

王学林,陈江波,刘昊,等.雅鲁藏布江中下游宽谷地带土壤粒径分形维数及抗风蚀能力[J].中国沙漠,2026,46(3):330-340.

雅鲁藏布江中下游宽谷地带土壤粒径分形维数及抗风蚀能力

王学林,陈江波,刘昊,官航,王瀚卓,丁国栋,赵媛媛

(北京林业大学水土保持学院/宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站/水土保持国家林业和草原局重点实验室/林业生态工程教育部工程研究中心,北京 100083)

摘要: 雅鲁藏布江中下游河谷地带广泛发育沙尘沉积地貌,其分布与形成机制具有显著的区域特征。为探究其河谷区不同空间格局的风蚀下垫面沙尘潜在释放能力,选取西藏米林区段的河谷地带,采集林地、草地、耕地、河滩地、固定沙地、流动沙地6种下垫面土壤,通过土壤粒度分析(Particle Size Distribution, PSD)、抗风蚀能力指数(Anti-Erosion Rating Index, AERI)等方法,为该地沙尘环境变化研究和生态恢复管理提供数据支撑。主要结果:(1)河谷区土壤基质的黏粒含量极低($<1\%$),细砂粒占比最大(39.9%),主要由砂质壤土、壤质砂土和砂土组成,且土壤粒径随土层加深呈现粗化趋势。(2)单重分形维数表现为林地(2.315) $>$ 耕地(2.289) $>$ 河滩地(2.261) $>$ 草地(2.171) $>$ 固定沙地(2.165) $>$ 流动沙地(2.084),远低于同类型平均数值水平;单重分形维数与土壤有机碳含量极其显著正相关($P<0.001$),与全磷、速效磷、全氮含量极显著正相关($P<0.01$),体现了细颗粒(黏粒、粉粒)通过物理化学作用形成的养分富集效应。(3)土壤AERI存在显著空间差异($P<0.05$),林地(1.086) $>$ 耕地(1.012) $>$ 草地(0.955) $>$ 固定沙地(0.856) $>$ 河滩地(0.711) $>$ 流动沙地(0.675),植被和农业改善了土壤性状,而砂质裸露地表(砂粒含量 $>85\%$)抗蚀能力最弱。综上,利用分形理论可表征不同类型的下垫面土壤质量水平与演变规律,有助于为雅江中下游流域河谷地带的沙尘释放研究和土壤质地改善提供数据支撑。

关键词: 雅鲁藏布江; 粒径组成; 分形理论; 养分特征; 抗风蚀能力

文章编号: 1000-694X(2026)03-330-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00237

中图分类号: S15

文献标志码: A

0 引言

雅鲁藏布江作为中国乃至整个南亚的重点生态功能区,具有巨大的水源涵养能力和水能蕴藏量,凭借独特地理环境和生态系统,成为了全球生物多样性最典型及热度最高的研究区域^[1-2]。该流域源于喜马拉雅山中段北坡杰马央宗冰川,中下游分布着宽窄相间的串珠状河谷,广泛存在着黄土沉积和现代风沙沉积,形成了全球独特的爬坡沙丘自然景观^[3]。沙丘群呈非连续斑块状分布于宽谷区,河流水位在冬春枯水期(12月至次年5月)下降,裸露的河滩地、草地、固定沙地、耕地、流动沙地等风蚀下垫面的沉积物将成为沙源,在“狭管效应”加速的强劲季风作用下,沙粒经吹蚀翻滚形成沙尘暴。

通过对不同风蚀下垫面的土壤进行粒径机械组成测定与理化性质养分条件分析,有助于人们定量评估不同地貌的风蚀敏感性,筛选适生植物种,研究风沙环境扩展对生态系统的负面影响^[4]。

风蚀下垫面是指大气与地表直接接触的界面,其物理和化学性质直接影响风力对地表物质的侵蚀、搬运和堆积过程,涵盖植被覆盖区、流动沙地、河漫滩、耕地等不同地表类型。土壤作为各风蚀下垫面的基底,是由多种颗粒状矿物质、有机质、水分以及微生物等堆积形成的黏结集合体,利用土壤粒度分析(Particle Size Distribution, PSD)能够表述其粒径组成情况,是衡量土壤性状和质地的重要物理学特征,常用于评估肥力水平和利用价值^[5-6]。近年

收稿日期:2025-07-22; 改回日期:2025-09-22

资助项目:国家自然科学基金项目(42571311)

作者简介:王学林(1996—),男,河北邢台人,博士研究生,主要研究方向为荒漠化防治。E-mail: Wangxuelin@bjfu.edu.cn

通信作者:丁国栋(E-mail: dingguodong@bjfu.edu.cn)

来,分形理论作为自然科学研究领域的新型概念和方法,不仅是当前研究土壤 PSD 的主流技术手段,还与土壤养分一同被应用于抗风蚀能力指数(Anti-Erosion Rating Index, AERI)研究当中^[7-8]。土壤养分的种类、含量及其分布特性决定了陆地生态系统的稳定性和多样性,其中氮、磷、钾等养分含量和形态,不仅能够直接影响植物生长表现和生产力能力,还影响着生物多样性和生态服务功能^[9-10]。土壤有机质含量直接关系到土壤养分的释放速度和养分的循环效率,维持着肥力水平和生态功能^[11]。通过对各风蚀下垫面土壤开展 PSD 和 AERI 研究,有助于揭示不同地表类型的风蚀动力机制^[12-13]。

目前,学者多关注雅鲁藏布江流域的植被群落分布、气候变化影响和地质条件特征等方面,应加强河谷区不同地貌类型的土壤理化性质、粒径组成特征及风蚀沉积物特性等方面研究,以助力揭示风蚀动力-地貌-生态耦合机制^[14-15]。李海东等^[16]运用遥感技术监测风沙化土地现状分布及动态变化,结合气候变化和人类活动,分析流域内风沙化土地动态变化的驱动机制。赵萌萌等^[17]利用 USLE 和 GIS 技术估测雅鲁藏布江贡嘎段沿岸流域的侵蚀情况和敏感度。谭杰峻等^[18]利用 CSLE 模型和多因子综合法,对雅鲁藏布江中游区段的土壤侵蚀强度进行等级划分。本文以雅江米林区段的河谷区为研究区,以林地、草地、耕地、河滩地、固定沙地和流动沙地共 6 种下垫面土壤为研究对象,采用遥感影像技术、随机垂直剖面取样、激光衍射测算法等方法,推动雅江河谷区土壤退化演变的机制、机理及互作关系研究,为生态保护和管理提供可靠数据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于雅鲁藏布江中下游米林区段的宽谷地区,平均海拔超过 3 500 m,地势呈现南北高中间低、西高东低,处于半湿润气候向半干旱气候过渡带^[19]。该区段河谷地带气候空间异质性明显,最高气温为 29 °C,最低气温-10 °C,年平均气温为 8.2 °C,年日照时间为 1 500~2 600 h,3—5 月、10~12 月盛行东(北)季风^[19];该地降雪稀少,年平均降水量为 652 mm,年平均蒸发量 1 239.9~1 704 mm,6—8 月为丰水期,9 月至次年 4 月为枯水期。土壤类型主要为山地灌丛草原土,上接亚高山草原土、亚高

山草甸土、高山草甸土、寒漠土等。植被物种十分丰富,主要包括云杉(*Picea asperata*)、冷杉(*Abies fabri*)、柏木(*Cupressus funebris*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、高山栎(*Quercus semecarpifolia*)、金露梅(*Dasiphora fruticosa*)、花楸(*Sorbus pohuashanensis*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。

1.2 样品采集方法

根据研究区的土地利用现状和野外调查分析,遵循代表性和典型性原则,选择晴天对河谷区土壤进行样品采集,共设置 50 个采样点(图 1)。

每个采样点以垂直剖面的方式收集土样,去掉表面杂质后,按照土层深度 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90、90~100 cm 分为 10 层,自上而下的顺序在每层土体中部分别取 1 kg 土样(图 2),带回实验室经自然风干后备用。

因个别采样点下为砂石层或母质层,共采集了 488 个土壤样品进行分析,包含林地(占比 18%)、草地(占比 14%)、耕地(占比 12%)、河滩地(占比 18%)、固定沙地(占比 22%)和流动沙地(占比 16%)。

1.3 分析方法

1.3.1 土壤粒径组成测定

将土样过 2 mm 筛后,依次用浓度为 10% 过氧化氢、10% 盐酸去除有机物和碳酸盐,经离心机重复离散 3~5 次后,添加六偏磷酸钠进行分散,完成样品预处理。PSD 测定采用英国 Mastersizer 3000 激光粒度仪,经重复 3 遍后取平均值作为测定结果,单位以体积百分比表示,重复性误差 $\leq\pm 0.5\%$,准确性误差 $\leq\pm 1\%$ 。粒径根据美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)土壤质地分级标准共划分为 7 个等级,分别为黏粒($<2\ \mu\text{m}$)、粉粒(2~50 μm)、极细砂粒(50~100 μm)、细砂粒(100~250 μm)、中砂粒(250~500 μm)、粗砂粒(500~1 000 μm)和极粗砂粒(1 000~2 000 μm),并按照黏粒($<2\ \mu\text{m}$)、粉粒(2~50 μm)、砂粒(50~2 000 μm)比例划定砂土、壤砂土、砂壤土、粉壤土、壤土、粉土、砂黏壤土、粉黏壤土、黏壤土、砂黏土、粉黏土、黏土 12 个土壤质地类型。

1.3.2 土壤体积单重分形理论

通过土壤颗粒体积单重分形维数的概念及计算公式推导,体积分形维数计算公式为:

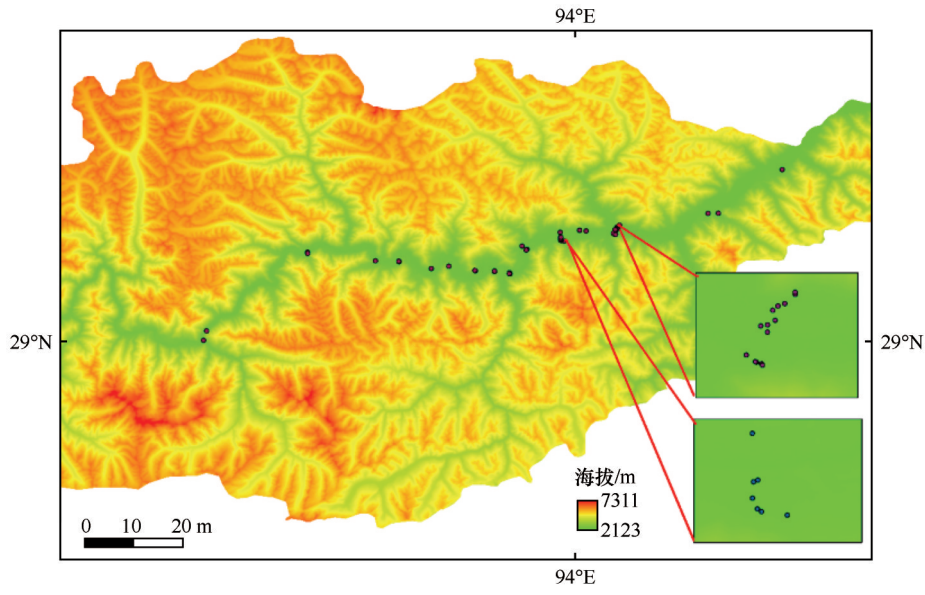


图1 研究区采样点分布

Fig.1 Sampling distribution map of the study area

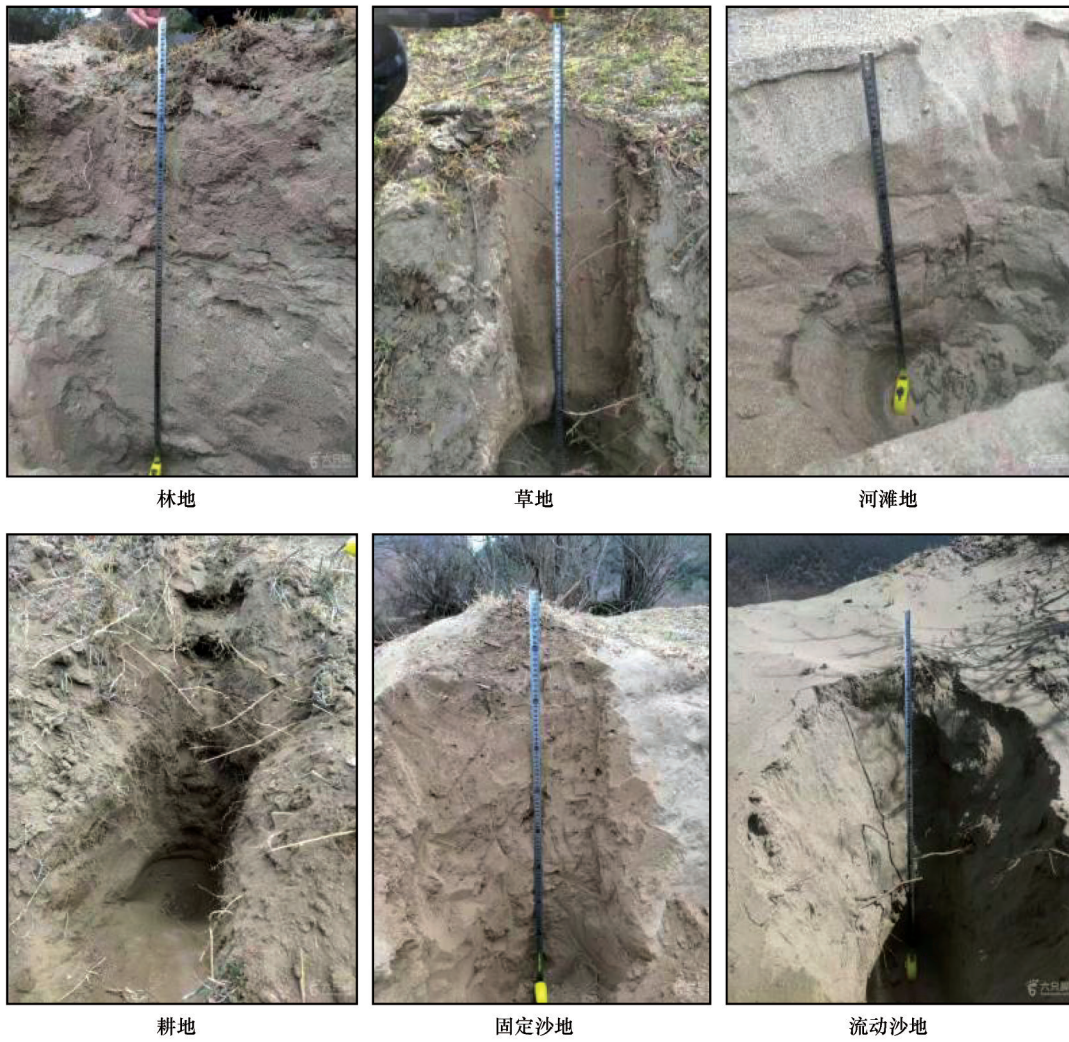


图2 采样点剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling point profile

$$\frac{V_{(r<R)}}{V_T} = \left\{ \frac{R}{R_{\max}} \right\}^{3-D} \quad (1)$$

$$D = 3 - \frac{\lg\left(\frac{V_{(r<R)}}{V_T}\right)}{\lg\left(\frac{R}{R_{\max}}\right)} \quad (2)$$

式中: V 为小于粒径 R 的土壤总体积(%); V_T 为测定的土壤总体积(%); R 为两筛分粒级 R_i 与 R_{i+1} 间粒径的平均值(mm); R_{\max} 为土壤粒径分级中最大粒径, 本文最大粒径取值2 000 μm ; 推导求得土壤颗粒的体积分形维数 D ^[20]。

1.3.3 抗风蚀能力指数(AERI)

基于Chepil经典风蚀方程, 结合风蚀过程的物理特性与材料抵抗侵蚀的能力评估, 利用系数标定与归一化建立土壤抗风蚀能力指数公式^[21-22]:

$$AERI = (\alpha \cdot D + \beta \cdot SOM + \gamma \cdot CNR + \delta \cdot NPK) \cdot CF \quad (3)$$

$$CNR = \frac{w_{\text{clay}} + \text{Fe}/\text{Al}}{\text{Sand}\%} \quad (4)$$

$$NPK = \frac{\text{TN} + \text{AP} + \text{AK}}{\text{Sand}\%} \quad (5)$$

$$CF = 1 + 0.1 \cdot \ln(P/ET_0) \quad (6)$$

式中: D 为分形维数, 用来表征土壤结构复杂性, 值越高抗蚀性越强; SOM 为土壤有机质含量, % (质量分数); CNR 为养分胶结比, 反映了化学胶结能力; w_{clay} 为 $\text{Sand}\%$ 为砂粒含量; Fe/Al 为氧化物比; NPK 为养分综合指数, 氮(TN)促进微生物活动, 增加胞外多糖分泌, 提升团聚体稳定性, 磷(AP)通过磷酸盐胶结作用减少颗粒分散, 钾(AK)调节土壤渗透压, 抑制干裂; CF 为气候修正因子; P 为年降水量, mm; ET_0 为年潜在蒸发量, mm。根据高寒河谷土壤性状和风蚀现状特点, 权重系数需满足 $\alpha(0.3) + \beta(0.2) + \gamma(0.25) + \delta(0.25) = 1$ 。

1.3.4 土壤理化性质测定

土壤理化指标测定采用以下方法: 土壤有机质(SOM)——重铬酸钾外加热法; 全钾(TK)——火焰光度法; 速效钾(AK)—— NH_4OAC 浸提法; 全氮(TN)——凯氏定氮法; 全磷(TP)—— NaOH 熔融法; 速效磷(AP)——钼蓝比色法; 水溶盐(WSB)——电导法^[23]。

1.3.5 数据处理方法

利用SPSS22.0软件计算描述性统计对数据进行统计分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)描述数据差异显著性; 采用Excel 2020计算土壤分形维数; 使用Origin 2022绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤粒径组成和单重分形维数

研究区土壤粒径组成以粉粒(6.15%~32.06%)、极细砂粒(14.17%~35.5%)、细砂粒(24.58%~53.63%)、中砂粒(2.98%~25.15%)为主, 而黏粒(0%~1.29%)、粗砂粒(0%~9.4%)、极粗砂粒(0.02%~4.59%)含量较低。耕地土壤粒径主要由粉粒(均值27%)、极细砂(均值30.8%)、细砂粒(均值29.7%)组成, 随土层深度递增未呈现规律性变化。其他5种下垫面土壤粒径均为细砂粒(流动沙地均值52.3%>河滩地均值47.1%>固定沙地均值41%>草地均值37.1%>林地均值32.4%)占比最高, 且随土层深度增加, 粉粒含量呈递减趋势, 砂粒含量呈递增趋势。不同下垫面土壤粒径差异性主要集中在近地表层, 林地、草地、耕地、固定沙地的0~20 cm、20~40 cm土层中的粉粒、极细砂粒含量均显著高于河滩地和流动沙地($P < 0.05$), 而细砂粒、中砂粒含量无显著性差异($P > 0.05$)。其中, 粉粒含量表现为林地(26.9%)>耕地(26.8%)>草地(15.7%)>固定沙地(14.7%)>河滩地(9.2%)>流动沙地(9.0%)。

通过最小二乘法进行拟合得到6种下垫面土壤单重分形维数(图3), 林地(2.028~2.415)>耕地(2.264~2.310)>河滩地(2.139~2.321)>草地(2.059~2.326)>固定沙地(2.078~2.311)>流动沙地(1.983~2.215), 其中草地和固定沙地的土壤颗粒分形维数的数值及变化趋势均高度相似。随土层深度加深, 林地、草地和固定沙地的分形维数呈波动下降趋势, 耕地、流动沙地和河滩地的分形维数则基本表现为持平趋势。

2.2 土壤养分特征与单重分形维数相关性

不同下垫面土壤理化指标含量差异主要表现在0~20、20~40 cm的土层, 且差异性表现十分相似(表2)0。0~20 cm表层土, 林地的有机质(15.53 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、速效磷(5.62 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量最高, 显著高于除耕地外的其他4种下垫面($P < 0.05$); 草地的速效钾(50.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量最高, 显著高于其他5种下垫面($P < 0.05$); 河滩地与流动沙地的有机质、速效钾含量分别为2.38 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与3.21 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、13.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与20.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均显著低于其他4种下垫面($P < 0.05$)。20~40 cm土层, 林地的有机质(11.9 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、速效磷

表1 6种下垫面的土壤颗粒组成
Table 1 Soil particle composition for six underlying surfaces

下垫面 类型	土壤 深度 /cm	土壤颗粒组成/%						
		黏粒	粉粒	极细砂	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒
		<0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~0.10 mm	0.10~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm
草地	0~20	0.62±0.6 ^{ab}	22.82±16.1 ^{ab}	24.1±7.13 ^a	34.34±13.75 ^a	14.27±9.57 ^{ab}	3.5±3.13 ^a	0.24±0.37 ^a
	20~40	0.56±0.6 ^a	20.19±13.6 ^a	21.81±9.27 ^a	31.18±10.23 ^a	12.32±3.6 ^a	9.4±12.24 ^a	4.59±9.75 ^a
	40~60	0.21±0.3 ^a	12.19±9.88 ^a	19.12±12.29 ^a	37.68±15.29 ^{ab}	22.11±16.7 ^a	7.82±10.91 ^a	0.87±1.92 ^a
	60~80	0.19±0.27 ^{ab}	12.1±12.24 ^a	18.02±13.38 ^a	42.84±18 ^a	19.6±14.36 ^a	5.91±11.37 ^a	1.28±2.82 ^a
	80~100	0.14±0.2 ^a	11.04±8.82 ^a	17.98±13.62 ^a	39.48±22.3 ^a	18.06±10.13 ^a	8.76±16.9 ^a	3.77±8.41 ^a
林地	0~20	1.29±1.38 ^a	32.06±25.69 ^a	22.78±8.14 ^a	31.61±20.57 ^a	10.11±9.37 ^b	1.92±2.21 ^a	0.22±0.21 ^a
	20~40	1.07±1.5 ^a	28.1±25.94 ^a	20.24±8.28 ^a	35.79±24.12 ^a	11.85±11.5 ^a	2.23±3.73 ^a	0.64±1.11 ^a
	40~60	0.86±1.23 ^a	25.27±23.55 ^a	19.63±11.33 ^a	33.61±18.89 ^{ab}	16.74±17.42 ^a	3.41±6.09 ^a	0.42±1.15 ^a
	60~80	0.64±0.6 ^a	24.15±20.4 ^a	21.79±13.46 ^a	30.3±17.59 ^a	14.91±14.93 ^a	6.68±13.45 ^a	1.47±3.33 ^a
	80~100	0.63±0.68 ^a	25.16±24.25 ^a	23.09±14.8 ^a	30.48±19.23 ^a	13.85±17.95 ^a	4.61±8.15 ^a	1.78±4.96 ^a
耕地	0~20	0.5±0.3 ^{ab}	26.16±6.36 ^{ab}	28.43±11.5 ^a	30.14±7.5 ^a	10.87±7.94 ^{ab}	3.27±2.78 ^a	0.59±0.68 ^a
	20~40	0.49±0.53 ^a	27.35±10.97 ^a	25.48±8.89 ^a	27.99±7.46 ^a	12.94±8.31 ^a	4.44±4.08 ^a	0.59±0.68 ^a
	40~60	0.59±0.55 ^a	29.85±11.16 ^a	25.87±6.73 ^a	28.12±9.14 ^b	12.62±8.33 ^a	2.88±2.18 ^a	0.59±0.68 ^a
	60~80	0.65±0.38 ^a	27.8±9.96 ^a	23.73±7.53 ^a	29.25±5.1 ^a	14.88±9.77 ^a	3.66±3.12 ^a	0.59±0.68 ^a
	80~100	0.59±0.43 ^a	22.78±8.66 ^a	24.39±8.14 ^a	32.82±4.47 ^a	15.07±11.14 ^a	3.24±2.35 ^a	0.59±0.68 ^a
河滩地	0~20	0±0 ^b	6.16±3.7 ^b	18.7±16.95 ^a	43.27±13.92 ^a	25.15±25.1 ^a	6.61±9.32 ^a	0.11±0.15 ^a
	20~40	0±0 ^a	6.15±1.99 ^a	18.82±14.28 ^a	48.73±8.73 ^a	22.86±20.17 ^a	3.43±4.8 ^a	0.02±0.03 ^a
	40~60	0.28±0.4 ^a	13.71±9.74 ^a	27.79±19.98 ^a	39.61±8.02 ^{ab}	15.33±18.26 ^a	3.18±3.68 ^a	0.1±0.14 ^a
	60~80	0±0 ^b	11±3.9 ^a	29.23±0.14 ^a	51.69±7.11 ^a	7.37±2.32 ^a	0.56±0.79 ^a	0.14±0.2 ^a
	80~100	0.14±0 ^a	9.05±0 ^a	35.5±0 ^a	52.34±0 ^a	2.98±0 ^a	0±0 ^a	0±0 ^a
固定 沙地	0~20	0.61±0.57 ^{ab}	20.08±12.17 ^{ab}	28.43±5.7 ^a	40.55±15.49 ^a	8.84±5.34 ^b	1.44±2.06 ^a	0.03±0.06 ^a
	20~40	0.36±0.35 ^a	15.17±8.78 ^a	26.94±7.41 ^a	43.29±14.68 ^a	11.79±9.15 ^a	2.39±4.42 ^a	0.06±0.13 ^a
	40~60	0.19±0.26 ^a	12.47±9.75 ^a	23.82±10.31 ^a	43.89±14.86 ^{ab}	16.07±14.43 ^a	3.45±6.41 ^a	0.11±0.25 ^a
	60~80	0.19±0.3 ^{ab}	11.36±11.09 ^a	21.42±12.46 ^a	40.31±17.64 ^a	18.4±12.46 ^a	6.66±10.75 ^a	1.44±4.18 ^a
	80~100	0.22±0.34 ^a	14.36±14.66 ^a	20.41±14.61 ^a	37.12±16.77 ^a	19.17±18.17 ^a	6.21±10.32 ^a	2.05±5.2 ^a
流动 沙地	0~20	0.12±0.26 ^{ab}	6.82±8.34 ^{ab}	14.83±15.7 ^a	52.47±22.93 ^a	17.9±11.37 ^{ab}	4.78±9.81 ^a	2.65±5.93 ^a
	20~40	0.22±0.4 ^a	10.08±12.28 ^a	15.21±16.85 ^a	52.95±19.37 ^a	19.77±14.65 ^a	1.41±2.01 ^a	0.32±0.72 ^a
	40~60	0.16±0.23 ^a	10.22±11.99 ^a	15.8±15.72 ^a	53.63±19.46 ^a	18.08±13.08 ^a	1.84±3.04 ^a	0.29±0.64 ^a
	60~80	0.1±0.18 ^{ab}	7.71±9.06 ^a	14.17±17.58 ^a	51.76±20.88 ^a	20.46±15.57 ^a	3.03±4.9 ^a	2.11±4.73 ^a
	80~100	0.2±0.27 ^a	10.12±12.37 ^a	16.97±15.4 ^a	50.44±23.95 ^a	17.03±10.07 ^a	3.96±7.33 ^a	1.28±2.86 ^a

注:不同小写字母表示同一深度不同下垫面的土壤粒径组成百分比的差异显著($P<0.05$)。

($4.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量最高,显著高于除耕地外的其他4种下垫面($P<0.05$);草地的速效钾($48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量最高,显著高于其他5种下垫面($P<0.05$);河滩地与流动沙地的有机质、速效钾含量分别为 $1.91 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$

与 $2.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $18.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $19.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均显著低于其他4种下垫面($P<0.05$)。各指标在40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm土层中的含量差异性基本与表层土一致,并随土层深度增加呈递减趋势。

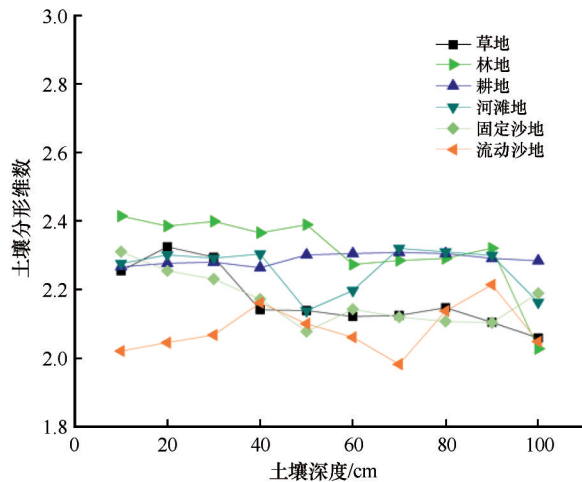


图3 6种下垫面的土壤单重分形维数

Fig.3 Soil single fractal dimension for six underlying surfaces

整体看,土壤单重分形维数与TP、AP、TN含量均呈现极显著正相关($P<0.01$),并与SOM含量极显著正相关($P<0.001$,图4)。土壤有机质与AK、WSB含量极显著正相关($P<0.01$),并与TN、TP、AP含量呈极其显著正相关($P<0.001$)。从各土层来看,土壤单重分形维数与OM、TN、TP含量均呈正相关,并与TK含量呈负相关。

2.3 土壤抗风蚀能力指数(AERI)

研究区各下垫面表层土壤(0~20 cm)的AERI值呈现显著的空间分异性($P<0.05$)。植被覆盖类型AERI表现为林地(1.086)>草地(0.955),主要贡献来源于D和SOM较高,说明乔木群落因深层根系固结土壤和枯落物层改善表层结构,抗蚀能力较草本植被提升13.7%。人为干扰类型AERI表现为耕地(1.012)>固定沙地(0.856),主要贡献来源于SOM和养分综合指数(NPK)差异,说明农业活动通过施肥(NPK提升28.6%)和耕作(容重降低12%)改良土壤理化性质。自然裸露地表AERI表现为河滩地(0.711)>流动沙地(0.675),反映了砂粒含量(>85%)对养分胶结比指数(CNR)的决定性影响,表明土壤结构松散、稳定性较差,抗风蚀能力最弱(表3)。

3 讨论

3.1 土壤粒径组成及养分指标的差异性

本研究区河谷地带土壤类型以风沙土和灌丛草原土为主,其土壤母质构成具有典型的高原河谷

沉积特征。母质来源主要包括第四纪冰川沉积形成的冰碛砾石层、冰水沉积砂层,河流冲积作用形成的现代河床冲积物,坡积-洪积过程产生的风化基岩碎屑与冲积物的混合沉积体。这种多源复合的母质构成,反映了青藏高原东南缘河谷地带独特的地质历史过程和现代沉积环境特征,也从根本上决定了土壤主要由粉粒和较细的砂粒组成^[24]。各风蚀下垫面土壤粒径组成为粉粒(16.9%)、极细砂粒(21.7%)、细砂粒(38.9%)和中砂粒(16.5%),而黏粒、粗砂粒、极粗砂粒总和占比约6%,质地多为砂质壤土和砂土,这与连玉珍等^[25]对西藏林芝地区不同土地利用方式的土壤团聚体研究所得结论相似。土壤粉粒含量与有机质含量均表现为林地>耕地>草地>固定沙地>河滩地>流动沙地。这是由于河滩地与流动沙地几乎没有植被覆盖,遭受风力、水力侵蚀严重,致使土壤质地较粗,不利于土壤有机质的形成和保持,促使该两种下垫面的土壤粒径组成中细砂粒、中砂粒占比最大^[26]。

从垂直角度来看,林地、草地、固定沙地的中砂粒、粗砂粒的占比呈递增趋势,粉粒、极细砂粒占比以及养分含量则呈递减趋势。这是由于林地、草地、固定沙地的浅层土层中分布着植物根须,这些根系能够向土壤中分泌、释放化合物、黏胶物、根细胞脱落物及其分解产物等种类繁多的物质,不仅能够提升复合土体结构的稳定性,还可以改善土壤理化条件和肥力水平,使土壤颗粒被土壤微生物进一步分解、细化,养分也更加容易积累^[27]。随着土层深度递增,土壤根系和微生物活动进一步减少,形成了垂直方向土壤颗粒变粗、养分含量降低的梯度变化现象^[28]。河滩地土壤颗粒分布变化规律与林地、草地、固定沙地相反,粉粒、极细砂粒、细砂粒占比随着土层加深呈上升趋势。这是由于河滩地处于靠近河流的位置,在丰水期常被雨水漫盖、冲刷,较为细小的土壤颗粒将随着水流渗透作用下沉,使浅层土壤颗粒经风力侵蚀变得粗大^[29-30]。而耕地和流动沙地则受人类耕作翻动和风力反复侵蚀搬移的影响,土壤颗粒组成未随深度呈现规律性变化^[31]。

3.2 土壤粒径分形维数特征及养分指标相关性

影响分形维数因素主要包括3个方面,包括气候环境、土壤质地以及人为活动,一般单重分形维数的数值越大,土壤细颗粒占比越高、团粒结构越

表2 6种下垫面的土壤理化指标

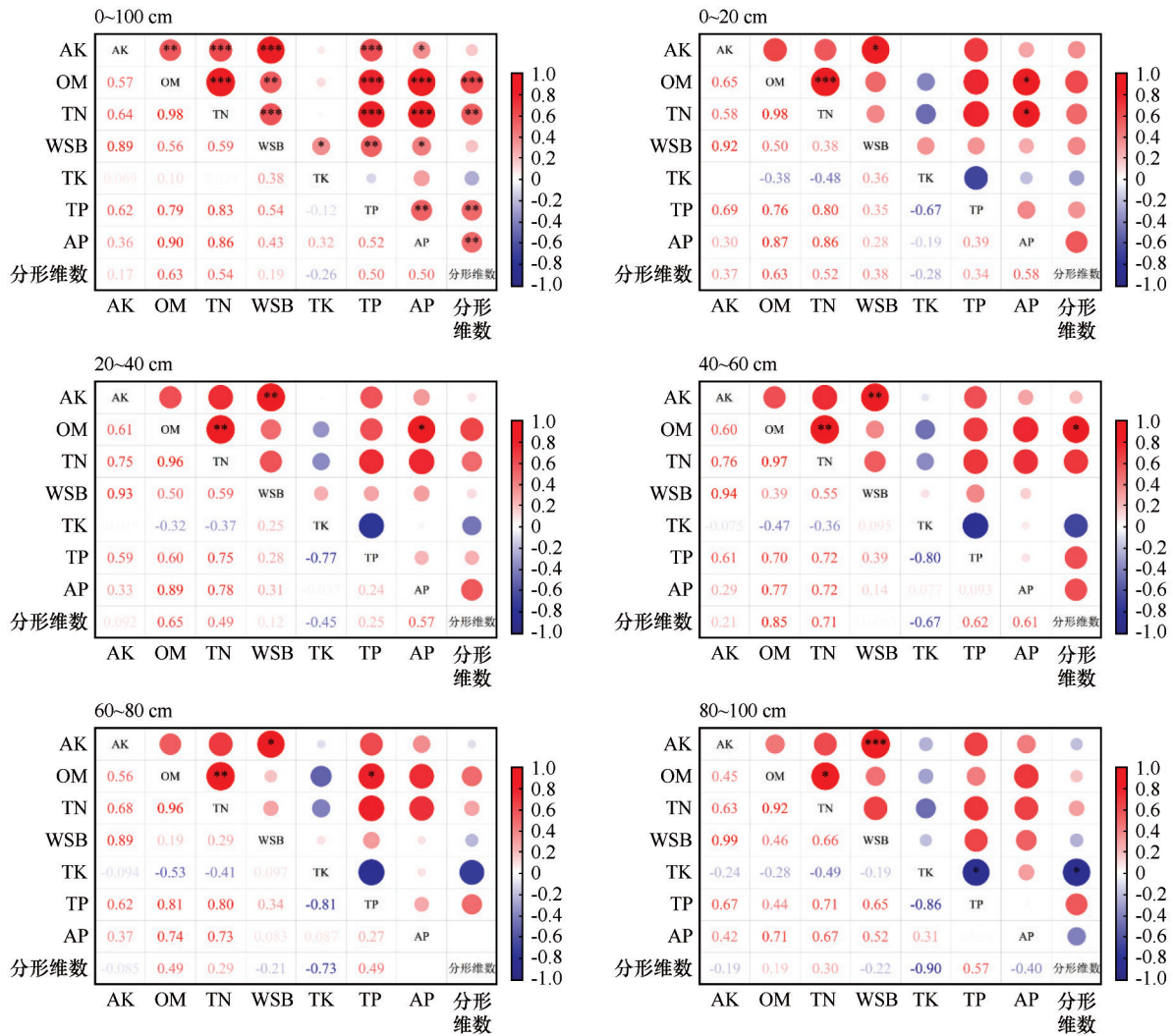
Table 2 Soil physical and chemical indicators for six underlying surfaces

下垫面类型	土层深度/cm	土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	水溶盐/(g·kg ⁻¹)
草地	0~20	8.95±0.7 ^b	50.8±6.14 ^a	20.06±0.8 ^a	0.05±0.01 ^b	0.68±0.11 ^{ab}	2.42±0.62 ^b	0.3±0.1 ^a
	20~40	6.28±0.65 ^b	48±4.95 ^a	19.52±0.92 ^a	0.05±0.01 ^b	0.62±0.1 ^b	2.11±0.29 ^b	0.3±0.1 ^a
	40~60	4.72±0.76 ^b	44.4±4.16 ^a	18.9±0.96 ^a	0.04±0 ^{bc}	0.59±0.1 ^{ab}	1.87±0.2 ^b	0.28±0.08 ^a
	60~80	3.33±0.66 ^b	42.8±4.66 ^a	18.32±1.01 ^a	0.03±0 ^a	0.53±0.09 ^{ab}	1.73±0.15 ^{ab}	0.24±0.09 ^a
	80~100	2.19±0.53 ^{bc}	40.4±3.58 ^a	17.64±1.15 ^a	0.02±0 ^{ab}	0.49±0.08 ^{ab}	1.6±0.13 ^{ab}	0.2±0.1 ^a
林地	0~20	15.53±3.54 ^a	34.13±10.18 ^b	19.35±1.77 ^a	0.09±0.01 ^a	0.65±0.19 ^{ab}	5.62±1.88 ^a	0.24±0.07 ^{ab}
	20~40	11.9±3.15 ^a	32.13±9.49 ^b	18.81±1.7 ^a	0.07±0.01 ^a	0.59±0.13 ^b	4.29±1.8 ^a	0.23±0.09 ^{ab}
	40~60	7.79±1.71 ^a	29±8.45 ^b	18.3±1.65 ^a	0.05±0.01 ^{ab}	0.55±0.1 ^b	3.38±1.2 ^a	0.19±0.08 ^{ab}
	60~80	5.87±1.87 ^a	26.75±7.61 ^b	17.65±1.66 ^a	0.04±0.01 ^a	0.53±0.1 ^{ab}	2.59±0.7 ^a	0.16±0.07 ^a
	80~100	3.89±1.6 ^a	23.75±6.23 ^c	17.29±1.61 ^a	0.03±0.01 ^a	0.47±0.08 ^b	1.98±0.46 ^a	0.15±0.05 ^{ab}
耕地	0~20	13.86±4.74 ^a	38.5±5.8 ^b	16.84±5.35 ^a	0.09±0.02 ^a	0.82±0.21 ^a	3.64±2.33 ^{ab}	0.23±0.05 ^{ab}
	20~40	9.29±3.33 ^a	36.5±5.07 ^b	16.43±5.26 ^a	0.07±0.02 ^a	0.79±0.17 ^a	2.68±1.59 ^{ab}	0.2±0 ^{ab}
	40~60	7.3±2.16 ^a	34±5.89 ^b	15.94±5.34 ^a	0.05±0.01 ^a	0.71±0.17 ^a	2.04±0.89 ^b	0.2±0 ^{ab}
	60~80	5.6±1.18 ^a	32.75±4.43 ^b	15.31±5.05 ^a	0.04±0.01 ^a	0.64±0.11 ^a	1.77±0.66 ^{ab}	0.18±0.05 ^a
	80~100	2.77±0.6 ^{ab}	33.75±3.95 ^b	14.81±5.13 ^a	0.03±0.01 ^a	0.58±0.07 ^a	1.4±0.47 ^{ab}	0.18±0.05 ^{ab}
河滩地	0~20	2.38±0.7 ^c	13.5±3.54 ^d	18.45±0.49 ^a	0.02±0 ^d	0.56±0.08 ^b	1.94±0.39 ^b	0.15±0.07 ^b
	20~40	1.91±0.16 ^d	13±2.83 ^c	18.05±0.49 ^a	0.01±0 ^d	0.53±0.07 ^b	1.43±0.25 ^b	0.15±0.07 ^b
	40~60	1.78±0.1 ^d	14.5±0.71 ^c	17.75±0.49 ^a	0.01±0 ^c	0.51±0.06 ^b	1.23±0.23 ^b	0.15±0.07 ^b
	60~80	1.46±0.34 ^c	12±2.83 ^c	17.2±0.28 ^a	0.01±0 ^c	0.47±0.03 ^b	1.15±0.14 ^b	0.15±0.07 ^a
	80~100	1.33±0.47 ^c	11.5±2.12 ^d	16.75±0.35 ^a	0.01±0 ^d	0.45±0.01 ^b	1.02±0.04 ^b	0.1±0 ^b
固定沙地	0~20	7.06±2.15 ^b	30.67±6 ^{bc}	20.21±2.35 ^a	0.04±0.02 ^{bc}	0.62±0.1 ^{ab}	2.81±1.45 ^b	0.22±0.08 ^{ab}
	20~40	5.48±1.29 ^b	29.33±5.2 ^b	18.8±1.49 ^a	0.04±0.02 ^{bc}	0.57±0.07 ^b	2.46±0.98 ^b	0.22±0.08 ^{ab}
	40~60	3.91±0.9 ^{bc}	28.78±5.95 ^b	18.59±2.04 ^a	0.03±0.01 ^{cd}	0.51±0.07 ^b	2.15±0.94 ^{ab}	0.22±0.08 ^{ab}
	60~80	2.67±0.32 ^{bc}	25.33±5.66 ^b	17.9±2.08 ^a	0.02±0.01 ^b	0.49±0.07 ^b	1.94±0.77 ^{ab}	0.19±0.08 ^a
	80~100	1.79±0.45 ^{bc}	24.22±4.84 ^c	17.6±2.36 ^a	0.02±0 ^{bc}	0.47±0.05 ^b	1.74±0.46 ^a	0.16±0.05 ^{ab}
流动沙地	0~20	3.21±1.18 ^c	20.8±4.6 ^{cd}	20.32±1.75 ^a	0.03±0.01 ^{cd}	0.56±0.03 ^b	2.34±0.71 ^b	0.18±0.08 ^{ab}
	20~40	2.6±1.13 ^{cd}	19.2±4.44 ^c	19.82±1.6 ^a	0.02±0.01 ^{cd}	0.52±0.03 ^b	2.15±0.57 ^b	0.16±0.05 ^b
	40~60	2.27±1.01 ^{cd}	18±3.81 ^c	19.12±1.58 ^a	0.02±0.01 ^{de}	0.49±0.05 ^b	1.89±0.58 ^b	0.14±0.05 ^b
	60~80	1.73±0.82 ^{bc}	16.6±2.7 ^c	18.46±1.55 ^a	0.02±0.01 ^{bc}	0.46±0.04 ^b	1.65±0.42 ^{ab}	0.14±0.09 ^a
	80~100	1.17±0.41 ^c	15±2.83 ^d	17.8±1.66 ^a	0.01±0 ^{cd}	0.44±0.04 ^b	1.37±0.36 ^{ab}	0.12±0.04 ^{ab}

注:不同小写字母表示同一深度不同下垫面的土壤粒径组成百分比的差异显著($P<0.05$)。

复杂,其肥力特性与结构稳定性也就越出色^[32]。各下垫面单重分形维数均值均低于同类型平均水平,这可能是由于研究区平均海拔达3 000 m,浅层土壤长期遭受冻融循环,在物理崩解作用下将形成粗颗粒碎屑而非黏土矿物^[33]。除耕地、河滩地外,其他下垫面的土壤分形维数基本遵循生态系统复杂程

度和植被覆盖率梯次排布,这符合科学基本规律与人们普遍认知^[34]。耕地土壤分形维数常受耕作种植、人类活动等因素影响,通常具有较强的偶然性^[35]。河滩地土壤是由丰水期河道泥沙在水流裹挟作用下聚集沉降形成,土壤经反复冲蚀变得更为细腻,使其在几乎没有任何植被覆盖的情况下,仍



注：*表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$), ***表示极其显著相关($P < 0.001$)。

图 4 土壤单重分形维数与理化指标的相关性

Fig.4 Correlation between soil single fractal dimension and physical and chemical indicators

表 3 6种下垫面土壤抗风蚀能力

Table 3 Wind erosion resistance of 6 underlying soil types

下垫面类型	土壤分形维数	土壤有机质/%	养分胶结比	养分综合指数	气候修正因子	土壤抗风蚀能力指数
草地	2.290	0.895	0.015	0.696	0.915	0.955
林地	2.400	1.553	0.027	0.597	0.915	1.086
耕地	2.272	1.386	0.014	0.575	0.915	1.012
河滩地	2.289	0.238	0.005	0.165	0.915	0.711
固定沙地	2.283	0.706	0.014	0.423	0.915	0.856
流动沙地	2.033	0.321	0.007	0.249	0.915	0.675

拥有较高水平的分形维数^[36]。

土壤单重分形维数与 SOM 含量极显著正相关 ($P < 0.001$), 与 TP、AP、TN 含量呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 这可能是由于土壤有机质作为团聚体中的胶结剂, 有助于促使形成良好的黏性结构, 改善

土壤孔隙状况以及水、气比例, 为土壤微生物分解提供了所需的能量和养分环境, 使土壤结构更加复杂、粒径更加均匀, 为积累有机质、保持肥力提供了正向条件^[37]。土壤单重分形维数与土壤有机质含量之间存在显著的相关性, 并与土壤质地呈正相

关。本文土壤单重分形维数与TK、AK表现出极低的相关性,这可能是由于钾含量远高于其他土壤指标,且多取决于母质成土和风化程度,因此未与分形维数呈现统计学上的相关意义^[38]。较差的地表植被和土壤有机质积累条件(外力侵蚀),会促使某一粒级颗粒体积分数过高和过低,导致土壤养分物质流失,砂粒质量分数增大,促使分形维数数值表现越低。在进行高精度的风蚀模型构建过程中,往往需要考虑复杂的环境条件和土壤质地等因子,未来可考虑基于土壤分形维数构建结构式简便、运算量较低的沙尘释放公式和风蚀方程^[39]。

3.3 土壤抗风蚀能力

现有研究已经证明,黏粒含量对土壤抗风蚀性具有重要意义,能显著提升土壤结构稳定性和起沙风速^[40]。相较于同样分布着大量风蚀沉积物的黄土高原、乌兰布和沙漠,研究区河谷地带的土壤黏粒含量极低。这可能是由于该地雨季集中在夏季,长期干燥和辐射将显著抑制深层化学风化,阻碍黏粒形成^[41]。同时,该地处于高原温带半湿润季风气候,河谷地形产生“狭管效应”,使春、冬季节长期盛行东(北)风,强劲的风力吹蚀及冻融循环作用等原因都会造成粉粒减少、砂粒富集的现象。值得关注的是,通过2024年长期连续野外观测,该地河谷区在风季以东(北)风为主,这与许多文献当中描述该地盛行西南风的情况不符^[42]。

本研究通过整合土壤分形维数、土壤养分(氮、磷、钾)对团聚体稳定性和生物胶结的贡献等因子,对雅鲁藏布江米林河谷区不同风蚀下垫面的AERI计算分析,揭示了该区域土壤抗风蚀能力的空间分布特征及其与土壤参数之间的关系,为研究土壤风蚀机理提供了重要依据和新思路,以期能够为该区域的生态环境保护和风蚀防治工作提供更加全面有效科学指导和技术支持^[43]。林地的高AERI验证了乔灌草立体配置的防沙效益,但需警惕速生树种导致的浅层根系风险;耕地的高值具有欺骗性,长期耕作可能导致有机质持续流失(年均递减0.2%);河滩地和流动沙地则成为该区域土壤风蚀防治的重点区域^[44]。考虑到氮促进微生物活动增强团聚体稳定性,磷通过化学胶结减少颗粒分散,钾则抑制土壤干裂。因此,本模型新增了养分综合指数(NPK),综合考虑TN、AP和AK对土壤抗风蚀能力的提升作用。

4 结论

各下垫面土壤黏粒含量均低于1%,且分形维数数值远低于其他典型沙化地区平均水平,这主要归结于雅江地区独特的气候条件和河谷地形。研究区地处高海拔地区,不仅昼夜温差极大,冻融现象普遍,而且降水集中在5—9月,土壤长期处于干旱,使表层土壤的化学风化能力降低,促使物理崩解形成粗颗粒碎屑而非黏土矿物。河谷区在“狭管”地形下瞬时风力可超 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,盛行长达近6个月的东北季风,黏粒不易积累。

林地、草地、固定沙地、流动沙地的分形维数数值符合生态系统复杂程度排次,而耕地和河滩地则未遵循该原则和常识。耕地的土壤分形维数受人类生产活动影响,具有较强的偶然性;河滩地则多由河道泥沙裹挟而成,长期遭受水流、雨水反复冲刷,导致土壤颗粒物更为细腻,在近乎裸地的情况下,分形维数表现与林地相近。同时,在不同下垫面土壤的物理结构的支撑作用以及生化过程的协同增效下,土壤分形维数与养分指标表现出较强的相关性。

基于分形维数建立的抗风蚀能力指数,反映了土壤粒径的结构、分布、异质性等多指标水平,能够用于表征土壤质量水平、荒漠化演变规律及进程。未来可以进一步探讨地形、土壤湿度等其他参数对土壤抗风蚀能力的影响,利用风洞实验、野外观测、统计检验等方法进一步标定和校准各权重系数,探究不同气候条件下土壤抗风蚀能力的变化规律,增强该模型的准确性和实时性。此外,分形维数还有望代替复杂的环境条件和土壤质地等因子,构建沙尘释放的风蚀耦合模型。

参考文献:

- [1] Yang J H, Xia D S, Wang S Y, et al. Near-surface wind environment in the Yarlung Zangbo River basin, southern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(6): 917–936.
- [2] 董玉祥, 李森, 董光荣. 雅鲁藏布江流域土地沙漠化现状与成因初步研究: 兼论人为因素在沙漠化中的作用 [J]. *地理科学*, 1999, 19(1): 35–41.
- [3] Ling Z Y, Li J S, Jin J H, et al. Geochemical characteristics and provenance of Aeolian sediments in the Yarlung Tsangpo valley, southern Tibetan Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80: 623.
- [4] 刘慧, 李晓英, 夏翠珍, 等. 雅鲁藏布江河谷加查—米林段沙丘成因 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(3): 16–26.

- [5] 孙明,沈渭寿,李海东,等.雅鲁藏布江源区风沙化土地演变趋势[J].自然资源学报,2010,25(7):1163-1171.
- [6] Samahadthai P, Vityakon P, Saenjan P. Effects of different quality plant residues on soil carbon accumulation and aggregate formation in a tropical sandy soil in Northeast Thailand as revealed by a 10-year field experiment[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(5): 463-473.
- [7] 廖红建,刘少华,何玉琪,等.黄土孔径和持水特性的分形维数研究[J].西北大学学报(自然科学版),2022,52(3):416-422.
- [8] 周娜,张春来,刘永刚.雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘粒度分异特征研究[J].地理研究,2012,31(1):82-94.
- [9] Gao G, Ding G, Zhao Y, et al. Effects of soil particle size classification system on calculating volume-based fractal dimension[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(6): 1060-1068.
- [10] 袁磊,沈渭寿,李海东,等.雅鲁藏布江中游河谷区域风沙化土地演变趋势及驱动因素[J].生态与农村环境学报,2010,26(4):301-305.
- [11] Du S S, Wu Y Q, Tan L H, et al. Geochemical characteristics of fine and coarse fractions of sediments in the Yarlung Zangbo River Basin (southern Tibet, China)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77: 337.
- [12] 张正偲,董治宝.风沙地貌形态动力学研究进展[J].地球科学进展,2014,29(6):734-747.
- [13] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报,2011,27(1):340-347.
- [14] Wang Y Y, He Y J, Zhang J, et al. Identification of soil particle size distribution in different sedimentary environments at river basin scale by fractal dimension[J]. *Scientific Reports*, 2020, 12(1): 10960.
- [15] 潘美慧,薛雯轩,伍永秋,等.西藏定结地区爬坡沙丘粒度特征分析[J].干旱区地理,2019,42(6):1337-1345.
- [16] 李海东,沈渭寿,邹长新,等.雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征[J].生态学报,2012,32(16):4981-4992.
- [17] 赵萌萌,张根,古明双.基于USLE和GIS对雅鲁藏布江贡嘎段流域水土流失敏感度的评价[J].长江信息通信,2023,36(4):60-62.
- [18] 谭杰峻,邓健,范建容,等.雅鲁藏布江中游地区小流域土壤侵蚀分级指标研究[J].中国水土保持,2019,(8):56-59+69.
- [19] 王薇,邬光剑,范丽行,等.2000-2020年雅鲁藏布江中部流域大气气溶胶时空变化及影响因素[J].环境科学,2024,45(12):7003-7011.
- [20] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
- [21] Zou X Y, Zhang C L, Cheng H, et al. Cogitation on developing a dynamic model of soil wind erosion[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(3): 337-348.
- [22] Liu H, Ding G, Gong H, et al. Wind erodibility of alpine sandy soils in the Yarlung Zangbo River valley: Improved assessment based on the Chepil equation[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 897: 165432.
- [23] 王学林,高广磊,丁国栋,等.沙地樟子松人工林土壤酶活性研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(1):114-120.
- [24] Bateman M D, Bryant R G, Foster I D L, et al. On the formation of sand ramps: A case study from the Mojave Desert[J]. *Geomorphology*, 2012, 161(1): 93-109.
- [25] 连玉珍,刘合满,曹丽花,等.西藏林芝不同土地利用方式的土壤团聚体及其有机碳分布[J].浙江农业学报,2019,31(8):1353-1360.
- [26] 王晓枝,董治宝,南维鹤,等.拉萨河谷爬坡沙丘沉积物特征[J].中国沙漠,2022,42(4):22-31.
- [27] 宛倩,王杰,王向涛,等.青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响[J].生态学报,2022,42(5):1716-1726.
- [28] Wang J, Zhao W W, Wang Guan, et al. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau (China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 144833.
- [29] Ojekanmii A A, Chang S X. Soil quality assessment for peat-mineral mix cover soil used in oil sands reclamation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(5): 1566-1575.
- [30] 吴启堂.环境土壤学[M].北京:中国农业出版社,2011.
- [31] 刘志强,高吉喜,田美荣,等.生态修复区植物群落土壤粒径的分形特征[J].生态学杂志,2017,36(2):303-308.
- [32] 李爱敏,韩致文.新月形沙丘形态参数与移动速度的关系[J].中国沙漠,2020,40(1):29-40.
- [33] Wei Y J, Wu X L, Xia J W, et al. Variation of soil aggregation along the weathering gradient: comparison of grain size distribution under different disruptive forces[J]. *PLoS One*, 2016, 11(8): e0160960.
- [34] Cheng Y T, Xu G C, Wang X K, et al. Contribution of soil aggregate particle size to organic carbon and the effect of land use on its distribution in a typical small watershed on Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155, 110988.
- [35] Yang Z L, Qian G Q, Dong Z B, et al. Migration of barchan dunes and factors that influence migration in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Sand Sea, China[J]. *Geomorphology*, 2021, 378: 107615.
- [36] Sun K, Wang H, Pei Z Y, et al. Particle-size fractal dimensions and pore structure characteristics of soils of typical vegetation communities in the Kubuqi Desert[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 10, 1044224.
- [37] Ruhlmann J, Martin K. Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 2. predicting the effect of the mineral composition of particle-size fractions[J]. *Geoderma*, 2020, 375: 114543.
- [38] Liu Y Y, Gong Y M, Wang X, et al. Volume fractal dimension of soil particles and relationships with soil physical-chemical properties and plant species diversity in an alpine grassland under different disturbance degrees[J]. *Journal of Arid Land*,

- 2013, 5(4):480–487.
- [39] Wang Z R, Hasi E, Han X J, et al. Fractal characterization of soil particle size distribution under different land use patterns on the north slope of Wula Mountain in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(3):1148–1164.
- [40] Bai Y F, Qin Y, Lu X R, et al. Fractal dimension of particle-size distribution and their relationships with alkalinity properties of soils in the western Songnen Plain, China [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):20603.
- [41] 魏茂宏, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3):679–686.
- [42] Stéphane C. Alfaro. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion [J]. *Geomorphology*, 2008, 93(3/4):157–167.
- [43] Feng X, Qu J J, Tan L H, et al. Fractal features of sandy soil particle-size distributions during the rangeland desertification process on the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20, 472–485.
- [44] 董苗, 严平, 王晓旭, 等. 共和盆地多石在沟爬坡沙丘沉积物特征及环境意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(5):79–86.

Fractal dimension characteristics of soil particle size distribution and wind erosion resistance in the middle-lower reaches of the Yarlung Zangbo River wide valley

Wang Xuelin, Chen Jiangbo, Liu Hao, Gong Hang, Wang Hanzhuo,
Ding Guodong, Zhao Yuanyuan

(School of Soil and Water Conservation / Ningxia Yanchi Maowusu Ecosystem National Positioning Observation Research Station / Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation / MOE Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Extensive aeolian depositional landforms with distinct regional characteristics are developed in the mid-lower Yarlung Zangbo River valley. To investigate the potential dust emission capacity of different underlying surfaces in this valley region, soil samples from six land cover types (forest, grassland, cropland, riparian land, fixed sandland, and mobile sandland) were collected in the Milin section. Particle Size Distribution (PSD) analysis and the Anti-Erosion Rating Index (AERI) were applied to assess dust dynamics and inform ecological restoration strategies. The main results are as follows: (1) Valley soils exhibit extremely low clay content (<1%), dominated by fine sand (39.9%), and classified as sandy loam, loamy sand, or sand. Soil texture coarsens with depth. (2) Monofractal dimension values ranked: forest (2.315) > cropland (2.289) > riparian land (2.261) > grassland (2.171) > fixed sandland (2.165) > mobile sandland (2.084), significantly lower than typical values for analogous soils. Monofractal dimension showed strong positive correlations with organic matter (SOM) ($P < 0.001$), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), and total nitrogen (TN) ($P < 0.01$), indicating nutrient enrichment via physicochemical interactions with fine particles (clay/silt). (3) Significant spatial heterogeneity in AERI ($P < 0.05$) was observed: forest (1.086) > cropland (1.012) > grassland (0.955) > fixed sandland (0.856) > riparian land (0.711) > mobile sandland (0.675). Vegetation and agriculture improved soil properties (D, SOM), while sandy exposed surfaces (Sand% > 85%) showed minimal erosion resistance. This study demonstrates that fractal theory effectively characterizes soil quality evolution across heterogeneous surfaces, providing critical data for dust emission research and soil texture improvement in the Yarlung Zangbo River valley.

Key words: Yarlung Zangbo River; particle-size distribution; fractal theory; nutrient characteristics; aeolian erosion resistance