0.001
	土壤厚度	-1.107	0.257	-0.609	-4.308	<0.001
	降雨量	0.426	0.109	0.553	3.907	<0.001

a. 因变量：产沙量。

**Table 9.** Excluded variables  
**表 9.** 排除的变量

模型		输入 Beta	t	显著性 Sig	偏相关	共线性统计容差
1	降雨量	0.553b	3.907	<0.001	0.649	0.982
	植被覆盖率	-0.029b	-0.121	0.905	-0.026	0.589
	坡度	0.267b	0.340	0.737	0.074	0.055
2	植被覆盖率	-0.045c	-0.239	0.814	-0.053	0.589
	坡度	0.333c	0.547	0.591	0.121	0.055

a. 因变量：产沙量；b. 模型中的预测变量：(常量)，土壤厚度；c. 模型中的预测变量：(常量)，土壤厚度，降雨量。

如表 9 所示，“坡度”、“植被覆盖率”的显著性 Sig 均大于 0.05，不具备统计学意义，对自变量产沙量的影响不显著，故将变量排除。在检验模型显著程度和除去了不重要变量后，模型 2 即为最优回归模型，其方程为：

$$y = 257.729 - 1.107x_4 + 0.426x_1$$

式中：y 为产沙量(g)， $x_4$  为土壤厚度(mm)， $x_1$  为降雨量(mm)。

该回归方程表明车辆段边坡径流小区的产沙量与土壤厚度和当地降雨量有着密切的关系，由回归关系系数可知，自变量中对影响产沙量的大小顺序为降雨量  $x_1 >$  土壤厚度  $x_4$ ，植被覆盖率  $x_2$ 、坡度  $x_3$  对产沙量有一定影响，但在此模型中影响不显著。

## 5. 结论与建议

通过对黄河流域中原段地区轨道交通 A 号线 A 车辆段与 B 号线 B 车辆段建设范围内的土地进行水土保持监测，利用插钎法和径流小区监测法获取道路周边土地表面高度的月变化量以及边坡面土壤在次降雨后的泥沙流失量，通过 SPSS 线性回归分析发现土体表面高度与月降雨量呈线性正相关，随着月降雨量的增加，裸露在土壤外的测钎长度增加，水土流失量增加，土层厚度下降。通过 SPSS 多元逐步回归分析建立了预测车辆段径流小区产沙量的最优回归模型，分析了可能影响产沙量的四种指标：降雨量、

坡度、植被覆盖率、土壤厚度，在除去坡度、植被覆盖率两个对产沙量影响不显著的不重要变量后，建立了最优回归方程，得出了影响车辆段径流小区产沙量的主要因素为降雨量与土壤厚度，且对自变量影响大小顺序为降雨量  $x_1$  > 土壤厚度  $x_4$  的结论。

基于上述对地铁建设项目车辆段建设范围内土地水土保持监测结果与 SPSS 分析结论，对地铁建设水土保持工作提出以下几点建议：

1、鉴于降雨量是影响水土流失和产沙量的最主要因素，在预测到较大降雨前，提前做好防护措施，如增加临时覆盖、设置拦沙坝或沉淀池等，以减少降雨对裸露地表的土壤流失。

2、针对土壤厚度减少的问题，应采取有效措施增加土层厚度或保护现有土壤。在施工过程中，尽量避免过度开挖，合理规划土方调配，减少不必要的土壤裸露。同时，采用植被恢复、种植草皮或铺设生态垫等措施，提高土壤抗蚀能力。

3、实施分级防护措施根据坡度、土壤厚度等条件，对施工区域进行分级管理，对于坡度大、土壤薄弱的区域，应加强工程防护措施，如设置护坡、挡土墙等；而在坡度较缓、土壤条件较好的区域，则可通过增加植被覆盖来实现自然防护。

## 参考文献

- [1] 何江湖, 张科利. 西南喀斯特地区地下水土流失研究综述[J]. 泥沙研究, 2022, 47(5): 66-73.
- [2] 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013(10): 2-3, 11.
- [3] 陈群香. 中国水土保持生态环境建设现状与社会经济可持续发展对策[J]. 水土保持通报, 2000(3): 1-4, 34.
- [4] 2023年中国内地城轨交通线路概况[J]. 城市轨道交通, 2024(1): 8-9.
- [5] 顾雅丽. 某交通工程水土流失分析与预测[J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(8): 38-39.
- [6] Chen, H., Li, H., Wang, Y. and Cheng, B. (2020) A Comprehensive Assessment Approach for Water-Soil Environmental Risk during Railway Construction in Ecological Fragile Region Based on AHP and Mea. *Sustainability*, **12**, Article 7910. <https://doi.org/10.3390/su12197910>
- [7] Tang, H., Shi, P. and Fu, X. (2023) An Analysis of Soil Erosion on Construction Sites in Megacities Using Analytic Hierarchy Process. *Sustainability*, **15**, Article 1325. <https://doi.org/10.3390/su15021325>
- [8] Nogueira, K., Machado, G.L.S., Gama, P.H.T., da Silva, C.C.V., Balaniuk, R. and dos Santos, J.A. (2020) Facing Erosion Identification in Railway Lines Using Pixel-Wise Deep-Based Approaches. *Remote Sensing*, **12**, Article 739. <https://doi.org/10.3390/rs12040739>
- [9] 储召蒙. 深圳地铁8号线一期工程中水土流失危害及防治对策[J]. 水资源开发与管理, 2018(1): 39-41.
- [10] 姜云保, 刘勇, 许健, 等. 南昌地铁4号线一期工程水土流失特征研究[J]. 中国水土保持, 2023(9): 70-72.
- [11] 焦莹, 马士龙. 城市水土流失与水土保持措施探究——以天津地铁11号线车辆段为例[C]//中国水利学会城市水利专业委员会, 《中国防汛抗旱》杂志社, 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心. 第六届城市水安全与水管理学术研讨会论文集. 海口: 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 2023: 56-59.
- [12] 谢周龙, 莫明浩, 沈发兴, 等. 水土保持生态要素多尺度监测指标研究综述[J]. 江西水利科技, 2024, 50(3): 212-217.
- [13] 黄励南. 结合无人机图像监测的水土保持工程监测方法设计[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(10): 72-76, 106.
- [14] 刘恋, 谈晓珊, 郝斌, 等. 坡面径流小区含沙量监测方法论述[J]. 科技与创新, 2023(19): 61-63.
- [15] 庞志冲. 测钎法在水土保持监测中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(10): 9-10.
- [16] 朱小辉, 陈拓嘉. 基于回归分析的径流小区产流产沙量与降雨强度关系研究分析[J]. 陕西水利, 2024(5): 118-120.
- [17] 司英凡, 俞琳琳, 朱家润. 不同水土保持措施下径流小区产流产沙与降雨关系研究[J]. 中国水土保持, 2023(11): 39-42.
- [18] 贺军, 刘卫敏, 南宏伟, 等. 基于小区观测的坡改梯工程水保效应机理研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 32-43.
- [19] 梁万鹏, 窦晓利, 韩庆辉, 等. 燕麦农艺性状与产量多元回归分析[J]. 中国牛业科学, 2023, 49(5): 12-17.