

公路边坡不同植被覆盖土壤机械组成及抗蚀性分析

张彬, 谢贤健, 苟千陶 (内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641000)

摘要 [目的]分析不同植被覆盖对公路边坡土壤机械组成和抗蚀性的影响。[方法]以乔木、乔草、乔灌草和草地模式土壤为研究对象,依据卡钦斯基制土壤粒径分级标准分析土壤机械组成,在单一指标抗蚀性分析的基础上,构建土壤抗蚀性评价指标体系,并基于熵权法计算土壤抗蚀性综合指数,综合评价其抗蚀性差异。[结果]公路边坡不同植被土壤理化性质差异显著,乔草和乔灌草模式能够有效改良土壤理化性质;乔灌草模式土壤颗粒组成排序为砂粒>粗粉粒>中细粉粒>黏粒,乔木、乔草和草地植被模式的土壤颗粒组成排序为砂粒>中细粉粒>粗粉粒>黏粒;不同植被覆盖土壤水稳性团聚体含量的比重排序为乔灌草>草地>乔草>乔木,分形维数排序为乔木>乔草>草地>乔灌草,平均重量直径排序为草地>乔灌草>乔木>乔草,土壤水稳性指数的排序为乔草>乔灌草>草地>乔木,土壤抗蚀性指数排序为乔灌草>乔草>草地>乔木,乔灌草模式土壤抗蚀性指数最大,表明其为公路边坡土壤的最佳护坡植被模式。[结论]研究结果可为改善公路边坡土壤结构、提高其土壤抗蚀性能力提供参考依据。

关键词 植被覆盖;土壤机械组成;抗蚀性;熵权法;公路边坡

中图分类号 S157.9 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)20-0045-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.20.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis on Soil Mechanical Composition and Anti-erodibility under Different Vegetation Covers in Highway Slope

ZHANG Bin, XIE Xian-jian, GOU Qian-tao (School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641000)

Abstract [Objective] To comprehensively analyze the effects of different vegetation coverage patterns on the soil mechanical composition and anti-erodibility of the highway slope. [Method] The soil of arbor, arbor-grasslands, arbor-shrub-grasslands and grasslands were selected as the study objects, the soil mechanical composition was analyzed according to soil particle size classification standard made by Kaczynski. Furthermore, a comprehensive evaluation index system of soil anti-erodibility was established based on the analysis of single index of soil anti-erodibility, and the comprehensive index of soil anti-erodibility was calculated by entropy weight method, comprehensively evaluating the difference of soil anti-erodibility. [Result] There were significant differences in the soil physical and chemical properties of different vegetation on highway slopes, and the arbor-grass and arbor-shrub-grass models could effectively improve the physical and chemical properties of the soil. The order of soil particles composition in the arbor-shrub-grass pattern was sand particles>coarse powder particles>medium and fine powder particles>clay particles, and the order of soil particle composition for vegetation patterns of arbor, arbor-grassland and grasslands was sand particles>medium and fine powder particles>coarse powder particles>clay particles. The order of the proportion of soil water-stable aggregate content under different vegetation covers was arbor-shrub-grasslands >grasslands> arbor-grasslands >arbor, the order of fractal dimension was arbor > arbor-grasslands > grasslands> arbor-shrub-grasslands, the order of average weight diameter was grasslands> arbor-shrub-grasslands>arbor> arbor-grasslands, the order of soil water stability index was arbor-grasslands > arbor-shrub-grasslands>grasslands>arbor, the order of soil anti-erodibility index was arbor-shrub-grasslands >arbors and grass>grassland>arbors. The soil anti-erodibility index of arbor-shrub-grasslands was the largest, which indicated that it was the best slope protection vegetation pattern for highway slope. [Conclusion] The research results can provide reference for improving soil structure and enhancing its soil anti-erodibility of highway slope.

Key words Vegetation cover; Soil mechanical composition; Anti-erodibility; Entropy method; Highway slope

土壤机械组成也称为土壤质地,是指土壤中矿物颗粒的大小及组成比例,其比例变化将会影响土壤其他理化性质^[1]。近年来,诸多学者研究了不同植被覆盖对土壤机械组成及其他理化性质的影响。唐炎林等^[2]研究了西双版纳热带季节雨林与橡胶林在土壤机械组成、全氮、全磷和全钾方面的差异,表明不同林分下土壤机械组成差异较大;罗歆等^[3]研究表明缙云山不同植被类型覆盖下土壤养分含量及物理性质差异均较大;谭长强等^[4]利用方差分析法研究了广西都安地区5种典型森林类型土壤的机械组成;谢贤健等^[5]以自然坡面为对照,研究了沱江流域护岸植被中的草地、灌木、乔草和乔灌草模式下土壤理化指标的差异。以上研究表明,不同类型植被及其组合模式覆盖下土壤的机械组成及理化性质均存在差异,其研究有助于科学栽培植被,改善生态

环境。土壤抗蚀性是指土壤对水分散和悬移作用的抵抗能力,其强弱是衡量土壤是否容易受侵蚀营力破坏的重要参数^[6-7]。土壤抗蚀性大小受土壤内在理化性质和外界环境的综合影响,植被类型及其覆盖模式的差异均显著影响其抗蚀性^[8]。肖盛杨等^[9]研究表明喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性差异显著,楸树林的增加能有效增加土壤抗蚀性;刘宽梅等^[10]研究了灌丛、针叶林、阔叶林3种植被类型土壤抗蚀性能力的差异,结果表明在喀斯特地区阔叶树种更有利于提高土壤抗蚀性;谢贤健等^[5]利用主成分分析方法综合评价了不同护岸植被土壤抗蚀性,其中乔草模式更有利于改善坡面土壤结构、提高抗蚀能力。总的来说,不同植被类型及其组合是影响区域土壤抗蚀性的主要因素之一,因此,分析不同植被覆盖土壤抗蚀性,为区域水土保持及改善生态环境具有重要意义。

公路边坡土壤为原始土壤进行填挖、修整之后产生的裸露土壤,其土壤理化特征及抗蚀性受人造因素和自然修复的影响,其特征与其他土壤具有较大差异,同时,有关公路边坡土壤机械组成及抗蚀性的研究鲜有报道。笔者以内江市东

基金项目 四川省教育厅科研项目(18ZB0320);内江师范学院科研资助项目(17JC03);国家级大学生创新创业项目(X2017019)。

作者简介 张彬(1991—),男,四川巴中人,讲师,硕士,从事水土保持及GIS应用研究。

收稿日期 2021-12-16;修回日期 2022-02-26

兴区与市中区的部分公路为例,选取乔木、乔草、乔灌草和草地模式土壤为研究对象,分析不同植被覆盖土壤理化特征与机械组成,在利用土壤团聚体水稳性、颗粒分形维数、平均重量直径和水稳性指数分析其抗蚀性的基础之上,构建抗蚀性评价指标体系,利用熵权法计算土壤抗蚀性综合指数,评价其土壤抗蚀性,以期为选取护坡植被模式及提高其土壤抗蚀性提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 试验区位于四川省内江市东兴区与市中区,地理位置为 $104^{\circ}04' \sim 105^{\circ}24'E$ 、 $29^{\circ}25' \sim 29^{\circ}50'N$,地势平缓,平坝与浅丘相间,属于典型的川中丘陵地貌。全区属于亚热带季风气候,全年平均气温 $15 \sim 28^{\circ}C$,年降水量在 $1\ 000\ mm$ 以下,高温期与多雨期基本一致,年日照时数在

$1\ 100 \sim 1\ 300\ h$,无霜期 $310\ d$ 左右。研究区大部分地区的土壤类型为紫色土,其森林植被类型为针叶林、阔叶林、竹林和灌木林等。内江处于川渝主干线中间地带,是川东南及西南各省的交通交汇点,境内有内宜、成渝等重要高速公路,并有省道资泸路、隆雅路等干线公路通过。

1.2 样地选择 试验区属于206省道与321国道的内江段,为了探究公路边坡不同植被类型土壤机械组成及抗蚀性差异,通过现场勘查,选取筑土方式和植被修复措施基本一致的公路边坡路段,以乔木、乔草、乔灌草和草地4类植被类型的公路边坡作为调查样地,并综合考虑地形、植被的典型性和年限等因素,试验区植被平均恢复年限为5年,获取样地的经纬度、坡度、坡向、主要植物种类,各样地基本概况如表1所示。

表1 样地基本概况

Table 1 Basic situation of studied plots

植被类型 Vegetation types	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡度 Slope// $^{\circ}$	坡向 Aspect	主要植物种类 Main plant species
乔木 Arbor	$105^{\circ}01'54"E$	$29^{\circ}38'39"N$	45	东南	楸树
乔草 Arbor-grasslands	$105^{\circ}06'17"E$	$29^{\circ}32'51"N$	28	东北	银杏、木芙蓉、榕树、马唐、艾蒿
乔灌草 Arbor-shrub-grasslands	$105^{\circ}01'52"E$	$29^{\circ}33'53"N$	15	东	香樟树、扁竹兰、八角枫、求米草、土肉桂
草地 Grasslands	$105^{\circ}06'15"E$	$29^{\circ}33'10"N$	11	西北	毛茛、茅莓、小飞蓬

1.3 样品采集 在野外调查的基础上,2017年7—8月进行野外采集土样,依据每个样地边坡地形特征,对每个样地按上、中、下坡位共设置9个 $1\ m \times 1\ m$ 的采样点,每个样点按照“四分法”采集 $1 \sim 20\ cm$ 的表层土壤,将相同坡位土壤进行均匀混合,即每个样地采集土壤样品3个,共采集12个有效样品,去除石块、杂草,将土壤样品混合均匀,经过自然风干,封装入袋,同时每个样地按上、中、下坡位使用环刀采集原状土3份,共12份,用于测定土壤容重等指标。

1.4 土壤理化指标的测定方法 土壤容重、土壤比重、最大持水量、总孔隙度、毛管孔隙度采用环刀法和比重瓶法及其计算获得^[11],土壤有机质采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定,速效氮采用碱解扩散法测定,土壤速效磷采用钼锑抗比色法测定,速效钾采用火焰发射光谱法测定^[12]。土壤水稳性团聚体采用团聚体湿筛法测定,土壤机械组成采用比重计速测法。每个土壤混合样品重复试验3次,然后取平均值,作为其土壤理化指标的测定值。

1.5 数据分析 参考前人研究^[13],采用平均重量直径(MWD)表示团聚体的稳定性,其计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

式中, r_i 表示第 i 个筛子孔径(mm), $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$, m_i 为第 i 个筛子的破碎团聚体重量百分比。

水稳性指数是表征土壤抗蚀性的重要指标之一,其值越大,表示土壤颗粒遇雨水难分解,抗蚀性越强,其计算公式如下:

$$K = \frac{\sum (P_i K_i) + P_j}{A} \quad (2)$$

式中, K 为水稳性指数, P_i 为第 i 分钟分散的土粒数量, $i = 1, 2, 3, \dots, 10$, P_j 为 $10\ min$ 内没有分散的土粒数, K_i 为第 i 分钟校正系数, A 为供试验的土粒总数。

土壤是具有分形特征的系统,土壤团粒结构的分形维数一定程度可以反映土壤抗蚀性的强弱,该研究采用参考文献[14]中的分形模型计算公路边坡土壤团聚体的分形维数。

熵权法是一种客观赋权法,依据每个评价指标的变异性客观确定其在评价体系中的权重,与主观因素较多的层次分析法、损失信息较多的主成分分析法相比,其具有显著优越性^[15],熵权法不仅客观反映各抗蚀性指标在综合抗蚀性的地位和作用,减小人为因素引起的误差,且能够反映各评价数据间的隐含信息。基于熵权法计算土壤抗蚀性指数的过程如下:

(1)构建判断矩阵,设评价对象有 m 个,每个被评价对象有 n 个评价指标,其矩阵如下:

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

(2)不同抗蚀性指标之间存在量纲不同,采用原始值/最大值对研究数据进行标准化,其公式如下:

$$x'_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{\max}} \quad (4)$$

(3)计算指标信息熵,公式如下:

$$S_i = -k \sum_{j=1}^n P_{ij} \times \ln P_{ij} \quad (5)$$

式中, $P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}}$, $K = \frac{1}{\ln m}$ 。

(4)计算指标 j 的权重,其公式如下:

$$W_j = \frac{1 - S_j}{\sum_{j=1}^n (1 - S_j)} \quad (6)$$

(5)评价指标加权求和,其公式如下:

$$B_i = \lambda_1 x_{i1} + \lambda_2 x_{i2} + \dots + \lambda_n x_{in} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖模式土壤理化特征 土壤的理化特性影响土壤的通气、透水、持水、导热和抗侵蚀等基本功能,从而影响土壤内部结构和土壤肥力等方面^[16]。土壤容重、持水量和孔隙度情况表征了土壤紧实程度,孔隙度反映出土壤结构的好坏,有机质和氮、磷、钾含量差异影响土壤肥力以及土壤理化因素的变化与相互之间的协调。

从表 2 可以看出,公路边坡 4 种不同类型植被 0~20 cm 土层的大部分理化指标均存在较大差异。4 种植被类型土壤容重不一致,其排序为乔木>草地>乔草>乔灌草,乔木和乔灌草的差异性较大,乔草和草地的差异性较小,乔草和乔灌草模式能有效减小土壤容重,改善土壤物理性质,提高土壤抗蚀性能力。土壤持水能力是衡量不同植被类型土壤涵养水源能力,反映了土壤的持水、供水与调蓄能力^[17]。土壤最大持水量是指土壤中毛管水和非毛管水均达到饱和状态的土壤持水量,即表示土壤最大的涵养水分潜力值^[18]。从研究区平均值来看,土壤最大持水量排序为乔灌草>乔草>草地>乔木,乔灌草、乔草与乔木、草地之间差异显著,乔灌草与乔草、乔木与草地差异不显著,乔灌草模式的平均值最大,为 31.90%,表明公路坡面的乔灌草模式能够有效使雨水入渗,减少坡面径流,防止坡面水土的流失,并能够补充公路下垫面的地下水,具有良好的水源涵养作用,乔木模式的持水能力相对较差,这可能与植物根系特点有关。

总孔隙度是土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度的总和,其

不仅反映了植物维持自身生长所吸收水分的能力,也反映了植被滞留水分,涵养水源和消减洪水的能力,对于公路边坡土壤水土保持能力具有重要影响^[19]。由表 2 可知,公路边坡 4 种植被的总孔隙度分布大小不一致,其排序为乔灌草>乔草>草地>乔木,除了乔木,其余 3 类护坡植被之间差异不显著,乔灌草模式的总孔隙度平均值最大,为 53.50%,表明乔灌草模式土壤的孔隙度大,通气性较好,与土壤透水性和持水能力比较协调,有利于植物生长,从而更有利于公路边坡的水土保持。

有机质能有效改善土壤物理性质,优化土壤结构,与土壤抗蚀性具有正相关关系,是衡量土壤稳定性的重要指标^[20]。公路边坡 4 种植被模式有机质含量差异大,其排序为乔灌草>乔草>草地>乔木,乔草与乔灌草有机质含量的差异显著,乔木与草地差异不显著,乔灌草模式有机质含量最高,为 24.66 g/kg,根据国家有机质划分标准为三级,属于中等水平,其植被模式有机质含量水平较高,这与该植被模式下土壤腐殖质含量较高有关,其中乔木模式有机质含量最小,这与乔木种类、养分释放特点等有关。

土壤中氮、磷、钾含量影响土壤结构的改善,并对土壤物理性质的形成有间接影响,且每项养分对其功效不一致^[21]。研究区 4 类植被速效氮含量排序为乔灌草>草地>乔草>乔木,乔木与乔灌草模式差异显著,乔草与草地模式差异不显著;速效磷含量排序为乔草>草地>乔灌草>乔木,速效钾含量排序为乔草>草地>乔灌草>乔木,速效磷和速效钾含量最高和最低的植被均是乔草和乔木,这与不同植被覆盖下植物种类对速效磷和速效钾的吸收和释放的生理规律有关。

表 2 不同植被模式土壤理化性质差异

Table 2 Soil physical and chemical properties of different vegetation models

植被类型 Vegetation types	土壤容重 Soil bulk density // g/cm ³	最大持水量 Maximum water capacity // %	总孔隙度 Total porosity %	有机质 Soil organic matter // g/kg	速效氮 Available nitrogen mg/kg	速效磷 Rapidly available phosphorus mg/kg	速效钾 Rapidly available potassium mg/kg
乔木 Arbor	1.50±0.05 a	24.78±0.01 b	40.33±0.02 b	8.19±4.67 c	16.49±6.83 c	2.11±0.50 c	344.11±85.70 c
乔草 Arbor-grasslands	1.24±0.10 b	31.14±0.02 a	51.30±0.04 a	19.44±4.38 b	25.98±1.72 b	5.65±4.90 a	764.48±16.40 a
乔灌草 Arbor-shrub-grasslands	1.15±0.06 c	31.90±0.01 a	53.50±0.03 a	24.66±3.56 a	59.89±6.71 a	3.29±0.49 b	453.57±131.70 b
草地 Grasslands	1.32±0.07 b	27.76±0.02 b	50.65±0.01 a	12.53±2.58 c	28.93±1.32 b	5.16±3.85 a	653.28±272.62 a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

2.2 不同植被覆盖模式土壤机械组成分析 土壤颗粒组成是指土壤中各级粒径所占的比率,其差异影响土壤结构好坏、通透性能及肥力大小等,也一定程度表征着土壤发育的程度^[22]。根据 1957 年卡钦斯基制土壤粒径分级标准,主要划分为以下几个种类:砂粒(>0.050~1.000 mm)、粗粉粒(>0.010~0.050 mm)、中细粉粒(>0.001~0.010 mm)、黏粒(≤ 0.001 mm)、物理性黏粒(<0.010 mm)。从 4 种植被类型来看,乔灌草模式土壤颗粒组成排序为砂粒>粗粉粒>中细粉粒>黏粒,乔木、乔草和草地植被模式的土壤颗粒组成排序为砂粒>中细粉粒>粗粉粒>黏粒(表 3)。从土壤颗粒来看,砂粒含量直接影响土壤孔隙大小及其渗透能力,从而对土壤抗蚀性也有较大影响。4 种植被覆盖模式砂粒含量比重均大于

40%,且差异较小,表明研究区公路边坡土壤孔隙分布多,渗透能力较强。不同植被覆盖粗粉粒所占比率排序为乔灌草>草地>乔木>乔草,乔灌草与草地、乔木、乔草差异显著,后三者之间差异不显著,中细粉粒的排序为乔草>草地>乔木>乔灌草,乔草和草地分布的差异显著;黏粒的排序为乔草>乔木>乔灌草>草地,乔草模式的物理性黏粒含量比重最大,其值为 38.78%,虽然保肥保水性能较强,但其通透性较差。

分析表明,不同植被覆盖模式土壤机械组成有所差异,公路边坡土壤主要来源于填挖和修整之后,并有坡面物质的运移,因此砂粒含量最高、黏粒含量最低。在 4 类不同植被覆盖模式下,乔草和乔灌草模式的砂粒含量相对较低,乔灌草和草地模式的黏粒含量相对较少,经过植被与土壤的物

理、生物作用,土壤质地有所改善。

表3 不同植被覆盖模式土壤机械组成

Table 3 Soil mechanical composition of different vegetation cover patterns

植被类型 Vegetation types	砂粒 Sand particles	粗粉粒 Coarse powder particles	中细粉粒 Medium and fine powder particles	黏粒 Clay particles	物理性黏粒 Physical clay content
乔木 Arbor	47.12 b	20.33 b	21.22 c	11.33 b	32.56 b
乔草 Arbor-grasslands	42.89 b	18.33 b	24.44 a	14.34 a	38.78 a
乔灌草 Arbor-shrub-grasslands	46.44 b	25.45 a	19.44 c	8.67 b	28.11 c
草地 Grasslands	48.89 a	20.67 b	23.33 b	7.11 c	30.44 c

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

2.3 不同植被覆盖模式土壤抗蚀性分析

2.3.1 单一指标土壤抗蚀性分析。公路边坡土壤的抗蚀性影响边坡土壤的稳定性,分析其抗蚀性为护坡提供科学依据。参考前人研究^[23-24],土壤水稳性团聚体、颗粒分形维数、平均重量直径和水稳性指数等是评价土壤抗蚀性的重要指标。不同植被覆盖模式对土壤团聚体在各土壤粒径的含量有一定影响^[25]。从表4可以看出,4类护坡植被的土壤水稳性团聚体含量在各土壤粒径的分布差异较大,总体趋势为先减小后增大,其中, >5.00 mm含量的比重最大,其次为 $2.00\sim 5.00$ mm, $0.25\sim 0.50$ mm的含量比重最低,表明在公路边坡土壤 >5.00 mm水稳性团聚体最多,这与公路边坡土壤形成环境有关。从4类植被覆盖来看, >0.25 mm的土壤水稳性团聚体含量比重排序为乔灌草>草地>乔草>乔木,这与乔木、灌木和草相结合模式使土粒更好胶结在一起,从而更有利于形成大粒径团聚体有关。

土壤团聚体的分形维数与土壤抗蚀性能力紧密相关,其分形维数越小,表明土壤抗蚀性能力越强^[5]。从表4可以看出,不同植被覆盖模式分形维数为 $2.373\sim 2.513$,其排序为乔

木>乔草>草地>乔灌草,其中公路边坡的乔灌草模式的分形维数最小,表明其植被组合方式更有利于改善土壤结构,提高边坡土壤抗蚀性能力。

平均重量直径表征土壤团聚体的团聚度,其值越大,土壤的团聚程度越高,表明土壤结构更加稳定,其抗蚀性能力强^[26]。由表4可知,4类植被覆盖模式平均重量直径为 $2.541\sim 3.647$,其排序为草地>乔灌草>乔木>乔草,表明草地和乔灌草模式有利于增强公路边坡土壤的团聚度,提高其抗蚀能力,乔木和乔草模式对土壤颗粒的团聚作用相对较弱。

水稳性指数(K)是衡量土壤抗蚀性强弱的重要指标之一,是用于表征土壤团聚体在静水中分解的程度, K 值越大,表明其土壤团聚体的稳定性就越强,抗蚀性能力越强^[27]。公路边坡不同植被土壤水稳性指数排序为乔草>乔灌草>草地>乔木;乔草模式的水稳性指数为 0.589 ,抗蚀性更强,表明乔草模式的土壤团聚体稳定性较强,土壤结构更稳定,抗蚀性能力更强;单一乔木覆盖模式的 K 值仅为 0.113 ,表明其土壤结构的稳定性较弱,抗蚀性能力较小。

表4 不同植被覆盖土壤抗蚀性指标

Table 4 Soil anti-erodibility index of different vegetation cover patterns

植被类型 Vegetation types	土壤水稳性团聚体含量 Soil water-stable aggregates//%					分形维数 Fractal dimension (D)	绝对系数 Absolute coefficient (R^2)	平均重量直径 MWD	水稳性指数 Water stable index (K)		
	>5.00 mm	$>2.00\sim 5.00$ mm	$>1.00\sim 2.00$ mm	$>0.50\sim 1.00$ mm	$>0.25\sim 0.50$ mm						
乔木 Arbor	33.3	21.0	13.7	8.5	4.9	18.6	81.4	2.513	0.999	2.734	0.113
乔草 Arbor-grasslands	47.0	19.5	9.6	6.6	3.1	14.2	85.8	2.445	0.987	2.541	0.589
乔灌草 Arbor-shrub-grasslands	42.9	19.6	10.9	10.1	6.4	10.2	89.8	2.373	0.985	3.116	0.360
草地 Grasslands	59.5	14.4	5.4	5.8	4.1	10.8	89.2	2.409	0.956	3.647	0.288

2.3.2 不同植被覆盖模式土壤抗蚀性综合评价。参考前人研究成果并结合实际^[15],选取土壤比重、最大持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、砂粒、物理性黏粒、 >0.25 mm水稳性团聚体、 >0.50 mm水稳性团聚体、平均重量直径、有机质和速效氮指标,构建土壤抗蚀性综合评价指标体系。由于不同抗蚀性指标对其综合抗蚀性能力的贡献程度不一,并参考邱陆旸^[28]的研究成果,运用熵权法确定单项指标的权重,定量表征某项指标的贡献程度,其计算结果如下:土壤比重(0.236)、最大持水量(0.007)、总孔隙度(0.233)、毛管孔隙度(0.237)、砂粒(0.002)、物理性黏粒(0.010)、 >0.25 mm水稳

性团聚体(0.001)、 >0.50 mm水稳性团聚体(0.001)、平均重量直径(0.013)、有机质(0.106)和速效氮(0.154)。依据信息论中熵值理论,其熵权值越大,变异程度越大,代表的信息量越多,其对结果影响就越大。从结果可知,研究区土壤比重、总孔隙度、毛管孔隙度、有机质和速效氮的权重大,是影响公路边坡土壤抗蚀性的主要因子,表明其土壤抗蚀性与公路边坡土壤的松紧程度及其土壤养分状况有关。

在确定权重的基础之上,对土壤抗蚀性指标进行加权求和,根据公式(7)计算获得土壤抗蚀性指数,为 $4.234\sim 12.711$,其大小分别为乔木 4.234 、乔草 6.931 、乔灌草 12.711

和草地 5.942,因此不同植被覆盖指数大小排序为乔灌草>乔草>草地>乔木,其中乔灌草模式抗蚀性指数最大,其模式下土壤形成良好土壤结构,抗蚀性能力增强;乔草护坡组合的抗蚀性排名第二,草地模式的抗蚀性相对较好;乔木模式下公路边坡的土壤抗蚀性能力最弱。综上所述,研究区公路边坡的最佳护坡模式为乔灌草模式。

3 讨论

通过以上研究,获得了公路边坡不同植被组合土壤的理化性质、机械组成特征和抗蚀性能力情况。从单一指标来看,土壤水稳性团聚体含量先减小后增大,这与边坡土壤构成及后期生态修复有关,分形维数最大的植被覆盖模式为乔木,表明其对提高边坡土壤抗蚀性的作用相对较小,这可能与乔木的种类有关。草地和乔灌草模式的平均重量直径较大,这与灌木和小草的根系发达、较好地使土壤团聚成一体有关,乔草和乔灌草的水稳定指数较大,土壤结构稳定,这与不同植被覆盖模式土壤理化性质分析的结果具有一致性。从综合评价来看,乔灌草组合的土壤抗蚀性能力最强,这与上文分析结果具有一致性,乔灌草模式下的最大持水量、总孔隙度、有机质、速效氮和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体均优于其他植被模式,同时土壤比重、分形维数均低于其他模式,因此其模式下土壤形成良好土壤结构,抗蚀性能力增强;乔草模式抗蚀性能力也较好,其乔木以银杏、榕树为主,其适应性强,其落叶也为边坡土壤提供大量腐殖质,有机质含量较高,这与土壤理化性质分析结果具有一致性,从而优化土壤结构,提高土壤抗蚀性能力。草地模式的抗蚀性相对较好,这可能与毛茛等草本植物须根簇生,抗旱能力较强,生长迅速,能较好适应公路边坡土壤的生长环境等有关;乔木模式下公路边坡的土壤抗蚀性能力最弱,这可能与乔木类型、生长环境和恢复时间等因素有关,研究区乔木种类为楹树,属于大乔木,生长周期长,吸收土壤水分和养分较大,公路边坡土壤的生长环境难以满足其要求,同时这也与乔木种植时间相对较短有关。这表明不同植被下的土壤抗蚀性能力总体较差,土壤理化性质均有待改善,从而提高其土壤抗蚀性。因此,根据公路边坡土壤的生态特性及其成熟度,因地制宜,增加其植被覆盖率,优化土壤的植被组合模式,更多选择生态修复效果较好的乔灌草组合,通过对边坡土壤的科学栽种与生态管理,提高土壤有机质及其养分含量,改善土壤物理性质,使土壤中的团粒结构增加,优化土壤结构,改良其土壤,从而提高其抗蚀性能力。

该研究采取土样时,兼顾了边坡土壤的形成时间及其植被生长状况,因此研究成果可为政府部门的公路边坡水土保持工作进行科学决策提供参考依据。但在土壤采样地选择、抗蚀性指标选取、权重方法确定及综合评价方法选取等方面有待进一步改进,提高其评价的客观性,公路边坡土壤理化性质及抗蚀性能力均会随着时间变化而有较大变化,同时,边坡土壤抗蚀性能力强弱也与植被根系具有密切关系,因此,未来进一步利用空间序列代替时间序列,研究公路边坡不同植被恢复年限的土壤抗蚀能力强弱及其与覆盖植物根

系作用的关联性。

4 结论

(1)公路边坡不同植被土壤理化性质差异显著,乔草和乔灌草模式能够有效改善物理性质,减小土壤容重,增大最大持水量和总孔隙度,并提高土壤有机质含量,不同植被覆盖的氮磷钾含量差异较大,影响土壤结构。

(2)不同植被覆盖土壤的机械组成有所差别,乔灌草模式土壤颗粒组成排序为砂粒>粗粉粒>中细粉粒>黏粒,乔木、乔草和草地植被模式的土壤颗粒组成排序为砂粒>中细粉粒>粗粉粒>黏粒。公路边坡土壤砂粒含量比重大,乔灌草模式的粗粉粒含量较大,乔草模式的中细粉粒和黏粒含量较大。

(3)不同植被覆盖模式土壤抗蚀性能力差异较大,4类护坡植被土壤水稳性团聚体含量分布差异较大,随着粒径减小的总体趋势为先减小后增大;不同植被覆盖模式分形维数排序为乔木>乔草>草地>乔灌草,乔灌草模式土壤抗蚀性能力最强;平均重量直径排序为草地>乔灌草>乔木>乔草;土壤水稳性指数排序为乔草>乔灌草>草地>乔木。从综合评价来看,土壤抗蚀性指数排序为乔灌草>乔草>草地>乔木,乔灌草组合抗蚀性指数最大,为公路边坡土壤的最佳护坡植被模式。

参考文献

- [1] 张素,熊东红,校亮,等.冲沟不同部位土壤机械组成及抗冲性差异[J].土壤,2016,48(6):1270-1276.
- [2] 唐炎林,邓晓保,李玉武,等.西双版纳不同林分土壤机械组成及其肥力比较[J].中南林业科技大学学报,2007,27(1):70-75.
- [3] 罗歆,代数,何丙辉,等.缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究[J].水土保持学报,2011,25(1):64-69,91.
- [4] 谭长强,彭玉华,申文辉,等.广西都安地区5种森林类型土壤机械组成及其肥力比较[J].生态科学,2017,36(2):119-125.
- [5] 谢贤健,张彬.基于耦合关联分析的护岸植被恢复土壤抗蚀性综合评价[J].土壤,2019,51(3):609-616.
- [6] 吕宸,宫渊波,车明轩,等.川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(2):9-17.
- [7] CHEN J, HE B, WANG X, et al. The effects of *Herba Andrographitis* hedgerows on soil erodibility and fractal features on sloping cropland in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Environmental science & pollution research international, 2013, 20(10): 7063-7070.
- [8] EVANS R, COLLINS A L, ZHANG Y, et al. A comparison of conventional and ^{137}Cs -based estimates of soil erosion rates on arable and grassland across lowland England and Wales [J]. Earth-science reviews, 2017, 173: 49-64.
- [9] 肖盛扬,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):30-35,81.
- [10] 刘宽梅,周秋文.典型喀斯特森林土壤的抗蚀性[J].生态学报,2020,40(2):568-577.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
- [12] 谢贤健,李永飞.不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J].水土保持学报,2017,31(1):97-102.
- [13] 谢贤健,韩光中.不同巨桉人工林土壤分形特征及抗蚀性分析[J].土壤,2014,46(4):725-731.
- [14] 霍琳,杨思存,王成宝,等.耕作方式对甘肃引黄灌区灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响[J].应用生态学报,2019,30(10):3463-3472.
- [15] 邱陆扬,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.
- [16] 王长庭,王根绪,刘伟,等.高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):160-165.
- [17] 韩路,王海珍,于军.塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J].水土保持学报,2013,27(6):124-129.

胞中并获得成功表达。更多突变位点的发现,尤其是高度保守区域氨基酸突变能否导致蛋白功能变化为进一步探索肥胖的原因提供了更多信息。针对肥胖患者饮食调控的治疗过程中,手术治疗并未在长期临床效果中获益,更加强调了 MC4R 激动剂药物治疗的重要性,且只有通过基因筛查后才可以评估患者是否适合手术治疗。因此,针对治疗肥胖患者的药物研发更加重要。筛选导致肥胖的危险基因,当前不仅是为了研究常规治疗肥胖药物,甚至可为儿科内分泌学筛选导致肥胖的基因提供指导意见^[16]。因此,可以通过基因突变位点的筛查,对存在 MC4R 基因突变的儿童进行前期干预,包括饮食、运动及药物干预。综上所述,该研究为 MC4R 基因突变引起蛋白功能变化、MC4R 与配体结合后 2 个信号传导通路之间联系机制提供了前期科研基础,同时为临床上研发治疗肥胖药物及从儿童期预防肥胖的前期干预提供了科研数据。

参考文献

- [1] CAI M Y, HRUBY V J. The melanocortin receptor system: A target for multiple degenerative diseases [J]. *Current protein and peptide science*, 2016, 17(5): 488-496.
- [2] HAINER V, ALDHOON HAINEROVÁ I, KUNEŠOVÁ M, et al. Melanocortin pathways: Suppressed and stimulated melanocortin-4 receptor (MC4R) [J]. *Physiol optical res earch*, 2020, 69(S2): S245-S254.
- [3] AYERS K L, GLICKSBERG B S, GARFIELD A S, et al. Melanocortin 4 receptor pathway dysfunction in obesity: Patient stratification aimed at MC4R agonist treatment [J]. *The journal of clinical endocrinology & metabolism*, 2018, 103(7): 2601-2612.
- [4] GAVINI C K, COOK T M, RADEMACHER D J, et al. Hypothalamic C2-do-

- main protein involved in MC4R trafficking and control of energy balance [J]. *Metabolism clinical and experimental*, 2020, 102: 1-11.
- [5] AFSHIN A, FOROUZANFAR M H, REITSMA M B, et al. Health effects of overweight and obesity in 195 countries over 25 years [J]. *The New England journal of medicine*, 2017, 377(1): 13-27.
- [6] PICHÉ M E, TCHERNOF A, DESPRÉS J P. Obesity phenotypes, diabetes, and cardiovascular diseases [J]. *Circulation research*, 2020, 126(11): 1477-1500.
- [7] YU K P, LI L, ZHANG L, et al. Association between MC4R rs17782313 genotype and obesity: A meta-analysis [J]. *Gene*, 2020, 733: 1-9.
- [8] LOTTA L A, MOKROSI NSKI I, DE OLIVEIRA E M, et al. Human gain-of-function MC4R variants show signaling bias and protect against obesity [J]. *Cell*, 2019, 177(3): 597-607.
- [9] MANKOWSKA M, NOWACKA-WOSZUK J, GRACZYK A, et al. Polymorphism and methylation of the MC4R gene in obese and non-obese dogs [J]. *Molecular biology reports*, 2017, 44(4): 333-339.
- [10] 王光川, 巴彩凤, 苏荣健, 等. 犬黑皮质素受体 4 真核表达载体的构建及表达 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(31): 13564-13567.
- [11] GONÇ ALVES J P, PALMER D, MELDAL M. MC4R agonists: Structural overview on antiobesity therapeutics [J]. *Trends in pharmacological sciences*, 2018, 39(4): 402-423.
- [12] PAISDZIOR S, DIMITRIOU I M, SCHÖPE P C, et al. Differential signaling profiles of MC4R mtations with three different ligands [J]. *International journal of molecular sciences*, 2020, 21(4): 1-20.
- [13] KIM K S, REECY J M, HSU W H, et al. Functional and phylogenetic analyses of a melanocortin-4 receptor mutation in domestic pigs [J]. *Domestic animal endocrinology*, 2004, 26(1): 75-86.
- [14] 李星润, 兰国湘, 王孝义, 等. 猪 MC4R 基因 Asp298Asn 位点多态性及其与生长性状的关联 [J]. *畜牧与兽医*, 2016, 48(2): 23-27.
- [15] 魏嘉, 王光川, 武洁, 等. 犬 MC4R 突变体 D90N 真核表达载体的构建及表达 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(12): 6118-6121, 6124.
- [16] RAFFAN E, DENNIS R J, O' DONOVAN C J, et al. A deletion in the canine POMC gene is associated with weight and appetite in obesity-prone labrador retriever dogs [J]. *Cell metabolism*, 2016, 23(5): 893-900.

(上接第 49 页)

- [18] 张洪江, 程金花, 余新晓, 等. 贡嘎山冷杉纯林枯落物储量及其持水特性 [J]. *林业科学*, 2003, 39(5): 147-151.
- [19] 夏江宝, 陆兆华, 高鹏, 等. 黄河三角洲滩地不同植被类型的土壤贮水功能 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 72-75, 95.
- [20] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 100-108.
- [21] 白秀梅, 韩有志, 郭汉清. 关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 79-84.
- [22] 袁颖丹, 郭晓敏, 陈煦, 等. 武功山山地草甸不同海拔高度土壤机械组成与养分特性关系 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(7): 118-122.

- [23] 陈爱民, 严思维, 林勇明, 等. 泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价 [J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(9): 62-70.
- [24] 吴丽丽, 张仁陟, 康立军. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的土壤抗蚀性综合评价 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(11): 1310-1317.
- [25] 韩贞贵, 毛天旭, 屠丹, 等. 长江源区草地覆盖变化对土壤团聚体分布及稳定性的影响 [J]. *草地学报*, 2020, 28(3): 801-807.
- [26] 闫思宇, 王景燕, 龚伟, 等. 川南山地林分变化对土壤物理性质和抗蚀性的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(7): 1112-1120.
- [27] 黄进, 杨会, 张金池. 桐庐生态公益林主要林分类型土壤抗蚀性研究 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 49-52, 64.
- [28] 邱陆瑜. 浙江省瓯江流域源头区林地土壤抗蚀特性及影响因素研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

(上接第 66 页)

- [2] 宋戈, 张文琦. 粮食作物种植视域下东北粮食主产区耕地利用的时空分化特征 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 1-8.
- [3] 苏锐清, 曹银贵, 王文旭, 等. 京津冀潮白河区域 2001—2017 年耕地利用变化时空特征分析 [J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 574-582.
- [4] 谭木魁, 韩思雨, 张路. 粮食安全视角下粮食主产区耕地休耕规模及动态仿真研究 [J]. *中国土地科学*, 2020, 34(2): 9-17.
- [5] 盛艳, 姚云峰, 秦富仓. 基于地形因素的赤峰市乡土地利用空间格局变化 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 388-393.
- [6] 孙聪康, 徐俊丽, 余敦, 等. 多尺度下崇义县耕地质量空间分布差异特征研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(4): 601-612.
- [7] 杨建宇, 徐凡, 赵龙, 等. 基于综合质量空间自相关性分析的耕地保护分区方法 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 156-163.
- [8] 朱磊, 杨爱民, 夏鑫鑫, 等. 基于空间自相关的 1975—2015 年玛纳斯河流域耕地时空特征变化分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(6): 887-899.
- [9] 李灿, 黄萌萌. 基于空间自相关的丘陵山区耕地质量保护分区 [J]. *国土资源科技管理*, 2020, 37(2): 106-115.
- [10] 范晓峰. 基于耕地质量指数局部空间自相关的耕地保护分区研究: 以敦化市为例 [J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2018, 3(12): 7-12.
- [11] 姜广辉, 张瑞娟, 张翠玉, 等. 基于空间集聚格局和边界修正的基本农田保护区划定方法 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 222-229.

- [12] 刘彦文, 刘成武, 何宗宜, 等. 基于像元尺度耕地质量局部空间自相关的基本农田划定 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 260-268, 319.
- [13] 杜婉婷, 李淑杰, 曹竞文, 等. 多尺度下的珲春市耕地质量空间自相关分析 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2018, 50(4): 134-141.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 何炬, 张雪松. 县·乡镇两级尺度下耕地质量空间自相关分析: 以湖北省广水市为例 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(14): 7-11.
- [16] SONG W, WU K N, ZHAO H F, et al. Arrangement of high-standard basic farmland construction based on village-region cultivated land quality uniformity [J]. *Chinese geographical science*, 2019, 29(2): 325-340.
- [17] 张晗, 赵小敏, 欧阳真程, 等. 基于空间自相关的耕地质量空间差异特征及耕地保护分区: 以江西省上高县为例 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 304-312.
- [18] 李武艳, 朱从谋, 王华, 等. 浙江省耕地质量多尺度空间自相关分析 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(23): 239-245, 315.
- [19] 李国煜, 张廷玉, 钟通. 基于耕地质量指数空间自相关的耕地保护分区: 以福清市为例 [J]. *绿色科技*, 2016(14): 208-213.
- [20] 任平, 吴涛, 周介铭. 基于 GIS 和空间自相关模型的耕地空间分布格局及变化特征分析: 以成都市龙泉驿区为例 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(3): 325-334.