

# 贺兰山低山区土壤抗蚀性的空间差异性

王雅芳<sup>1,2</sup>, 李国旗<sup>1,2</sup>, 刘秉儒<sup>3</sup>, 倪细炉<sup>1,2</sup>, 顾清敏<sup>4</sup>

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021; 3. 北方民族大学 生物科学与工程学院, 宁夏 银川 750021; 4. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司 羊场湾煤矿, 宁夏 灵武 751400)

**摘要:** [目的] 对宁夏回族自治区贺兰山低山区表层土壤抗蚀性空间变化特征进行分析, 为该区的环境保护、生态建设及生态治理提供科学依据。[方法] 通过对贺兰山低山区不同海拔表层土壤进行野外取样与室内测定分析, 运用统计学方法筛选出表层土壤可蚀性关键因子, 构建贺兰山低山区土壤抗蚀性综合评价模型, 并采用该模型对贺兰山海拔 1 300~1 800 m 区域土壤抗蚀性强弱进行研究。[结果] ①土壤含水率、总孔隙度、黏粒、粉粒含量以及分形维数与海拔具有显著正相关关系, 容重和砂粒含量与海拔为显著负相关关系, 这 7 个土壤因子均为中度、弱度变异性, 可初步选为土壤可蚀性影响因子; ②土壤孔隙特征类与土壤粒径类影响因子之间存在明显显著相关并相互影响, 因子之间存在明显的信息重叠现象; ③通过构建土壤抗蚀性综合评价模型, 随着贺兰山海拔高度由 1 800 m 降低为 1 300 m, 其土壤抗蚀性由强到弱, 且与海拔呈显著正相关关系。[结论] 贺兰山低山区土壤性质和土壤抗蚀性与海拔显著相关, 可通过制定专门的保护措施与土壤修复方案改善土壤的结构与质量, 加强土壤抗蚀性, 促进该区域生态建设和增强水土保持功能。

**关键词:** 贺兰山; 海拔; 土壤抗蚀性; 主成分分析

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)01-0066-07

**中图分类号:** S157.1

**文献参数:** 王雅芳, 李国旗, 刘秉儒, 等. 贺兰山低山区土壤抗蚀性的空间差异性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 66-72. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.010; Wang Yafang, Li Guoqi, Liu Bingru, et al. Spatial variations in soil erosion resistance in low elevation areas of Helan Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 66-72.

## Spatial Variations in Soil Erosion Resistance in Low Elevation Areas of Helan Mountains

Wang Yafang<sup>1,2</sup>, Li Guoqi<sup>1,2</sup>, Liu Bingru<sup>3</sup>, Ni Xilu<sup>1,2</sup>, Gu Qingmin<sup>4</sup>

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in

Northwest China, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Key Laboratory for Recovery and

Restoration of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan,

Ningxia 750021, China; 3. College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021,

China; 4. National Energy Group Ningxia Coal Industry Co., Ltd. Yangchangwan Coal Mine, Lingwu, Ningxia 751400, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial variations in surface soil erosion resistance in the low elevation areas of the Helan Mountains in Ningxia Hui Autonomous Region were analyzed to provide useful references to environmental protection and ecosystem management and construction in this ecologically vulnerable area. [Methods] A field survey and laboratory measurements of the surface soil samples collected across the low elevation area of the Helan Mountains were conducted. The key factors determining surface soil erodibility were identified and a comprehensive evaluation model of soil erosion resistance was constructed to analyze the soil erosion resistance in the areas 1 300—1 800 m in elevation. [Results] ① The soil moisture content, total porosity, clay, silt content, and fractal dimension had significantly positive correlations with elevation and the bulk density and sand content had significantly negative correlations with elevation. These seven soil factors

收稿日期: 2020-07-06

修回日期: 2020-10-05

**资助项目:** 国家重点研发项目“矿区生态修复与生态安全保障技术集成示范研究”(2017YFC0504406); 中央引导地方科技创新项目“气候变化背景下贺兰山生物多样性保育与生态服务功能提升”; 宁夏重点研发计划项目“贺兰山保护区采煤迹地生态修复技术与模式研究项目”(2018BFG02002)

**第一作者:** 王雅芳(1996—), 女(汉族), 山西省高平市人, 硕士研究生, 主要从事旱区植物生态学研究。Email: 1491373584@qq.com。

**通讯作者:** 李国旗(1965—), 男(汉族), 宁夏回族自治区平罗县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事植物生态学研究。Email: guoqilee@163.com。

showed variability at weak or moderate levels. Therefore, they can be selected as the influencing factors of soil erodibility. ② Significant correlations between the influencing factors of soil porosity and soil particle size were found, suggesting information redundancy. ③ The comprehensive evaluation model of soil erosion resistance suggested that soil erosion resistance weakened as the elevation decreased from 1800 to 1300 m, showing a significantly positive correlation with elevation. [Conclusion] The soil properties and soil erosion resistances were significantly related to elevation in the low elevation area of the Helan Mountains. Special protection measures and soil remediation programs should be formulated to improve the soil structure and quality, strengthen soil erosion resistance, and enhance the functioning of soil and water conservation.

**Keywords:** Helan Mountains; elevation; soil erosion resistance; principal component analysis

土壤侵蚀是指土壤受到水蚀、风蚀和人类活动等外界因素以及土壤内在因素影响,其自身被破坏、搬离和沉积的过程。在土壤侵蚀过程中,土壤自身对侵蚀产生变异性,称为土壤可蚀性。土壤可蚀性是衡量土壤内在属性对侵蚀敏感程度的重要指标<sup>[1]</sup>,广泛应用于国内外土壤侵蚀研究<sup>[2-4]</sup>。土壤可蚀性常用于定量评价土壤侵蚀和水土流失<sup>[1,5-6]</sup>,通过土壤流失量或侵蚀量和土壤侵蚀预报模型中必要参数等的计算<sup>[7-9]</sup>,评价土壤抵抗侵蚀能力和水土保持功能。土壤可蚀性既受土壤内在性状(物理、化学性状等)影响,也受外在因子(地形因素、土壤覆被类型、土壤利用类型等)的影响。在山地生态系统中,土壤可蚀性主要受海拔和坡向影响<sup>[10]</sup>。坡向和海拔可以体现山地环境因子变化的主要内容,不同海拔和坡向间土壤水热状况以及植被状况的差异性影响土壤的形成,影响山地土壤的性质,从而造成土壤抗侵蚀能力的差异<sup>[11]</sup>。

国内外学者通过大量研究分析,提出一系列可以作为土壤抗侵蚀指标的因子。张爱国等<sup>[12]</sup>发现容重、粉/黏、有机质含量是全国范围内水蚀过程中反映土壤可蚀性的重要因子,并且这些因子具有较明显的空间分异规律。单奇华等<sup>[13]</sup>分析得到南京城市林业土壤可蚀性与土壤体积质量和机械组成最为密切。杨帆等<sup>[14]</sup>通过分析得出北京市延庆县不同土地利用方式下的土壤侵蚀的主导因素是土壤中黏粒含量、有机质和水稳性团聚体。朱德雯<sup>[15]</sup>研究发现川西高寒山地不同海拔梯度土壤养分含量与砂粒百分含量有负相关关系,土壤抗蚀性与黏粒百分含量为正相关关系。归纳可知,基于土壤内在属性的土壤可蚀性因子(孔隙、粒径分布、有机质含量等)对土壤可蚀性起决定性作用。然而,由于学者们对于土壤可蚀性的研究的着重点各有不同,因此至今尚未形成完整的土壤可蚀性因子评价体系。

贺兰山是中国西北干旱区最后一道生态屏障,其生态安全直接影响着西北、华北乃至全国的生态安全<sup>[16-17]</sup>。贺兰山位于草原与荒漠的交错区,低山区植被稀疏,植株矮小,盖度低,母质为洪积物,生态环境

较为脆弱<sup>[18-20]</sup>。贺兰山低山区地表剥蚀较严重,多为干燥剥蚀山地,物理分化强烈,年平均风速为7.5 m/s,大风日数达157.7 d,最大风速为38.7 m/s,易风蚀沙化。目前对于贺兰山的研究主要集中在生物多样性、群落特征、植被景观生态等方面,而对低山区土壤质地与结构及抗蚀性的研究几乎没有<sup>[21-23]</sup>。由于不同海拔的气候、植被类型、土壤理化性质等的不同,土壤侵蚀程度不同。本研究以贺兰山低山区2个植被垂直带,6个海拔的表层土壤为研究对象,以孔隙特征类因子(容重、孔隙度、含水量)和粒径类因子(砂粒、粉粒、黏粒、分形维数)2类土壤因子为指标,探求:①贺兰山低山区土壤因子的空间分布与变异特征;②贺兰山低山区土壤可蚀性影响因子间的相关性;③选取贺兰山低山区土壤可蚀性关键因子及建立评价模型。通过构建土壤抗蚀性综合评价模型,定量评价贺兰山低山区土壤侵蚀和水土流失,为贺兰山的环境保护、生态建设及生态治理提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区贺兰山国家自然保护区,地理位置105°49′—106°41′E;38°19′—39°22′N,东接银川平原,西侧和北侧与阿拉善戈壁荒漠相接,位于温带草原与荒漠的交错带。贺兰山地处中国西北中温带气候区,为典型温带大陆性气候并具有山地气候特征。无霜期229 d,春季风大、沙多,气候变化大,年均温-0.8℃。年均降水量420 mm,年均蒸发量2 000 mm,降雨集中在7—9月,占全年降水量的70%~80%。低山区气温变化剧烈,干旱少雨,为显著大陆性气候。山地植被和土壤具有明显的空间分异规律,海拔由低到高,植被可划分为山前荒漠与荒漠草原带(海拔1 600 m以下)、山麓与低山草原带(海拔1 600 m~1 800 m)、中山和亚高山针叶林带(海拔1 800 m~3 100 m)和高山与亚高山灌丛、草甸带(海拔3 100 m以上)4个垂直带<sup>[19]</sup>,土壤划分为棕钙土—灰褐土—高山、亚高山灌丛、草甸土3个带。

## 1.2 样地设计与样品采集

经过对研究区前期调查研究,于 2019 年 9 月,从海拔 1 300 到 1 800 m,每隔 100 m 设置 1 个取样点,在阳坡选取群落生境相对均匀的地方,设置 3 个 5 m × 5 m 的大样方,在每个大样方内沿对角线布置 3 个 1 m × 1 m 的小样方,在每个小样方中用 20 cm × 20 cm × 10 cm 的取样器采用五点取样法取样。采集的土样一部分装入进行土壤含水量和容重测定,另一部分置于塑封袋内,带回实验室自然风干后用于土壤粒度测定分析。在该海拔区内主要土壤类型为粗骨土和山地灰钙土<sup>[17]</sup>。

## 1.3 测定方法

(1) 土壤含水率采用烘干法测定,采样后立即记录土样鲜重,带回实验室烘箱烘干至恒重;土壤总孔隙度、容重采用环刀法测定。

(2) 土壤粒度分析。将土样自然风干,过 2 mm 筛,并去除树根等杂物,使用激光衍射粒度分析仪进行土壤粒径分布(PSD)的测定。土壤粒径分布采用美国标准:黏粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、砂粒(50~2000 μm)和石砾(2 000~3 000 μm)。

## 1.4 数据统计与分析

土壤物理性质计算公式为:

$$\text{土壤含水量} = \frac{\text{原土质量} - \text{烘干质量}}{\text{烘干土质量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{土壤容重} = \frac{\text{干土重}(\text{g})}{\text{体积}(\text{cm}^3)} = \frac{g \cdot 100}{V \cdot (100 + W)} \quad (2)$$

式中: $g$  表示环刀内湿样重; $V$  表示环刀内容积; $W$  表示样品内含水百分数。单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

$$\text{土壤孔隙度} = \left(1 - \frac{\text{容重}}{\text{比重}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

土壤粒径分形维数的计算:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (4)$$

式中: $D$  表示土壤颗粒分形维数; $r$  表示土壤粒径( $\mu\text{m}$ ); $R_i$  表示粒径等级  $i$  的土壤粒径( $\mu\text{m}$ ); $V_T$  表

示土壤颗粒总体积(%); $R_{\max}$  表示土壤粒径的极大值( $\mu\text{m}$ ); $V$  表示土壤粒径小于  $R_i$  的土壤体积百分量。其中粒级 < 2  $\mu\text{m}$  时; $R_i$  取值为 1  $\mu\text{m}$ 。

变异系数的划分标准为: $C_v \leq 10\%$  表示呈弱变异性, $10\% < C_v \leq 100\%$  表示呈中度变异性,和  $C_v > 100\%$  表示呈高度变异性<sup>[24]</sup>。

试验数据在 Excel 表格中进行初步处理、数据整理及图表制作,用 SPSS 17.0 进行统计分析、相关分析和主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤因子的空间分布与变异特征

#### 2.1.1 土壤孔隙特征类因子的空间分布与变异特征

由表 1 可知,在两个植被带中,土壤含水率均呈中度程度变异,容重和总孔隙度同属于弱度变异性。由图 1 可知,土壤含水率与海拔具有正相关性,即土壤水分含量随着海拔高度的增加而增加,表现为海拔 1 800 m 处最高,海拔 1 300 m 处最低。山前荒漠与荒漠草原带含水率变化范围 1.14%~1.49%,平均值为 1.31%;山麓与低山草原带含水率变化范围 2.25%~5.14%,平均值为 4.04%。随着海拔高度的增加,土壤容重降低,表现为海拔 1 300 m 处最高,海拔 1 800 m 处最低。山前荒漠与荒漠草原带容重变化范围 1.56~1.69  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,平均值为 1.61  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;山麓与低山草原带容重变化范围 1.50~1.53  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,平均值为 1.52  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。随着海拔高度降低土壤总孔隙度也降低,表现为海拔 1 300 m 处最低,海拔 1 800 m 处最高。山前荒漠与荒漠草原带总孔隙度变化范围 36.35%~41.04%,平均值为 39.41%;山麓与低山草原带总孔隙度变化范围 42.39%~43.25%,平均值为 42.72%。土壤孔隙特征类因子的空间分布表现为:含水率:山前荒漠与荒漠草原带 < 山麓与低山草原带;容重:山前荒漠与荒漠草原带 > 山麓与低山草原带;总孔隙度:山前荒漠与荒漠草原带 < 山麓与低山草原带。

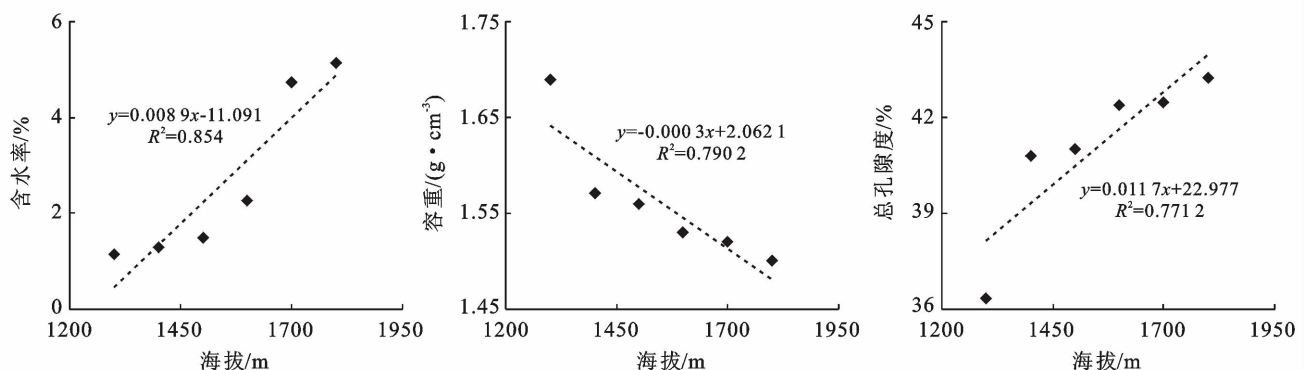


图 1 贺兰山低山区土壤孔隙特征类因子的空间分布特征

表 1 贺兰山低山区土壤因子变异系数

植被带类型	因子	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数/%
山前荒漠与 荒漠草原带	含水率/%	1.14	1.49	1.31	0.18	13.44
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.56	1.69	1.61	0.07	4.50
	总孔隙度/%	36.35	41.04	39.41	2.65	6.72
	黏粒含量/%	1.81	3.16	2.38	0.70	29.48
	粉粒含量/%	30.94	51.35	39.48	10.60	26.85
	砂粒含量/%	45.5	66.9	58.15	11.22	19.29
山麓与低 山草原带	含水率/%	2.25	5.14	4.04	1.56	38.7
	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.50	1.53	1.52	0.02	1.01
	总孔隙度/%	42.39	43.25	42.72	0.47	1.10
	黏粒含量/%	2.00	3.72	2.98	0.88	29.68
	粉粒含量/%	34.79	53.31	46.34	10.07	21.74
	砂粒含量/%	43.47	63.22	50.68	10.90	21.50

2.1.2 土壤粒径类因子的空间分布与变异特征 由表 1 可知,在两个植被带中,土壤黏粒、粉粒和砂粒百分含量均呈中度程度变异。根据表层土壤粒径分布的测定结果计算分形维数。结果发现,贺兰山低山区不同海拔的土壤颗粒的分形维数为 2.471 4~2.543 3。由图 2 可知,黏粒百分含量与海拔具有正相关性,即黏粒百分含量随着海拔高度的增加而增加。山前荒漠与荒漠草原带黏粒百分含量变化范围 1.81%~3.16%,平均值为 2.38%;山麓与低山草原带黏粒百分含量变化范围 2.00%~3.72%,平均值为 2.98%。

随着海拔高度的增加,粉粒百分含量呈现出增长趋势。山前荒漠与荒漠草原带粉粒百分含量变化范围为 30.94%~51.35%,平均值为 39.48%;山麓与低山草原带粉粒百分含量变化范围为 34.79%~53.31%,平均值为 46.34%。

随着海拔高度降低土壤总孔隙度也降低。山前荒漠与荒漠草原带砂粒百分含量变化范围为 45.50%~66.90%,平均值为 58.15%;山麓与低山草原带砂粒百分含量变化范围为 43.47%~63.22%,平均值为 50.68%。

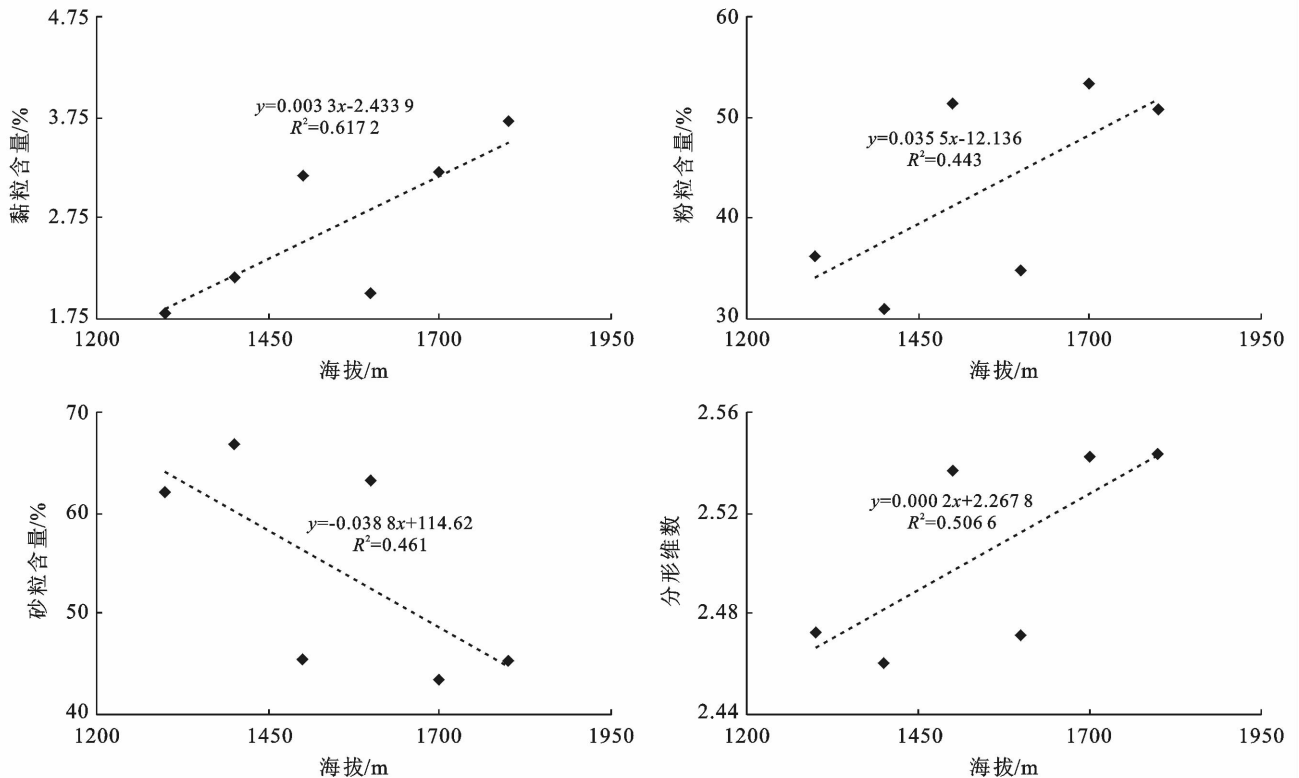


图 2 贺兰山低山区土壤粒径类因子的空间分布

土壤粒径类因子的空间分布表现为如下。黏粒百分含量:山前荒漠与荒漠草原带<山麓与低山草原带;砂粒百分含量:山前荒漠与荒漠草原带>山麓与低山草原带;粉粒百分含量:山前荒漠与荒漠草原带<山麓与低山草原带。含水率、容重和总孔隙度等 3 个土壤孔隙特征类因子与黏粒、粉粒、胶粒、砂粒和分形维数等 4 个粒径类因子均为中度、弱度变异性,可初选为土壤可蚀性影响因子。

## 2.2 土壤可蚀性影响因子间的相关性

通过对山前荒漠与荒漠草原带土壤因子之间的相关性分析(表 2),可以看出含水率与容重呈显著负相关、与黏粒百分含量呈显著正相关( $p < 0.05$ );容重与总孔隙度呈显著负相关( $p < 0.05$ );黏粒百分含量与粉粒百分含量和分形维数呈显著正相关、与砂粒百分含量呈显著负相关( $p < 0.05$ );粉粒百分含量与分形维数呈极显著正相关、与砂粒百分含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ );砂粒百分含量与分形维数呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。

而山麓与低山草原带土壤因子之间的相关性分析(表 2),可以看出含水率与黏粒百分含量、分形维数呈极显著正相关( $p < 0.05$ ),与粉粒百分含量呈显著正相关、与砂粒百分含量呈显著负相关( $p < 0.05$ );容重与总孔隙度、黏粒百分含量呈显著负相关( $p < 0.05$ );黏粒百分含量与粉粒百分含量和分形维数呈显著正相关、与砂粒百分含量呈显著负相关( $p < 0.05$ );粉粒百分含量与分形维数呈极显著正相关、与砂粒百分含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ );砂粒百分含量与分形维数呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。

在 2 个植被带中,均呈现含水率与黏粒百分含量之间、容重与总孔隙度之间以及粒径类因子(黏粒、粉粒、砂粒百分含量和分形维数)之间具有显著相关性( $p < 0.05$ )。土壤孔隙特征类与土壤粒径类影响因子之间存在明显显著相关、相互影响。这 7 个土壤可蚀性影响因子之间存在一定的共性,因子之间存在明显的信息叠加现象,需要进一步对土壤可蚀性影响因子筛选,从中选取信息承载力较高的作为土壤可蚀性关键因子。

表 2 贺兰山低山区表层土壤可蚀性影响因子间相关分析

植被带类型	影响因子	含水率/ %	容重/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	总孔 隙度/%	黏粒 含量/%	粉粒 含量/%	砂粒 含量/%	分形 维数
山前荒漠与 荒漠草原带	含水率/%	1						
	容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	-0.859*	1					
	总孔隙度/%	0.84	-1.000*	1				
	黏粒含量/%	0.982*	-0.75	0.73	1			
	粉粒含量/%	0.77	-0.34	0.31	0.877*	1		
	砂粒含量/%	-0.79	0.37	-0.34	-0.891*	-1.000**	1	
	分形维数	0.83	-0.43	0.41	0.922*	0.995**	-0.997**	1
山麓与低 山草原带	含水率/%	1						
	容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	-0.84	1					
	总孔隙度/%	0.69	-0.975*	1				
	黏粒含量/%	0.987**	-0.913*	0.8	1			
	粉粒含量/%	0.969*	-0.67	0.49	0.916*	1		
	砂粒含量/%	-0.976*	0.7	-0.52	-0.929*	-0.999**	1	
	分形维数	0.993**	-0.76	0.6	0.960*	0.992**	-0.995**	1

注: \*\* 在 0.01 水平上(双侧)显著相关, \* 在 0.05 水平上(双侧)显著相关。

## 2.3 土壤可蚀性关键因子筛选

如表 3—4 所示,含水率( $X_1$ ),容重( $X_2$ ),总孔隙度( $X_3$ ),黏粒( $X_4$ ),粉粒( $X_5$ )砂粒( $X_6$ )和分形维数( $X_7$ )等 7 个影响因子之间存在明显的信息重叠。对其进行主成分分析,提炼出 2 个主成分,其累积方差贡献率分别为 77.295% 和 17.468%,信息损失量为 5.237%,满足主成分分析的要求。第一主成分中( $F_1$ )具有高信息荷载的因子有:黏粒、粉粒、砂粒和分形维数,说明第一主成分因子主要表达了土壤粒径类

影响因子的基本信息;主成分分析得出的第二主成分中( $F_2$ )具有高信息荷载的因子有:含水率、容重和总孔隙度,说明第二主成分因子主要表达了土壤孔隙特征类影响因子的基本信息。

表 3 主成分贡献值

主成分	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%
$X_1$	5.411	77.295	77.295
$X_2$	1.223	17.468	94.763

表 4 旋转后的主成分载荷矩阵及主成分标准化系数矩阵

项目	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
旋转后的主成分 $F_1$	0.591	-0.27	0.23	0.847	0.967	-0.965	0.953
载荷矩阵 $F_2$	0.636	-0.954	0.964	0.472	0.225	-0.245	0.295
主成分标准化 $F_1$	0.37	-0.33	0.32	0.41	0.39	-0.4	0.41
系数矩阵 $F_2$	-0.15	0.56	-0.58	0.1	0.35	-0.33	0.29

由此得到土壤抗蚀性综合主成分评价模型:

$$Y_1 = 0.37 X_1 - 0.33 X_2 + 0.32 X_3 + 0.41 X_4 + 0.39 X_5 - 0.4 X_6 + 0.41 X_7 \quad (5)$$

$$Y_2 = -0.15 X_1 + 0.56 X_2 - 0.58 X_3 + 0.1 X_4 + 0.35 X_5 - 0.33 X_6 + 0.29 X_7 \quad (6)$$

$$Y = (77.295Y_1 + 17.468Y_2) / 94.763 \quad (7)$$

通过综合主成分评价模型,可以得出贺兰山低山区不同海拔土壤综合抗蚀性强弱顺序为:1 800 m(土壤抗蚀性能的综合主成分值为 2.14,下同) $>$ 1 700 m(1.91) $>$ 1 600 m(1.00) $>$ 1 500 m(-1.16) $>$ 1 400 m(-1.81) $>$ 1 300 m(-2.07),且抗蚀性与海拔呈显著正相关( $p < 0.05$ )。

### 3 讨论与结论

土壤含水率、容重和总孔隙度是土壤基础的物理性质之一,与植物生长、退化生态系统植被恢复及土壤侵蚀等过程密切相关<sup>[25-27]</sup>。研究发现,土壤水分含量和总孔隙度与海拔具有正相关关系,而土壤容重与海拔具有负相关性,与前人研究结果一致<sup>[28]</sup>。土壤粒径分布可以反映土壤结构、退化程度、侵蚀程度和肥力状况<sup>[29-31]</sup>。随着海拔升高,黏粒、粉粒质量分数增加,砂粒质量分数降低,分型维数呈上升趋势。山前荒漠与荒漠草原带较山麓与低山草原带黏粒含量低而砂粒含量高,可能是因为放牧和人类活动较为频繁,受到干扰较大,土壤结构不稳定,蓄水保水能力较差。变异系数表征影响因子对外界敏感程度的强弱,系数越大相应影响因子对外界越敏感<sup>[32]</sup>。为定量分析贺兰山低山区土壤可蚀性,采用中、弱度变异性因子作为土壤可蚀性影响因子,减小由于影响因子过于敏感而造成的估算误差,使选取的土壤可蚀性影响因子具有科学性、全面性和客观性<sup>[33]</sup>。这 7 个土壤因子均为中度、弱度变异性,可初选为土壤可蚀性影响因子。

土壤孔隙特征类与土壤粒径类影响因子之间存在明显显著相关、相互影响。在 2 个植被带中,均呈现含水率与黏粒百分含量之间、容重与总孔隙度之间以及粒径类因子(黏粒、粉粒、砂粒百分含量和分形维数)之间具有显著相关性( $p < 0.05$ )。黏粒和粉粒百

分含量具有显著正相关性,与砂粒含量呈显著负相关关系。说明土壤颗粒的粒径越大,细粒含量越小,土壤粒径分形维数越小;反之,土壤颗粒的粒径越小,细粒含量越大,土壤粒径分形维数越大,这与已有研究结果一致<sup>[34-35]</sup>。土壤中黏粒和粉粒含量越大,则分形维数越大,土壤水分含量越高,土壤结构越好;砂粒百分含量越大,则分形维数越小,土壤水分含量越低,土壤结构越不稳定。低海拔地区黏粒含量低、砂粒含量高,其分形维数小、土壤含水率低,表明该地土壤质地松散,结构不稳定,蓄水保水能力较差<sup>[36]</sup>。这 7 个土壤可蚀性影响因子之间可能存在一定共性,因子之间存在明显的信息叠加现象,需要进一步对土壤可蚀性影响因子筛选,从中选取信息承载力较高的作为土壤可蚀性关键因子。

对土壤可蚀性影响因子进行主成分分析,提炼出 2 个主成分,第一主成分因子主要表达了土壤粒径类影响因子的基本信息,研究区黏粒、粉粒和分形维数指标值越大,砂粒指标值越小,抗蚀性越强;第二主成分因子主要表达了土壤孔隙特征类影响因子的基本信息,研究区含水率和总孔隙度指标值越大,容重指标值越小,抗蚀性越强。

有研究表明,土壤颗粒分形维数在 2.75 左右土壤结构最为理想,在此状态下土壤既有优良的通气透水性又有一定的保水保肥机能<sup>[37]</sup>。贺兰山低山区土壤颗粒分形维数均值在 2.471 4~2.543 3 之间。因此,从目前来看,贺兰山低山区土壤的结构与质量并不理想,后期仍需加大贺兰山低山区的生态保护力度,特别是对于低海拔区域土壤,应制定专门的保护措施与土壤修复方案。由于不同海拔高度的气候条件、植被及土壤类型具有差异性,造成土壤理化性质的差异,从而使其土壤抗蚀性能也具有明显的空间分异规律。在贺兰山低山区不同海拔梯度,土壤孔隙特征类因子(含水率、容重、总孔隙度)和土壤粒径类因子(黏粒、粉粒、砂粒、分形维数)这 7 个指标均可作为描述土壤抗蚀性的有效指标,但土壤粒径类因子(黏粒、粉粒、砂粒、分形维数)这 4 个指标较土壤孔隙特征类因子(含水率、容重、总孔隙度)这 3 个指标表现出更好的评价性能。构建了土壤抗蚀性综合评价模

型,由其可得不同海拔高度下土壤抗蚀性由强到弱依次表现为:1 800 m>1 700 m>1 600 m>1 500 m>1 400 m>1 300 m。在该海拔区域内土壤抗蚀性随海拔升高而增加,这主要与随海拔上升人类活动减少,水热条件和土壤性质与结构改善有关。贺兰山低山区土壤抗蚀性与海拔呈显著正相关关系,与朱德雯<sup>[15]</sup>和聂晓刚等<sup>[11]</sup>研究结果一致,但与罗兰华等<sup>[38]</sup>的结果相异,可能是由于气候、土壤类型、干扰强度等差别所致。初步结论证实贺兰山低山区土壤性质和土壤抗蚀性与海拔显著相关,建议可通过制定专门的保护措施与土壤修复方案改善土壤的结构与质量、加强土壤抗蚀性,促进该区域生态建设和增强水土保持功能。

### [参 考 文 献]

- [1] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [2] Nciizah A D, Wakindiki I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015,61(6):827-842.
- [3] Bennett H H. Some comparisons of the properties of humid-tropical and humid-temperate American soils: With special reference to indicated relations between chemical composition and physical properties [J]. Soil Science, 1926,21(5):349-376.
- [4] Middleton H E. Properties of soils which influence soil erosion [M]. United States Department of Agriculture: Technical Bulletins, 1930.
- [5] 雷俊山,杨勤科. 土壤因子研究综述[J]. 水土保持研究,2004,11(2):156-159.
- [6] 宋阳,刘连友,严平,等. 土壤可蚀性研究述评[J]. 干旱区地理,2006,29(1):124-131.
- [7] 姜小三,潘剑君,杨林章,等. 土壤可蚀性 K 值的计算和 K 值图的制作方法研究:以南京市方便水库小流域为例[J]. 土壤,2004,36(2):177-180.
- [8] 刘宝元,张科利,焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报,1999,14(4):345-350.
- [9] 岑奕,丁文峰,张平仓. 华中地区土壤可蚀性因子研究[J]. 长江科学院院报,2011,28(10):65-68,74.
- [10] 牛钰杰,周建伟,杨思维,等. 坡向和海拔对高寒草甸山体土壤水热和植物分布格局的定量分解[J]. 应用生态学报,2017,28(5):1489-1497.
- [11] 聂晓刚,梁博,杨东升,等. 色季拉山土壤抗蚀性空间差异性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(5):69-76.
- [12] 张爱国,马志正,杨勤科,等. 中国水土流失土壤因子研究进展[J]. 山西师范大学学报(自然科学版),2002,16(1):79-85.
- [13] 单奇华,李卫正,俞元春,等. 南京城市林业土壤可蚀性及影响因素[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2008,32(2):47-50.
- [14] 杨帆,张洪江,程金花,等. 北京市延庆县不同土地利用方式下的土壤可蚀性研究[J]. 水土保持通报,2013,33(6):19-23.
- [15] 朱德雯. 川西高寒山地不同海拔梯度土壤水文特性与抗蚀性特征[D]. 四川 雅安;四川农业大学,2018.
- [16] 金山. 宁夏贺兰山国家级自然保护区植物多样性及其保护研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [17] 王小明. 宁夏贺兰山国家级自然保护区综合科学考察[M]. 宁夏 银川:阳光出版社,2011.
- [18] 蒋有绪. 论 21 世纪生态学的新使命:演绎生态系统在地球表面系统过程中的作用[J]. 生态学报,2004,24(8):1824-1827.
- [19] 梁存柱,朱宗元,王伟,等. 贺兰山植物群落类型多样性及其空间分异[J]. 植物生态学报,2004,28(3):361-368.
- [20] 顾延生,丁俊傑,葛继稳. 贺兰山中段植被类型及其覆盖变化研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2016,50(4):579-587.
- [21] 苏闯,张芯毓,马文红,等. 贺兰山灌丛群落物种多样性海拔格局及环境解释[J]. 山地学报,2018,36(5):699-708.
- [22] 郑敬刚,董东平,赵登海,等. 贺兰山西坡植被群落特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报,2008,28(9):4559-4567.
- [23] 韩东辰. 贺兰山东坡植被景观多样性研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [24] 袁志发,周静芊. 多元统计分析[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [25] 马风云,李新荣,张景光,等. 沙坡头人工固沙植被土壤水分空间异质性[J]. 应用生态学报,2006,17(5):789-795.
- [26] 姚荣江,杨劲松,刘广明. 黄河三角洲地区土壤容重空间变异性分析[J]. 灌溉排水学报,2006,25(4):11-15.
- [27] 耿韧,张光辉,李振炜,等. 黄土丘陵区浅沟表层土壤容重的空间变异特征[J]. 水土保持学报,2014,28(4):257-262.
- [28] 刘秉儒,张秀珍,胡天华,等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. 生态学报,2013,33(22):7211-7220.
- [29] Peng G, Xiang N, Lv Shengqiao, et al. Fractal characterization of soil particle-size distribution under different land-use patterns in the Yellow River delta wetland in China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014,14(6):1116-1122.
- [30] Zhao Yu, Feng Qi, Yang Huaide. Soil salinity distribution and its relationship with soil particle size in the lower reaches of Heihe River, Northwestern China [J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(9):1-18.

- semi-arid grassland on the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,627:1209-1217.
- [9] 熊平生. 陆地生态系统土壤呼吸的影响因素研究综述 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017(4):1-7.
- [10] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4):689-704.
- [11] 魏书精, 罗碧珍, 魏书威, 等. 森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3):504-514.
- [12] 付皓宇, 井长青, 郭文章, 等. 准噶尔盆地荒漠灌丛草地土壤呼吸变化及其对土壤温、湿度的响应 [J]. *草地学报*, 2019, 27(6):1677-1684.
- [13] 王永强, 崔凤娟, 郭小刚. 农田生态系统土壤呼吸文献综述 [J]. *内蒙古农业科技*, 2010(3):65-67.
- [14] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应 [J]. *生态学报*, 2013, 33(6):1916-1925.
- [15] 张权. 华北冬小麦—夏玉米轮作农田碳平衡特征及控制因素研究 [D]. 北京:清华大学, 2014.
- [16] 王尚涛. 干旱绿洲区农田葡萄树蒸散耗水及水分利用策略研究 [D]. 甘肃 兰州:兰州大学, 2019.
- [17] 马婷. 敦煌葡萄园生态系统土壤呼吸动态与碳平衡特征研究 [D]. 甘肃 兰州:兰州大学, 2016.
- [18] 韩拓, 冯丽丽, 马婷, 等. 干旱绿洲植物叶片光合作用特性及季节变化规律 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(4):492-497, 504.
- [19] 马婷, 朱高峰, 张琨, 等. 葡萄园土壤呼吸时空变异性及其与土壤温湿度的关系 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(1):43-50.
- [20] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Functional Ecology*, 1994, 8:315-323.
- [21] 王新友, 马全林, 靳虎甲, 等. 石羊河下游人工梭梭林土壤呼吸变化特征及其与水热因子的关系 [J]. *干旱区地理*, 2019, 42(03):570-580.
- [22] Savage K, Davidson E A, Tang J. Diel patterns of autotrophic and heterotrophic respiration among phenological stages [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4):1151-1159.
- [23] Tang Jianwu, Baldocchi D D, Xu Liukang. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11:1298-1304.
- [24] Song Weimin, Chen Shiping, Zhou Yadan, et al. Contrasting diel hysteresis between soil autotrophic and heterotrophic respiration in a desert ecosystem under different rainfall scenarios [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:16779.
- [25] Riveros-Iregui D A, Emanuel R E, Muth D J, et al. Diurnal hysteresis between soil CO<sub>2</sub> and soil temperature is controlled by soil water content [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L17404.
- [26] Curiel Yuste J, Janssens I A, Carrara A, et al. Annual Q<sub>10</sub> of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10:161-169.
- [27] Yan Tao, Song Huanhuan, Wang Zhaoqi, et al. Temperature sensitivity of soil respiration across multiple time scales in a temperate plantation forest [J]. *Science of Total Environment*, 2019, 688:479-485.
- [28] 卢闯, 胡海棠, 淮贺举, 等. 夏玉米—冬小麦轮作期土壤呼吸的温度敏感性分析 [J]. *中国农业气象*, 2020, 41(7):403-412.
- [29] Luo Yiqi, Zhou Xuhui. *Soil Respiration and the Environment* [M]. San Diego: Academic Press/Elsevier, 2006:1-333.

(上接第 72 页)

- [31] 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.
- [32] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10):1843-1848.
- [33] 赵恒策. 青海省江河源区草地土壤可蚀性关键因子研究 [D]. 甘肃 兰州:兰州大学, 2019.
- [34] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(4):545-550.
- [35] 王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑区为例 [J]. *生态学报*, 2007, 27(7):3081-3089.
- [36] 马生花, 谢应忠, 胡海英, 等. 荒漠草原 2 种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系 [J]. *中国水土保持*, 2019, 30(7):61-65.
- [37] 刘云鹏, 王国栋, 张社奇, 等. 陕西 4 种土壤粒径分布的分形特征研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(2):92-94.
- [38] 罗兰花, 王翠红, 谢红霞, 等. 大围山花岗岩风化物发育土壤抗蚀性垂直分异 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1):62-65, 71.