

# 成都市温江区两种绿地土壤抗蚀抗冲性及其影响因素

史小鹏<sup>1</sup>, 苟贺然<sup>1</sup>, 何淑勤<sup>1,2,3</sup>, 刘柏廷<sup>1</sup>,  
冉兰芳<sup>1</sup>, 杨琪琳<sup>1</sup>, 扎西拉姆<sup>1</sup>, 陈雨馨<sup>1</sup>, 骆紫藤<sup>1,2,3</sup>

(1.四川农业大学 林学院, 四川 成都 611130; 2.长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 四川 成都 611130; 3.四川农业大学 水土保持与荒漠化防治重点实验室, 四川 成都 611130)

**摘要:** [目的] 探究成都市温江区道路绿地和校园绿地土壤抗蚀、抗冲特征及其影响因素, 为城市绿地水土保持和生态可持续发展提供理论支持。[方法] 采用野外取样与室内试验相结合的方法, 对道路和校园绿地中乔木+草地、乔木+灌木、灌木+草地、草地开展土壤抗蚀抗冲性特征研究。[结果] >5 mm土壤水稳性团聚体含量在道路(79.72%)和校园绿地(39.23%)均表现为最大。土壤总孔隙度、土壤含水量和土壤粉粒含量均表现为: 校园绿地>道路绿地( $p<0.05$ )。土壤平均重量直径(MWD), 土壤几何平均直径(GMD)、土壤抗蚀性指数、水稳性指数和抗冲指数均表现为: 道路绿地>校园绿地( $p<0.05$ ), 其中乔木+灌木和灌木+草地结构土壤抗蚀抗冲性优于其他植被结构, 土壤抗冲系数均随坡度增大而减小。土壤抗蚀、抗冲性指数与>5 mm土壤水稳性团聚体、有机质含量和土壤黏粒均呈极显著正相关; 与土壤团聚体破坏率(PAD), 不稳定团粒指数(ELT)、<0.25 mm, 0.25~2 mm水稳性团聚体呈极显著负相关( $p<0.01$ )。[结论] 道路绿地乔木+灌木和灌木+草地结构土壤抗蚀抗冲性最好, 校园绿地可以通过调整植被结构增强抗逆性和观赏性, 降低土壤侵蚀风险。

**关键词:** 城市绿地; 理化性质; 土壤抗蚀性; 土壤抗冲性; 植被性状

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)04-0117-09

**中图分类号:** S714.7, S157

**文献参数:** 史小鹏, 苟贺然, 何淑勤, 等. 成都市温江区两种绿地土壤抗蚀抗冲性及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 117-125. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.012; Shi Xiaopeng, Gou Heran, He Shuqin, et al. Soil anti-erosion and anti-scouring effects of two types of urban green spaces and factors influencing them in Wenjiang District, Chengdu City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 117-125.

## Soil Anti-Erosion and Anti-Scouring Effects of Two Types of Urban Green Spaces and Factors Influencing Them in Wenjiang District, Chengdu City

Shi Xiaopeng<sup>1</sup>, Gou Heran<sup>1</sup>, He Shuqin<sup>1,2,3</sup>, Liu Baiting<sup>1</sup>,  
Ran Lanfang<sup>1</sup>, Yang Qilin<sup>1</sup>, Tashilhamo<sup>1</sup>, Chen Yuxin<sup>1</sup>, Luo Ziteng<sup>1,2,3</sup>

(1.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu,

Sichuan 611130, China; 2.National Forestry and Grassland Administration

Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper

Reaches of the Yangtze River, Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of the Yangtze

River Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611130, China; 3.Key Lab of Soil and Water

Conservation and Desertification Combating, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China)

**Abstract:** [Objective] The anti-erosion and anti-scouring characteristics and factors influencing road and campus green spaces in Wenjiang District, Chengdu City were analysed in order to provide functional guidance for urban green space soil and water conservation and promote ecologically sustainable development. [Methods] The soil anti-erosion and anti-scouring properties of arbour + grass, arbour + bush, bush, bush

收稿日期: 2023-11-30

修回日期: 2024-03-30

资助项目: 国家级大学生创新训练项目“温江区城市林业土壤可蚀性研究”(202210626059); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1037)

第一作者: 史小鹏(1995—), 男(汉族), 山西省汾阳市人, 博士研究生, 研究方向为森林水文、水土保持。Email: 2022104006@stu.sicau.edu.cn.

通信作者: 何淑勤(1976—), 女(汉族), 陕西省商南县人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。Email: angelhsq@163.com.

+ grass and grass in road and campus green spaces were characterised through field sampling and laboratory tests. [Results] The  $>5$  mm soil water-stable aggregate content was highest in both roads (79.72%) and campus green spaces (39.23%). Total soil porosity, soil water content, and silt content were greater in campus green spaces than road green spaces ( $p < 0.05$ ). Mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), soil anti-erosion, water stability aggregate index, and anti-scouring were all higher in the road green space than in the campus green space ( $p < 0.05$ ). Specifically, the anti-erosion and anti-scouring of arbour + bush and bush + grass structures were better than that of the other vegetation structures, and the soil anti-scouring coefficient decreased with increasing landscape slope. Soil anti-erosion and-scouring were positively correlated with  $> 5$  mm soil water-stable aggregates, organic matter content, and soil clay particles, and negatively correlated with the percentage of aggregate destruction (PAD), unstable aggregate index (ELT) and  $< 0.25$  mm and  $0.25 \sim 2$  mm water-stable aggregates ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] Arbour + bush and bush + grass had the best soil anti anti-erosion and-scouring effects on road green areas. Campus green space can reduce the risk of soil erosion by adjusting the vegetation structure, thereby enhancing the stress resistance and ornamental property.

**Keywords:** urban green spaces; physico-chemical properties; soil anti-erosion; soil anti-scouring; vegetation properties

城市绿地土壤侵蚀是中国城市化进程中所面临的紧迫性问题,严重影响着城市生态环境和经济发展<sup>[1]</sup>。城市绿地土壤性质与自然土壤截然不同,由于各时期园林建设的需求,其成土因素均发生了改变,大部分均为新成土,没有发生诊断层,土壤结构较差,并且土壤表面密闭,加大了地表径流系数<sup>[2]</sup>。近年来,成都市温江区人口密度不断增加、生产建设活动频繁,加之极端降雨的出现<sup>[3-4]</sup>,使得绿地水土流失潜在风险日益突出,而土壤抗侵蚀性可以作为土壤抵抗侵蚀营力的指标,因此研究城市绿地土壤抗侵蚀性特征及其影响因素对筛选城市水土流失强度分级指标,控制土壤侵蚀,寻找合理的绿地植被结构具有重要意义。

土壤在侵蚀动力下抵抗水分散悬浮和机械破坏下移的能力称之为抗侵蚀性<sup>[5]</sup>。城市绿地不同的植被结构对水土流失防治效果不同,研究<sup>[6-7]</sup>表明,灌草结构土壤抗蚀性显著高于其他植被结构,高级植被结构优于低级植被结构;黄土区天然草地、刺槐—油松结构抗冲性较好;也有研究<sup>[8-10]</sup>表明人工林中植被结构的物种丰富度与土壤抗冲性呈显著正相关。部分国家在城市绿地雨水径流调控、土壤特性方面已经进行了大量的研究<sup>[1]</sup>,并采取了相应技术对雨水资源化处理,而中国研究多集中在高原山地<sup>[6-8]</sup>,对城市绿地土壤研究关注较少,缺乏技术应用的基础数据,忽视了对城市绿地水土流失治理。根据中国《城市绿地分类标准(CJJ/T85—2013)》对城市绿地的分类,可以根据其功能分为 5 大类和 11 小类,其中,城市附属绿地是指城市建设中除去“绿地与广场用地”的绿化用地,包含了校园用地、公共用地、商业用地及道路用地等<sup>[2]</sup>。鉴于此,本文选择成都市温江区附属用地类别

中学校园绿地和道路绿地,并以每种绿地内 5 种植被结构(乔木+草地、灌木、草地、乔木+灌木、灌木+草地)为研究对象,通过测定其土壤理化性质、抗冲系数和抗蚀系数等指标,分析 2 种绿地不同植被结构下土壤抗侵蚀特征及其影响因素,以期为城市水土保持规划提供参考,为优化城市绿地植被配置以及评估和构建城市土壤侵蚀模型提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省成都市( $103^{\circ}41'—103^{\circ}55'E$ ,  $30^{\circ}36'—30^{\circ}52'N$ ),属岷江冲积平原,地势平坦,平均海拔高度 540 m,河流均属岷江水系。气候类型为属亚热带湿润气候区,日照偏少,无霜期较长,年均气温  $16.0^{\circ}C$ ,平均降水量 972.5 mm。土壤类型为冲积土和水稻土,主要植被类型为常绿阔叶林。

### 1.2 样地设置及样品采集

在全面踏查的基础上,于 2022 年 9—10 月分别在成都市温江区惠民路四川农业大学校园绿地(C)和成都市温江区公平街道道路绿地(R)中选择分布面积最广、立地条件一致(土壤类型均为水稻土)、结构稳定和长势基本相同,可以反映绿地基本特征的乔木+草地(T-L)、乔木+灌木(T-S)、灌木(S)、灌木+草地(S-L)和草地(L)植被结构作为试验样地,在每个样地内随机布设 3 个样方,其中草地样方面积为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,灌木样方为  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ ,乔木样方为  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ ,不同样方之间至少间隔 10 m。在每个样方中根据五点采样法采集土壤表层(0—20 cm)混合土和原状土各 2 kg,用于测定土壤团聚体、机械组成和有机质,用环刀( $100\text{ cm}^3$ )采集土壤样品测定土壤容

重及孔隙度,同时采用自制取土器(10 cm×10 cm×8 cm)取原状土样用于测定土壤抗冲性,每个样点的土壤样品均为 3 个重复。同时记录各样地内优势种并测定植被覆盖度<sup>[10]</sup>,各样地信息详见表 1。

### 1.3 土壤理化性质测定

土壤容重和孔隙度采用环刀法测定<sup>[6]</sup>;土壤含水

量采用烘干法测定<sup>[6]</sup>;土壤有机质含量采用重铬酸钾加热法测定<sup>[6]</sup>;土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定<sup>[6]</sup>;土壤机械组成采用激光粒度仪(Mastersizer 3000)测定,按粒径分为砂粒(2~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)<sup>[7-8]</sup>。各指标土壤样品测定均设置 3 个重复,且以空白作对照。

表 1 研究样地基本信息  
Table 1 Basic information of study sample sites

样地	绿地类型	植被结构类型	样地编号	优势种	植被覆盖度/%
校园绿地	城市附属绿地	乔木+草地	C-T-L	榕树、结缕草	72.0
		灌木	C-S	檫木、女贞	68.4
		草地	C-L	地毯草	83.5
		乔木+灌木	C-T-S	南天竹、金边黄杨	75.3
		灌木+草地	C-S-L	檫木、地毯草	85.6
		乔木+草地	R-T-L	木犀、结缕草	61.2
道路绿地	城市附属绿地	灌木	R-S	火棘、女贞	52.3
		草地	R-L	结缕草	89.6
		乔木+灌木	R-T-S	木犀、檫木	57.6
		灌木+草地	R-S-L	火棘、结缕草	64.3

注:榕树(*Ficus microcarpa*)、结缕草(*Zoysia japonica*)、檫木(*Loropetalum chinense*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、地毯草(*Axonopus compressus*)、南天竹(*Nandina domestica*)、金边黄杨(*Podocarpus macrophyllus*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、木犀(*Osmanthus fragrans*)。

### 1.4 土壤抗冲性测定

土壤抗冲性采用原状土冲刷槽法测定<sup>[8]</sup>。冲刷槽长 1.2 m,宽 0.1 m,土样室尺寸为 10 cm×10 cm×8 cm。根据研究区地貌及降雨特征,本试验坡度设置为 5°和 10°;冲刷流量为 3 L/min。前 3 min 每 1 min 收集 1 次泥沙样,之后每 3 min 收集 1 次,冲刷历时为 30 min,共接样 12 次。测定其流量(L)、含沙量(g/L)、冲失干土重(g)和抗冲指数(ANS)<sup>[8]</sup>。计算公式为:

$$ANS = \frac{q \cdot t}{M} \quad (1)$$

式中: $q$  为流量(L/min); $t$  为冲刷历时(min); $M$  为冲失干土重(g)。

### 1.5 土壤抗蚀性测定

土壤抗蚀性采用静水崩解法<sup>[11]</sup>,测定指标及计算方法为:

(1) 平均质量直径(MWD):

$$MWD = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{x}_i \omega_i}{\omega_i} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_i$  为第  $i$  级团聚体的平均直径(mm); $\omega_i, \omega_i$  分别为第  $i$  级团聚体的土壤质量和供试土壤的总质量(mg)。

(2) 结构破坏率(PAD):

$$PAD = (W_d - W_w) \times 100\% / W_d \quad (3)$$

式中: $W_d$  为 >0.25mm 机械团聚体百分比含量(%); $W_w$  为 >0.25mm 水稳性团聚体百分比含量(%)。

(3) 几何平均直径(GMD):

$$GMD = \exp[\sum \log \bar{x}_i \omega_i / m] \quad (4)$$

(4) 土壤不稳定团粒指数(ELT):

$$ELT = \frac{M_T - W_w}{M_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $M_T$  为供试土壤的总质量(g)。

(5) 水稳性指数( $K$ ):

$$K = \frac{\sum P_i K_i + P_i}{A} \quad (6)$$

式中: $i = 1, 2, 3 \dots 10$ ;  $P_i$  为第  $i$  分钟分散的土粒数量; $P_j$  为 10 min 内未分散的土粒数; $K_i$  为第  $i$  min 校正系数; $A$  为供试土粒总数。

(6) 抗蚀指数( $S$ ):通过在静水中记录每 1 min 崩塌的土粒个数,连续观测 10 min,并计算抗蚀指数  $S$ 。

$$S = \frac{\omega - \bar{\omega}}{\omega} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $S$  为土壤抗蚀指数(%); $\omega$  为土粒总数(个); $\bar{\omega}$  为崩塌土粒数(个)。

### 1.6 数据处理

数据处理采用 Excel 2021,数据统计采用 SPSS 16.0,图形绘制采用 Origin 2021 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质

由表 2 可知,土壤总孔隙度、土壤含水量和土壤粉

粒含量均表现为校园绿地显著大于道路绿地( $p < 0.05$ , 下同),土壤容重则相反。土壤有机质、土壤砂粒和黏粒含量校园绿地和道路绿地均无显著差异。校园绿地中,C-S-L结构的土壤含水量(39.10%)、黏粒含量(14.97%)和有机质含量(74.19 g/kg)显著大于单一植被结构;土壤容重(1.32 g/cm<sup>3</sup>)、砂粒含量则相反

(69.43%)。土壤总孔隙度表现为C-S-L结构(51.37%)显著大于C-L结构(41.94%),与其他3种植被结构均无显著性差异。道路绿地中,R-S-L结构的土壤有机质含量(76.82 g/kg)、总孔隙度(41.83%)、黏粒含量(14.77%)显著大于其他植被结构,土壤容重(1.39 g/kg)和砂粒含量(70%)则显著小于其他植被结构。

表 2 不同植被结构土壤理化性质

Table 2 Physico-chemical properties of soils with different vegetation structures

样地编号	土壤容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	总孔隙度/ %	土壤含水量/ %	土壤质地/%		
					砂粒	黏粒	粉粒
C-T-L	1.51±0.07 <sup>a</sup>	52.61±1.26 <sup>b</sup>	49.66±0.48 <sup>a</sup>	16.89±0.80 <sup>c</sup>	77.87±2.34 <sup>a</sup>	6.20±0.87 <sup>d</sup>	15.93±1.53 <sup>a</sup>
C-S	1.53±0.07 <sup>a</sup>	49.35±5.85 <sup>bc</sup>	50.20±0.61 <sup>a</sup>	28.72±1.17 <sup>b</sup>	74.53±2.34 <sup>ab</sup>	9.26±0.31 <sup>c</sup>	16.20±2.09 <sup>a</sup>
C-L	1.45±0.05 <sup>a</sup>	41.65±5.76 <sup>c</sup>	41.94±1.13 <sup>b</sup>	16.00±1.71 <sup>c</sup>	75.93±2.73 <sup>ab</sup>	10.13±0.83 <sup>c</sup>	13.93±3.52 <sup>d</sup>
C-T-S	1.34±0.02 <sup>b</sup>	74.74±5.94 <sup>a</sup>	50.50±0.80 <sup>a</sup>	32.48±0.40 <sup>b</sup>	72.57±0.21 <sup>bc</sup>	12.90±0.30 <sup>b</sup>	14.53±0.21 <sup>a</sup>
C-S-L	1.32±0.09 <sup>b</sup>	74.19±1.83 <sup>a</sup>	51.37±1.25 <sup>a</sup>	39.10±7.00 <sup>a</sup>	69.43±0.86 <sup>c</sup>	14.97±0.65 <sup>a</sup>	15.60±0.26 <sup>a</sup>
C 均值	1.44±0.10 <sup>B</sup>	58.51±14.52 <sup>A</sup>	52.37±12.54 <sup>A</sup>	30.12±15.14 <sup>A</sup>	74.07±3.42 <sup>A</sup>	10.69±3.18 <sup>A</sup>	15.24±1.88 <sup>A</sup>
R-T-L	1.56±0.08 <sup>ab</sup>	46.37±5.67 <sup>d</sup>	30.65±1.3 <sup>d</sup>	3.73±1.14 <sup>c</sup>	78.10±1.15 <sup>a</sup>	8.80±0.92 <sup>c</sup>	13.10±1.92 <sup>a</sup>
R-S	1.61±0.08 <sup>a</sup>	55.50±0.20 <sup>c</sup>	31.51±3.7 <sup>cd</sup>	10.56±1.39 <sup>b</sup>	75.13±2.35 <sup>ab</sup>	11.93±0.83 <sup>b</sup>	12.93±1.59 <sup>a</sup>
R-L	1.60±0.06 <sup>a</sup>	65.42±2.47 <sup>b</sup>	34.99±0.56 <sup>bc</sup>	16.94±0.37 <sup>a</sup>	77.27±1.45 <sup>a</sup>	10.03±0.45 <sup>c</sup>	12.70±1.82 <sup>a</sup>
R-T-S	1.48±0.06 <sup>bc</sup>	65.37±2.45 <sup>b</sup>	38.28±2.67 <sup>ab</sup>	10.73±0.62 <sup>b</sup>	72.93±0.61 <sup>bc</sup>	13.07±0.12 <sup>b</sup>	14.00±0.60 <sup>a</sup>
R-S-L	1.39±0.06 <sup>c</sup>	76.80±8.50 <sup>a</sup>	41.83±1.45 <sup>a</sup>	12.20±0.32 <sup>b</sup>	70.00±2.00 <sup>c</sup>	14.77±0.85 <sup>a</sup>	15.23±1.15 <sup>a</sup>
R 均值	1.53±0.10 <sup>A</sup>	63.17±12.71 <sup>A</sup>	35.45±4.73 <sup>B</sup>	12.11±4.97 <sup>B</sup>	74.69±3.35 <sup>A</sup>	11.72±2.28 <sup>A</sup>	13.59±1.59 <sup>B</sup>

注:①C-T-L表示校园绿地乔木+草地;C-S表示校园绿地灌木;C-L表示校园绿地草地;C-T-S表示校园绿地乔木+灌木;C-S-L表示校园绿地灌木+草地。②R-T-L表示道路绿地乔木+草地;R-S表示道路绿地灌木;R-L表示道路绿地草地;R-T-S表示道路绿地乔木+灌木;R-S-L表示道路绿地灌木+草地。③不同大写字母表示不同绿地之间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同种绿地不同植被结构土壤之间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

由表3可以看出,2种绿地中>5 mm土壤水稳性团聚体含量均表现为最大,且校园绿地(39.23%)显著小于道路绿地(79.72%),<0.25 mm水稳团聚体含量则为校园绿地(26.87%)显著大于道路绿地(11.31%)。校园绿地中,不同植被结构下>5 mm土壤水稳性团聚体含量均具有显著差异,具体表现为:

C-S>C-S-L>C-T-S>C-T-L>C-L,<0.25 mm水稳性团聚体含量表现为C-L结构(15.30%)显著大于其他植被结构。道路绿地中,>5 mm水稳团聚体含量表现为R-S-L(86.37%)和R-T-S(86.33%)显著大于其他植被结构,<0.25 mm水稳团聚体含量(8.6%,7.9%)则显著小于其他植被结构。

表 3 不同植被结构水稳团聚体组成

Table 3 Composition of water-stable agglomerates in different vegetation structures

样地编号	各粒级水稳团聚体组成/%					
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
C-T-L	21.4±2.25 <sup>d</sup>	3.93±0.31 <sup>ab</sup>	3.17±0.45 <sup>b</sup>	16.17±0.45 <sup>a</sup>	25.83±2.63 <sup>a</sup>	29.50±1.47 <sup>b</sup>
C-S	62.37±2.10 <sup>a</sup>	4.73±0.25 <sup>a</sup>	5.20±0.20 <sup>a</sup>	8.60±0.40 <sup>c</sup>	7.23±0.25 <sup>c</sup>	11.87±2.21 <sup>d</sup>
C-L	3.60±1.25 <sup>e</sup>	3.16±0.65 <sup>b</sup>	3.47±0.31 <sup>b</sup>	9.60±0.66 <sup>c</sup>	26.87±1.70 <sup>a</sup>	53.30±3.40 <sup>a</sup>
C-T-S	52.53±2.35 <sup>c</sup>	4.60±0.60 <sup>a</sup>	5.07±0.31 <sup>a</sup>	11.43±1.59 <sup>b</sup>	11.07±0.31 <sup>b</sup>	15.30±1.13 <sup>d</sup>
C-S-L	56.27±1.10 <sup>b</sup>	3.67±0.31 <sup>b</sup>	3.40±0.40 <sup>b</sup>	4.80±0.30 <sup>d</sup>	7.50±0.36 <sup>e</sup>	24.37±1.00 <sup>c</sup>
C 均值	39.23±23.61 <sup>B</sup>	4.02±0.72 <sup>A</sup>	4.06±1.00 <sup>A</sup>	10.12±3.91 <sup>A</sup>	15.70±9.19 <sup>A</sup>	26.87±12.25 <sup>A</sup>
R-T-L	71.70±1.41 <sup>c</sup>	3.07±0.12 <sup>b</sup>	1.20±0.10 <sup>b</sup>	1.61±0.35 <sup>b</sup>	3.47±0.31 <sup>b</sup>	18.97±0.97 <sup>a</sup>
R-S	71.23±0.25 <sup>c</sup>	4.23±0.25 <sup>a</sup>	3.43±0.40 <sup>a</sup>	3.33±0.12 <sup>a</sup>	7.13±0.12 <sup>a</sup>	10.63±0.38 <sup>b</sup>
R-L	82.97±0.85 <sup>b</sup>	2.40±0.40 <sup>c</sup>	0.73±0.12 <sup>cd</sup>	1.20±0.20 <sup>c</sup>	2.23±0.25 <sup>c</sup>	10.47±1.29 <sup>b</sup>
R-T-S	86.33±0.12 <sup>a</sup>	2.13±0.23 <sup>c</sup>	0.67±0.12 <sup>d</sup>	0.73±0.12 <sup>d</sup>	1.13±0.12 <sup>d</sup>	8.60±0.72 <sup>c</sup>
R-S-L	86.37±0.15 <sup>a</sup>	2.60±0.20 <sup>bc</sup>	1.07±0.12 <sup>bc</sup>	1.07±0.12 <sup>cd</sup>	1.00±0.20 <sup>d</sup>	7.90±0.56 <sup>c</sup>
R 均值	79.72±7.12 <sup>A</sup>	2.89±0.80 <sup>B</sup>	1.42±1.08 <sup>B</sup>	1.59±0.96 <sup>B</sup>	2.99±2.34 <sup>B</sup>	11.31±4.17 <sup>B</sup>

## 2.2 土壤抗蚀性指数

MWD,GMD,土壤抗蚀性指数和水稳性指数均

表现为道路绿地显著大于校园绿地;PAD,ELT除S结构外,其他结构均表现为道路绿地显著小于校园绿

地(表 4)。

校园绿地中,MWD,GMD 均表现为 C-S-L 结构显著大于其他植被结构,PAD,ELT 均表现为 C-S 结构显著小于其他植被结构,土壤抗蚀性指数和水稳性指数均表现为 C-T-S 和 C-S-L 结构显著大于其他植

被结构。道路绿地中,MWD,GMD 均表现为 R-T-L 结构显著小于其他植被结构,PAD,ELT 显著大于其他植被结构,抗蚀性指数和水稳性指数均表现为 R-L,R-T-S 和 R-S-L 结构显著大于 R-T-L 和 R-S 结构。

表 4 不同植被结构土壤抗蚀性评价指标

Table 4 Indicators for evaluation of anti-erosion of different vegetation structure

样地编号	MWD/mm	GMD/mm	PAD/%	ELT/%	土壤抗蚀性指数/%	土壤水稳性指数/%
C-T-L	1.95±0.04 <sup>Bc</sup>	0.81±0.01 <sup>Bb</sup>	26.53±3.14 <sup>Ab</sup>	29.31±3.03 <sup>Ab</sup>	4.00±6.93 <sup>Bb</sup>	25.21±0.11 <sup>Bbc</sup>
C-S	1.61±0.15 <sup>Bd</sup>	0.77±0.03 <sup>Bc</sup>	9.21±1.03 <sup>Ad</sup>	10.02±2.54 <sup>Ad</sup>	14.67±6.11 <sup>Bb</sup>	45.17±11.16 <sup>Bb</sup>
C-L	0.59±0.04 <sup>Bc</sup>	0.57±0.01 <sup>Bd</sup>	55.03±2.01 <sup>Aa</sup>	57.84±2.47 <sup>Aa</sup>	10.67±18.48 <sup>Bb</sup>	17.32±17.41 <sup>Bc</sup>
C-T-S	4.30±0.13 <sup>Bb</sup>	1.30±0.11 <sup>Ba</sup>	17.54±3.21 <sup>Ac</sup>	19.62±4.01 <sup>Ac</sup>	63.33±6.43 <sup>Ba</sup>	83.21±4.23 <sup>Ba</sup>
C-S-L	4.52±0.06 <sup>Ba</sup>	1.32±0.02 <sup>Ba</sup>	24.84±3.06 <sup>Ab</sup>	25.32±3.22 <sup>Ab</sup>	56.00±38.16 <sup>Ba</sup>	79.84±17.41 <sup>Ba</sup>
R-T-L	5.43±0.10 <sup>Ad</sup>	1.55±0.03 <sup>Ad</sup>	14.35±0.56 <sup>Ba</sup>	19.13±5.01 <sup>Ba</sup>	21.33±10.07 <sup>Ab</sup>	36.57±7.22 <sup>Ac</sup>
R-S	5.61±0.02 <sup>Ac</sup>	1.65±0.04 <sup>Ac</sup>	9.21±1.02 <sup>Ab</sup>	10.65±1.05 <sup>Ab</sup>	25.33±22.74 <sup>Ab</sup>	60.86±23.01 <sup>Ab</sup>
R-L	6.39±0.04 <sup>Ab</sup>	1.89±0.04 <sup>Ab</sup>	8.64±1.32 <sup>Bbc</sup>	9.84±3.12 <sup>Bb</sup>	89.33±8.33 <sup>Aa</sup>	93.12±5.24 <sup>Aa</sup>
R-T-S	6.57±0.03 <sup>Aa</sup>	1.96±0.04 <sup>Ab</sup>	6.23±1.41 <sup>Bcd</sup>	8.64±1.23 <sup>Bc</sup>	92.00±4.00 <sup>Aa</sup>	95.38±2.16 <sup>Aa</sup>
R-S-L	6.58±0.05 <sup>Aa</sup>	1.99±0.06 <sup>Aa</sup>	5.74±1.01 <sup>Bc</sup>	7.69±1.35 <sup>Bc</sup>	89.33±6.11 <sup>Aa</sup>	93.21±4.60 <sup>Aa</sup>

注:MWD,GMD,PAD,ELT 分别为土壤平均重量直径、土壤几何平均直径、土壤团聚体结构破坏率和不稳定团粒指数。

### 2.3 土壤抗冲性特征

随冲刷时间延长,道路和城市绿地土壤抗冲指数(ANS)均呈波动上升趋势(图 1),ANS 表现为道路绿地显著大于校园绿地(表 5)。5°条件下,校园绿地中各植被结构 30 min 内上升幅度较小,其中 C-L 结构在 25~30 min 内呈先减小后增大的趋势,道路绿地中各植被结构在 20~25 min 内均达到最大值且呈

稳定趋势;10°条件下,校园绿地中 C-T-L,C-T-S 和 C-L 结构在 30 min 内上升幅度较小,C-S-L 和 C-S 结构分别在 10~15 min 和 15~20 min 内陡增,之后呈波动增加的趋势,道路绿地中各植被结构在 0~15 min 内上升幅度较小,15 min 后均呈陡增趋势。此外,5°和 10°条件下,两种绿地中土壤平均抗冲指数均表现为 S-L 结构显著大于其他植被结构。

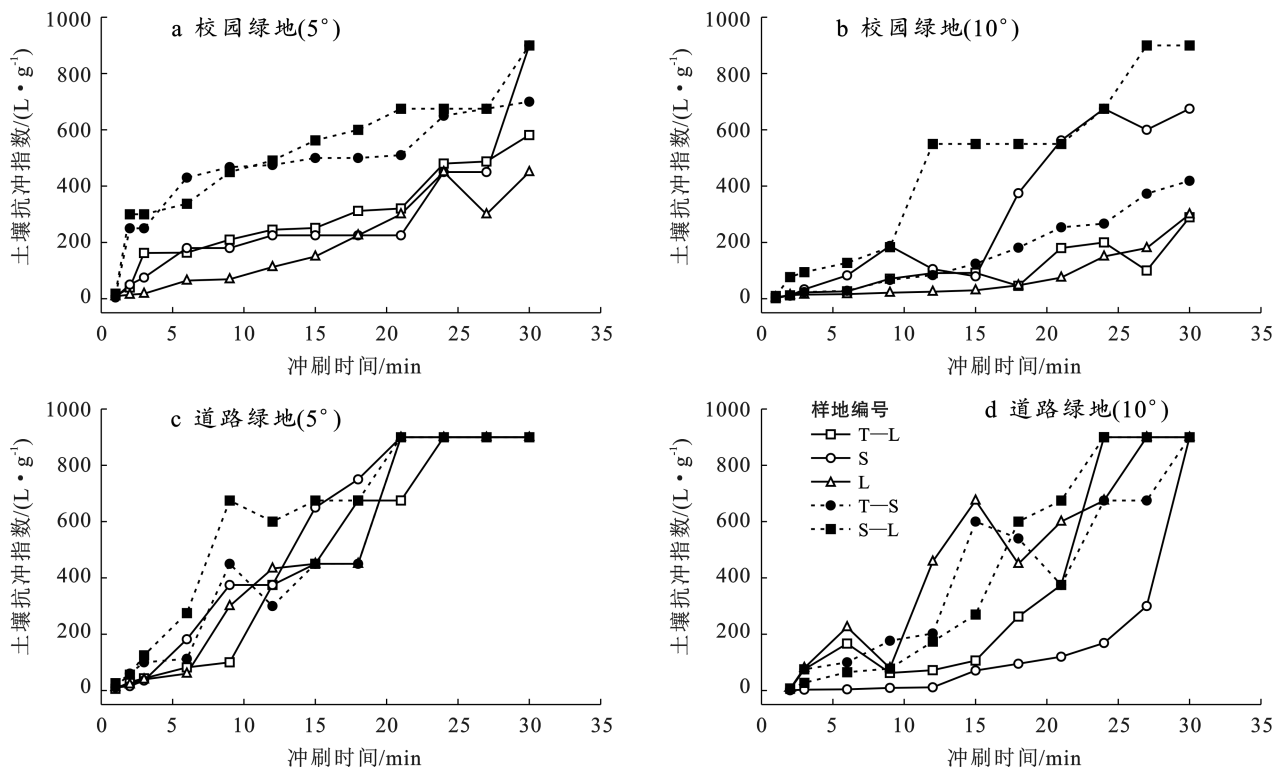


图 1 不同植被结构土壤抗冲性的变化

Fig.1 Changes of soil anti-scourability of different vegetation structures

表 5 不同植被结构土壤抗冲系数

Table 5 Coefficients of soil anti-scouring for different vegetation structures

样地编号	坡度条件	
	5°	10°
C-T-L	45.35±12.05 <sup>c</sup>	13.06±3.96 <sup>d</sup>
C-S	71.67±4.16 <sup>c</sup>	48.01±5.71 <sup>b</sup>
C-L	127.57±5.46 <sup>b</sup>	23.83±1.33 <sup>c</sup>
C-T-S	205.44±16.35 <sup>a</sup>	51.99±10.51 <sup>b</sup>
C-S-L	234.11±21.56 <sup>a</sup>	76.93±0.12 <sup>a</sup>
C 均值	136.83±73.31 <sup>B</sup>	42.76±22.45 <sup>B</sup>
R-T-L	90.30±3.59 <sup>c</sup>	54.50±3.94 <sup>c</sup>
R-S	118.94±7.82 <sup>bc</sup>	11.31±0.12 <sup>d</sup>
R-L	132.45±24.1 <sup>bc</sup>	73.25±7.50 <sup>b</sup>
R-T-S	263.97±37.09 <sup>b</sup>	81.48±7.12 <sup>b</sup>
R-S-L	370.41±32.32 <sup>a</sup>	95.87±10.91 <sup>a</sup>
R 均值	195.21±106.01 <sup>A</sup>	63.28±29.23 <sup>A</sup>

## 2.4 土壤抗蚀、抗冲性影响因素

Pearson 相关分析显示(表 6),土壤抗蚀指数与土壤有机质含量,黏粒含量,MWD,GMD 和 >5 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关( $p < 0.01$ ,下同),其相关性系数分别为 0.743,0.62,0.727,0.755,0.647;与 PAD,ELT,<0.25 mm 和 0.25~2 mm 水稳性团聚体含量呈极显著负相关,其相关性系数分别为 -0.474,-0.480,-0.528,-0.664;与砂粒含量呈显著负相关( $p < 0.05$ ,下同),相关系数为 -0.401。土壤抗冲指数与土壤有机质含量,黏粒含量,MWD,GMD,>5 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关,其相关性系数分别为 0.648,0.616,0.619,0.635,0.663;与砂粒含量,PAD,ELT,0.25~5 mm、<0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著负相关,其相关性系数分别为 -0.54,-0.469,-0.465,-0.729,-0.486;与土壤容重呈显著负相关,相关系数为 -0.411。

表 6 土壤抗蚀、抗冲指数与土壤理化性质相关性分析

Table 6 Correlation analysis of anti-erosion index and anti-scouring coefficient and soil physicochemical

指标	抗蚀指数	抗冲系数
有机质	0.743**	0.648**
土壤容重	-0.218	-0.411*
总孔隙度	0.073	0.173
砂粒	-0.401*	-0.540**
黏粒	0.620**	0.616**
土壤含水量	0.131	0.255
PAD	-0.474**	-0.469**
ELT	-0.480**	-0.465**
MWD	0.727**	0.619**
GMD	0.755**	0.635**
>5 mm	0.647**	0.663**
0.25~5 mm	-0.664**	-0.729**
<0.25 mm	-0.528**	-0.486**

注:\*表示  $p < 0.05$  水平显著相关,\*\*表示  $p < 0.01$  水平显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 城市绿地土壤抗蚀性及其影响因素

城市绿地土壤抗蚀性研究是城市水土保持工作的基础,也是保障城市可持续发展的客观需要<sup>[2]</sup>,在侵蚀外因一定的条件下,土壤抗蚀性可以反映土壤潜在水土流失特征<sup>[5]</sup>。土壤水稳性指数和抗蚀指数均可以作为土壤团聚体抵抗降雨和地表冲刷的综合评价指标,通过土壤团聚体在静水中悬浮、分散和崩解程度来反映土壤抗蚀性的强弱,水稳性指数和抗蚀指数越高,抗蚀性越强<sup>[12-13]</sup>。本研究校园绿地中不同植被结构水稳性指数和抗蚀指数均显著小于道路绿地,表明校园绿地抗蚀性较弱,由表 2 可知,校园绿地土壤容重显著小于道路绿地,土壤总孔隙度显著大于道路绿地,土壤容重越小,孔隙度越大,土质越疏松,遇水更容易崩解<sup>[12]</sup>。严方晨等<sup>[7]</sup>研究结果表明,乔木等高级植被群落土壤抗蚀性高于灌木和草地等低级群落,而本研究中乔木+草显著小于其他植被结构,这是由于人为定期管理过程中表层大团聚体被破坏,使有机质氧化分解,有机胶结物质减少,土壤无法在短期时间内得到休整<sup>[14]</sup>,导致土壤团聚体形成作用减弱。

土壤抗蚀性对环境变化较为敏感,微环境中影响因素发生变化,土壤抗蚀性发生速度与方向随之改变<sup>[15]</sup>,土壤侵蚀与土壤团聚体水稳性密切相关<sup>[11]</sup>, $\geq 0.25$  mm 土壤团聚体含量是反映土壤抗蚀性的最佳指标之一<sup>[13]</sup>。本研究中土壤水稳性指数和 >0.25 mm 土壤团聚体含量均表现为道路绿地显著高于校园绿地,表明校园绿地不利于水稳性大团聚体的形成,道路绿地土壤结构更稳定,由于土壤有机质与绿地年龄呈显著正相关<sup>[16]</sup>,随着植物生长,土壤大粒径微团聚体含量先增加后减少<sup>[17]</sup>,校园绿地中热岛效应更加突出、土壤蒸发量大,影响了植被生长及凋落物分解,导致进入土壤中的有机质数量及质量受限,从而减少了土壤有机质来源<sup>[18]</sup>,土壤大团聚体逐渐变少,抗蚀能力减弱。此外,两种绿地中乔木+灌木和灌木+草地结构土壤抗蚀性能显著优于其他植被结构,这是由于其他植被结构土壤容重较大、总孔隙度较小、土壤含水量较低,导致土壤有机质和水稳性团聚体形成速率较慢<sup>[13]</sup>,土壤容易受到水力侵蚀,而乔木+灌木和灌木+草地结构下的土壤有机质含量较高,有利于团聚体的形成<sup>[16]</sup>,土壤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,从而改善了土壤团聚体结构,提高了土壤抗蚀性能<sup>[19-20]</sup>。前人研究表明土壤抗蚀性与土壤孔隙度、含水量、容重等呈显著相

关<sup>[20-21]</sup>,而本研究中,土壤抗蚀性与土壤有机质含量、 $>5\text{ mm}$ 土壤水稳团聚体含量呈极显著相关性,这进一步表明了土壤物理性质不能完全反映土壤抗蚀性,需要综合考虑成土母质、气候等因素。

### 3.2 城市绿地土壤抗冲性及其影响因素

不同植被组成的结构不仅可以改良土壤环境质量,还可以调节地表产流过程<sup>[9]</sup>。本研究中,地表径流产生的含沙量随冲刷时间延长表现为先减小后逐渐稳定的趋势,两种绿地内不同植被结构产生的含沙量均在冲刷初期(0~5 min)急速下降,随后缓慢下降,最终趋于稳定,这与已有研究结果较为一致<sup>[11]</sup>,冲刷初期,地表相对松散的土壤颗粒容易被水流推动下移,产生的径流含沙量较多,随着冲刷的进行,松散的土壤颗粒逐渐减少,剩余土壤颗粒间紧实摩擦力逐渐增加,土壤抵抗径流冲刷能力增强,径流含沙量逐渐减小。研究表明, $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量越多,其土壤抗冲性越强<sup>[10]</sup>,本研究中,土壤抗冲指数在两种绿地中均表现为灌木+草地结构显著大于其他结构,灌木+草地结构 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量均显著大于其他植被结构,砂粒含量均显著小于其他植被结构,因而具有较高的抗冲性能。Vannoppen W等<sup>[22]</sup>研究表明根系通过影响土壤理化性质而增加土壤抗冲性,本研究中灌木+草地结构中表层土壤(0—20 cm)是根系的密集分布区,具有网络串联、根土黏结和生化作用,可以疏松土壤<sup>[5]</sup>、降低土壤容重、促进有机质形成,为土壤团聚体形成提供了基础<sup>[23]</sup>。此外,灌木+草地结构有较高的覆盖度,可以有效降低地表径流流速,提高绿地抵抗径流剥蚀能力<sup>[20]</sup>。有研究得出在山区中,草地较其他植被结构土壤抗冲性更强,土壤结构不易被径流破坏<sup>[8]</sup>,而本研究中,两种绿地中草地土壤抗冲性均表现为最差,这是由于人为定期对草地进行管理<sup>[8]</sup>,一方面对土壤造成了一定程度的扰动,表层土壤根系破坏严重,土壤结构破坏程度大;另一方面,经过人为管理后的草地生物多样性减少<sup>[24]</sup>,减弱了其抗冲能力。

经相关性分析表明,土壤容重和土壤砂粒与土壤抗冲指数呈显著负相关,这与已有研究<sup>[25]</sup>结论相符,但与王健等<sup>[26]</sup>研究的结果相悖,这是由于城市绿地中土壤容重相对较低、砂粒含量相对较高,进而提高了土壤入渗性能,减缓了径流,加之城市绿地土壤形成过程与山地不尽相同,土壤砾石含量等其他因素也会影响土壤抗冲性。史冬梅等<sup>[27]</sup>和何淑勤等<sup>[11]</sup>研究结果表明土壤有机质与土壤抗冲性无显著相关性,而本研究结果呈极显著正相关,虽然径流冲刷过程主要是地表径流对土壤颗粒的机械冲刷作用,但有机质可

以在微观上改善土壤结构与性状<sup>[18]</sup>,因此有机质对土壤抗冲性具有一定影响。

综上所述,本研究通过研究校园绿地和道路绿地中不同植被结构下土壤抗蚀抗冲特征,结合土壤理化性质分析了其影响因素,但忽略了植被根系、林龄以及C,N,K等化学性质的影响,此外,微生境和植被密度等也会对研究结果产生一定的影响。因此,后续研究可以结合生境类型和植被状况分析土壤抗蚀性及抗冲性特征,以期更全面地探究城市绿地中土壤理化性质及植被特征对土壤抗蚀抗冲性的作用机制。

## 4 结论

(1)两种绿地中 $>5\text{ mm}$ 粒径水稳性团聚体含量最高,土壤水稳性团聚体均表现为校园绿地显著大于道路绿地(除 $>5\text{ mm}$ 粒径外),此外,校园绿地和道路绿地中土壤有机质和土壤总孔隙度均表现为灌木+草地最大,土壤容重和砂粒含量最小。两种绿地中土壤抗蚀性和水稳性指数乔木+灌木和灌木+草地结构显著大于其他植被结构,草地最差。

(2)两种绿地中不同植被结构的土壤径流含沙量随冲刷时间的持续均呈先减少后平稳的趋势,抗冲指数则呈逐渐增大的趋势,不同植被结构土壤抗冲性均表现为灌木+草地最大,乔木+草地最小。

(3)土壤理化性质是校园绿地和道路绿地土壤抗蚀性与抗冲性的重要因素,以砂粒含量、黏粒含量、水稳性团聚体含量、团聚体平均质量、团聚体几何平均直径、团聚体结构破坏率和有机质含量的影响最为显著。

鉴于灌木+草地地表土壤抗蚀性高于乔木+草地和单一植被结构,而城市中表层土壤极易发生土壤侵蚀,因此在城市生态规划和水土保持等工作中,如果以防治土壤侵蚀为目的,应避免以乔木+草本方式种植。此外,本研究结果对于指导水土保持实践的区域差异与局限性也应予以重视。

### 参考文献(References)

- [1] Wang Liyan, Xiao Yi, Rao Enming, et al. An assessment of the impact of urbanization on soil erosion in Inner Mongolia [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018,15(3):550.
- [2] 余梦舒.常用园林植物凋落物分解、持水及对土壤渗透性影响研究[D].江西南昌:江西农业大学,2020.  
Yu Mengshu. Study on decomposition, water holding and soil permeability of common garden plant litter [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2020.

- [3] 勾琪立.成都市温江区土壤重金属环境容量特征及污染控制对策研究[D].四川雅安:四川农业大学,2019.  
Gou Qili. A study on soil heavy metal environmental capacity characteristic and pollutional control countermeasure in Wenjiang district of Chengdu [D]. Chengdu, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [4] 刘伟,车康利,罗斯元,等.1980—2017年四川省气候变化综合区划[J].气象科学,2022,42(1):108-115.  
Liu Wei, Che Kangli, Luo Siyuan, et al. Comprehensive division of climate change in Sichuan Province from 1980 to 2017 [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2022,42(1):108-115.
- [5] Li Qiang, Liu Guobin, Zhang Zheng, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil [J]. Catena, 2017,153:61-65.
- [6] 王珊珊,毕华兴,崔艳红,等.晋西黄土区不同密度刺槐林土壤抗蚀性关键指标及特征研究[J].北京林业大学学报,2022,44(5):94-104.  
Wang Shanshan, Bi Huaxing, Cui Yanhong, et al. Key indexes and characteristics of soil anti-erodibility of *Robinia pseudoacacia* with different densities in loess region of Western Shanxi Province, Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022,44(5):94-104.
- [7] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等.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[J].应用生态学报,2016,27(1):64-72.  
Yan Fangchen, Jiao Juying, Cao Binting, et al. 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 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(1):64-72.
- [8] 资如毅,赵龙山,钱晓鹤,等.喀斯特高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系[J].水土保持学报,2022,36(3):23-29.  
Zi Ruyi, Zhao Longshan, Qian Xiaohu, et al. Relationship between soil anti-scourability and soil physical properties in karst mountain areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):23-29.
- [9] 金晓,陈丽华.晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征[J].水土保持学报,2019,33(6):120-126.  
Jin Xiao, Chen Lihua. Soil anti-scourability and root distribution characteristics in surface soil under different vegetation types in the loess region of Western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):120-126.
- [10] 鱼舜尧,向琳,喻静,等.林分密度对四川云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤抗冲性的影响[J].应用与环境生物学报,2022,28(6):1594-1600.  
Yu Shunyao, Xiang Lin, Yu Jing, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil anti-scourability of *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain, Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022,28(6):1594-1600.
- [11] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):17-22.  
He Shuqin, Gong Yuanbo, Zheng Zicheng, et al. Changes and influences of soil anti-erodibility under different vegetation types [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(5):17-22.
- [12] 姜兴雪,查瑞波,毛兰花,等.花岗岩红壤侵蚀退化地不同治理模式土壤抗蚀性评价[J].水土保持学报,2021,35(6):31-37.  
Jiang Xingxue, Zha Ruibo, Mao Lanhua, et al. Evaluation of soil erosion resistance under different treatment modes in erosion degraded land of granite red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):31-37.
- [13] 肖盛杨,舒英格,陈梦军.喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J].水土保持通报,2019,39(4):30-35.  
Xiao Shengyang, Shu Yingge, Chen Mengjun. Soil anti-erodibility under different vegetation types in Karst Plateau gorge region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):30-35.
- [14] 赵云鹤,钟鹏,高晗,等.土地利用类型对典型黑土团聚体稳定性和抗蚀性的影响[J].东北林业大学学报,2023,51(9):112-119.  
Zhao Yunhe, Zhong Peng, Gao Han, et al. Effects of land use types on stability and anti-erodibility of typical black soil aggregates [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023,51(9):112-119.
- [15] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment [J]. Land Degradation & Development, 2013,24(6):582-590.
- [16] 邓亮,崔耀平,唐晔,等.城市绿地碳储量分布特征及其影响因素[J].森林与环境学报,2023,43(3):319-328.  
Deng Liang, Cui Yaoping, Tang Ye, et al. Distribution characteristics and influencing factors of carbon storage in urban green space [J]. Journal of Forest and Environment, 2023,43(3):319-328.
- [17] 张文旭,李建红,郭灵辉,等.太行山油松人工林土壤微生物团聚体变化特征及其影响因素[J].山地学报,2019,37



- (6):797-807.
- Zhang Wenxu, Li Jianhong, Guo Linghui, et al. Change features of soil micro-aggregates of *Pinus tabulaeformis* plantation at different developmental stages in the southern Taihang Mountain and its relationship with soil nutrients [J]. Mountain Research, 2019, 37(6):797-807.
- [18] He Chunyang, Zhang Da, Huang Qingxu, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 75:44-58.
- [19] 秦娟, 许克福. 我国城市绿地土壤质量研究综述与展望 [J]. 生态科学, 2018, 37(1):200-210.
- Qin Juan, Xu Kefu. Research summary and prospect of urban green space soil quality in China [J]. Ecological Science, 2018, 37(1):200-210.
- [20] 伍海兵, 方海兰. 绿地土壤入渗及其对城市生态安全的重要性 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(3):894-900.
- Wu Haibing, Fang Hailan. Research progress on soil infiltration of green space and its importance for municipal ecological security [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3):894-900.
- [21] 格日乐, 郝需婷, 苏日娜, 等. 4种不同植被群落类型表土的抗蚀力学特性 [J]. 水土保持通报, 2019, 39(3):1-6.
- Ge Rile, Hao Xuting, Su Rina, et al. Mechanical properties of topsoil anti-erodibility under four different vegetation community types [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3):1-6.
- [22] Vannoppen W, De Baets S, Keeble J, et al. How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species? [J]. Ecological Engineering, 2017, 109:186-195.
- [23] 娄义宝, 康宏亮, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响 [J]. 中国农业科学, 2023, 56(1):90-103.
- Lou Yibao, Kang Hongliang, Wang Wenlong, et al. Vertical distribution of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance of gully heads on the gullied Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(1):90-103.
- [24] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化 [J]. 土壤学报, 2014, 51(4):806-815.
- Wang Peijiang, Dai Quanhou, Ding Guijie, et al. Variation of soil anti-erodibility during restoration of degraded karst vegetation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(4):806-815.
- [25] 郭明明, 王文龙, 康宏亮, 等. 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 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(22):138-146.
- Guo Mingming, Wang Wenlong, Kang Hongliang, et al. Effect of natural vegetation restoration age on slope soil anti-scourability in gully region of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(22):138-146.
- [26] 王健, 刘旦旦, 张鹏辉. 土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1):65-68.
- Wang Jian, Liu Dandan, Zhang Penghui. Effects of soil density on soil erosion resistance [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(1):65-68.
- [27] 史东梅, 陈晏. 紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(5):1400-1409.
- Shi Dongmei, Chen Yan. The influencing factors of soil anti-scourability of tree-crop intercropping land in purple soil hilly region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(5):1400-1409.