



基于因子分析法和最小数据集的五大连池火山矿泥质量评价

曾颖, 吴婧, 王希英, 方振兴

黑龙江省科学院 自然与生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要: 火山矿泥是一种于严苛条件下历经数百年形成的珍稀矿产资源, 目前尚无判定及评价其质量的方法。本研究采用因子分析法及最小数据集理论构建火山矿泥质量评价方法, 并对五大连池风景区内火山矿泥质量进行综合评价。研究表明: 火山矿泥质量评价最小数据集包括 V、Al、含水量、黏粒, 将五大连池火山矿泥分为 4 个质量等级, 其中 I 级火山矿泥的储量最大, 约占总储量的一半。新期火山周边火山矿泥质量最好, 西部火山周边的火山矿泥质量整体优于东部。

关键词: 火山矿泥; 质量评价; 因子分析; 最小数据集; 五大连池

QUALITY EVALUATION OF WUDALIANCHI VOLCANO MUD BASED ON FACTOR ANALYSIS AND MINIMUM DATA SET

ZENG Ying, WU Jing, WANG Xi-ying, FANG Zhen-xing

Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China

Abstract: Volcano mud is a rare kind of mineral resources formed in harsh conditions over hundreds of years, yet there is no method to judge and evaluate its quality currently. The factor analysis method and minimum data set theory are used to construct the quality evaluation method of volcanic mud, and to comprehensively evaluate the quality of volcanic mud in Wudalianchi Scenic Spot. The results show that the minimum data set for volcanic mud quality evaluation includes V, Al, water content and clay particle, and the Wudalianchi volcano mud can be divided into four quality grades, among which grade I has the largest reserves, accounting for half of the total reserves approximately. The quality of volcano mud around the modern volcano is the best, and the quality around the western volcanoes is better than that around the eastern.

Key words: volcano mud; quality evaluation; factor analysis; minimum data set; Wudalianchi Scenic Spot

0 前言

火山矿泥是一种特殊的土壤, 由火山活动期间喷

发的火山灰经地表径流或风的搬运作用, 沉积到周边的沼泽或低洼地带中, 在物理、化学、生物作用及氧化

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-17. 编辑: 张哲.

基金项目: 黑龙江省院所基本应用技术研究专项(编号 ZNBZ2020ZR09); 黑龙江省科学院科学研究基金(编号 KY2021ZR04, KY2020ZR04, KY2019HS01).

作者简介: 曾颖(1982—), 女, 硕士, 助理研究员, 从事火山资源开发与保护研究, 通信地址 黑龙江省哈尔滨市香坊区哈平路 103 号, E-mail//76109538@qq.com

通信作者: 吴婧(1986—), 女, 硕士, 助理研究员, 从事火山资源开发与保护研究, 通信地址 黑龙江省哈尔滨市香坊区哈平路 103 号, E-mail//313728968@qq.com

还原条件下,与该地区的原始沉积物以及水共同形成沉积层,通过吸附、富集、离子交换、迁移而形成的形成具有较高医疗价值的矿产资源。其中含有多种有益于人体的微量元素、矿物质及微生物,已被证实治疗皮肤病、关节炎、脱发等方面具有非常显著的疗效,在美容化工行业也得到了广泛应用^[1-5]。鉴于目前尚无判定火山矿泥的国家标准和质量评价方法,还处在依赖感官经验进行定性分类阶段,导致这种于严苛条件下历经数百年形成的珍稀资源无法得到妥善的保护和高效开发,急需建立一种针对火山矿泥的定量化质量评价方法。

当前关于土壤质量评价的方法有很多,但并没有形成固定统一的方式,因为评价土壤质量必须要联系土壤自身功能、生态类型、所处地域的土地利用方式等方面因素,充分考虑其多样性和变异性的特点,选择适用性的质量评价方法,并进行验证和对比^[6-11]。因子分析法是使用较为广泛和成熟的一种多元统计方法,能够在变量群中找到隐藏的具有一定代表性的因子,实现用少数几个因子去描述众多指标或因素之间的联系^[12-13]。而最小数据集法能够通过减少指标数量达到以较少的工作时间和成本来发现问题和解决问题。这两种方法常被用来进行土壤养分及质量评价^[14-18]。

本文借助传统定性火山矿泥辨认方法,从物理和化学等方面选取数据指标,采用因子分析法及最小数据集理论构建火山矿泥质量评价方法,并对五大连池自然保护区内火山矿泥进行质量评价,旨在为火山矿泥的合理开发利用及生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

五大连池自然保护区位于黑龙江省中北部,行政区划隶属黑河市管辖。地理坐标为东经 125°57′—126°31′,北纬 48°33′—48°53′,面积约 1 060 km²。属中温带大陆性季风气候区,冬季严寒漫长,夏季凉爽短促。年平均气温为 0.5℃,年平均降雨量为 514.3 mm/a,年平均相对湿度为 69.2%。全年多西北风。结冰期为 10 月初至翌年 5 月初,无霜期为 121 d,最大冻结深度 2.47 m。区内拥有世界上保存最完整、分布最集中、品类最齐全、地貌最典型的新老期火山地质地貌,被誉为“中国火山博物馆”。区内有规律地分布着 14 座火

山,位于西部的有药泉山、笔架山、老黑山、火烧山、卧虎山和南、北格拉球山;分布在东面的是东、西龙门山,东、西焦德布山及莫拉布山、尾山、小孤山。其中老黑山和火烧山喷发于 1719—1721 年,其余 12 座形成于 1~2 Ma 的地质时期。火山喷发后形成地质、地貌、矿产等资源,每年吸引了众多游客,创造了巨大的经济价值。火山喷发后形成的火山矿泥经过当地群众疗养员长期实践中总结出临床经验,采用敷矿泥、日光浴并结合矿水浸浴、矿泉饮用等综合疗法,对皮肤科与各种脱发等症有较为显著的疗效^[19-21]。以火山矿泥为原料制成的火山矿泥护肤品已经成为当地旅行的特色商品,成为当地旅游经济的重要组成部分。五大连池火山矿泥是不可再生资源,必须科学合理地开发才能最大限度地发挥独一无二的生态及医用价值。

2 样品采集及测定方法

通过查阅相关资料,在过往研究基础及野外调研的基础上,于 2020 年 7—11 月在五大连池 14 座火山周边开展火山矿泥样品采集工作。通过分析五大连池火山矿泥的形成条件可知,其主要赋存于火山周边不规则分散的湿地中。以每块湿地为单元按照网格法布设采样点位,根据实际情况的可操作性,适当调整位置,采样数量由每块湿地的面积确定。采用直压式半圆槽钻,通过人力砸入取样。取出的样品现场记录坐标、高程及环境信息,测定温度、含水量、颜色、质地等感官指标,将样品封入铝袋。样品自然风干后,研磨过筛以供测定。采样深度为表层土下 40~100 cm。本次采样点共计 75 个,采样位置如图 1 所示。

对 Al、Ba、K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Ni、Cr、Ti 采用火焰原子吸收法测定,Cu、Cd、Pb 采用石墨炉原子吸收法测定,V、Li、La、Sc 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)测定。总有机碳(TOC)采用岛津总有机碳测定仪测定,pH 值采用电位法测定,含水量采用强盛土壤水分测定仪测定,石英由 X 射线衍射仪测定,黏粒、粉粒、砂粒由激光粒度分析仪测定并计算而成。对每个土样所测指标进行 3 次平行测定,结果取其平均值。

3 研究方法

因子分析法和最小数据集通过 SPSS 22.0 软件实

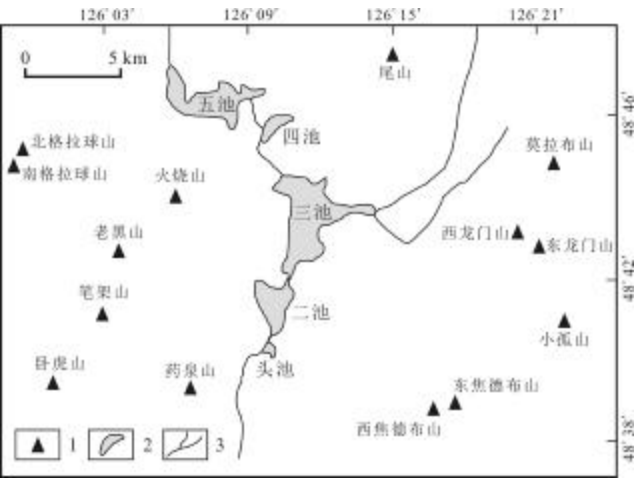


图 1 采样点分布图
(据文献[3]修改)

Fig. 1 Distribution sketch map of sampling sites
(Modified from Reference [3])

1—采样点(sampling site); 2—湖泊(lake); 3—河流(river)

现,具体研究步骤如下.

3.1 偏相关度 KMO 检验

借助传统定性火山矿泥辨认方法,从物理和化学等方面选取 25 项指标(Al、Ba、K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Zn、Ni、Cr、Cu、Cd、Pb、V、Ti、Li、La、Sc、TOC、pH、含水量、石英、黏粒、粉粒、砂粒)进行偏相关度 KMO 检验.结果显示,KMO 值为 0.731, $P<0.001$,说明指标之间存在相关性,适合进行因子分析.

3.2 因子分析

对 25 项指标做描述统计(见表 1),开展因子分析.其中特征值 ≤ 1 的主成分为 6 个,且累积解释的总方差达到 75.931%,表明前 6 个主成分能解释大部分火山矿泥的质量性质(见表 2).

3.3 Norm 值计算

在特征值 ≥ 1 的主成分变量中筛选出指标载荷大于 0.5 的变量并分为一组,如果一个指标在两个主变量中皆因子载荷值 ≥ 0.5 ,则将其归入指标相关性较低的那一组.分别计算各组指标的 Norm 值,选取每组中 Norm 值与该组中最大 Norm 值相差 10%范围内的指标.然后对每组指标的相关性进行检查(见表 3).若相关性 ≥ 0.5 ,选择 Norm 值最大的指标进入最小数据集,如果一个指标与同组内其他指标不具有相关性或相关性比较低,也要进入最小数据集.最后,对进入该数据集的指标再次进行相关性分析,将相关性较高的冗余

表 1 火山矿泥指标描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of volcano mud indexes

指标	样品数/个	平均值	极小值	极大值	标准差	变异系数/%
Mn/ 10^{-6}	75	308.173	106.530	740.150	158.342	51.381
Cu/ 10^{-6}	75	17.141	7.970	31.290	4.484	26.159
Zn/ 10^{-6}	75	45.164	23.740	66.070	7.272	16.102
Ba/ 10^{-6}	75	156.385	100.450	306.350	32.438	20.743
Cr/ 10^{-6}	75	30.836	13.330	47.460	7.136	23.143
Ti/ 10^{-6}	75	688.888	25.410	1370.280	373.900	46.025
Ni/ 10^{-6}	75	17.467	7.580	26.410	4.264	24.415
V/ 10^{-6}	75	49.372	21.220	72.340	10.879	22.035
Sr/ 10^{-6}	75	54.214	25.900	108.800	16.817	31.019
Sc/ 10^{-6}	75	7.566	4.550	10.960	1.464	19.349
La/ 10^{-6}	75	20.694	13.110	28.090	2.884	13.938
Li/ 10^{-6}	75	15.533	2.020	30.820	6.135	39.494
Fe/ 10^{-3}	75	23.645	12.860	38.940	5.157	21.811
Al/ 10^{-3}	75	29.834	13.090	47.640	7.368	24.696
Kg/ 10^{-3}	75	4.179	1.640	8.150	1.716	41.056
Na/ 10^{-3}	75	592.718	440.360	853.850	108.136	18.244
Ca/ 10^{-3}	75	4.031	2.250	7.270	0.971	24.083
Mg/ 10^{-3}	75	4.451	2.050	6.960	1.126	25.305
TOC/%	75	1.449	0.390	3.780	0.718	49.548
pH	75	6.515	6.000	7.100	0.197	3.023
含水量/%	75	30.851	20.500	48.200	6.606	21.413
石英/%	75	27.365	18.200	34.200	3.036	11.096
黏粒/%	75	5.296	1.620	10.250	1.745	32.96
粉粒/%	75	42.454	22.680	66.720	10.074	23.73
砂粒/%	75	52.238	23.040	75.670	11.429	21.88

指标全面去除,并将变异系数小于 10%的不敏感指标彻底去除. Norm 值越高,则代表着该指标的综合载荷值越高,所包含、覆盖、表达的信息越多^[16]. Norm 值的计算公式如下:

$$N_{ik}=\sqrt{\sum_1^k(U_{ik}^2\lambda_k)}$$
 (1)

式中, N_{ik} 表示第*i*个指标在特征值 ≥ 1 的前*k*个主成分上的综合载荷的 Norm 值; U_{ik} 表示第*i*个指标在第*k*个主成分的载荷; λ_k 为第*k*个主成分的特征值.由表 2 和表 3 数据可知,最终确定为评价火山矿泥质量的评价指标最小数据集为 V、Al、含水量、黏粒.

表 2 火山矿泥指标载荷矩阵、公因子方差和 Norm 值
Table 2 Loading matrix, common factor variance and Norm values of volcano mud indexes

指标	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	PC-5	PC-6	分组	公因子方差	Norm
Mn	0.887	0.018	0.183	0.005	0.209	-0.096	1	0.635	1.354
Cu	0.878	0.07	-0.027	0.167	-0.221	0.107	1	0.810	1.755
Zn	0.876	-0.054	0.318	0.109	0.051	-0.137	1	0.846	1.204
Ba	0.875	0.167	-0.147	0.148	-0.182	-0.055	1	0.685	1.749
Cr	0.822	0.145	-0.264	0.145	-0.203	0.180	1	0.772	2.689
Ti	0.808	0.059	-0.08	-0.161	0.173	-0.181	1	0.771	2.420
Ni	0.807	0.201	0.16	-0.233	0.202	0.006	1	0.755	2.380
V	0.793	-0.113	0.023	-0.191	-0.113	0.059	1	0.576	2.820
Sr	0.759	0.072	0.424	0.194	-0.024	-0.021	1	0.721	1.629
Sc	0.750	-0.046	0.014	0.082	-0.125	0.022	1	0.612	2.504
La	-0.623	0.471	0.188	0.355	-0.185	-0.201		0.866	1.881
Li	0.615	-0.456	-0.219	-0.333	0.176	0.182	1	0.752	2.469
Fe	0.543	-0.46	0.020	-0.413	0.192	0.240	1	0.861	2.272
Al	0.137	0.794	0.268	-0.005	0.177	0.016	2	0.873	2.683
K	0.227	0.744	0.013	0.242	0.139	0.194	2	0.711	2.548
Na	-0.028	0.624	0.149	-0.449	-0.143	-0.008	2	0.587	1.542
Ca	0.363	0.45	-0.216	0.335	-0.288	0.190		0.746	1.632
Mg	0.122	0.135	0.801	0.085	0.126	0.112	3	0.812	2.677
TOC	0.458	0.253	0.620	0.006	-0.348	-0.133	3	0.753	0.986
pH	0.527	0.294	0.593	-0.028	-0.078	-0.148	3	0.873	1.025
含水量	-0.029	0.073	0.070	0.750	0.039	-0.030	4	0.800	1.164
石英	0.485	0.166	0.364	0.519	0.259	0.193	4	0.696	0.144
黏粒	-0.088	0.053	0.021	0.088	0.815	-0.045	5	0.768	1.966
粉粒	0.041	0.031	-0.242	-0.153	0.369	-0.742		0.798	2.136
砂粒	0.161	0.232	-0.254	-0.212	0.252	0.709	6	0.905	2.176
主成分特征值	9.103	3.652	1.867	1.657	1.437	1.267			
主成分贡献率/%	36.411	14.607	7.466	6.629	5.750	5.068			
主成分累积贡献率/%	36.411	51.018	58.484	65.113	70.863	75.931			

3.4 权重值计算

将最小数据集进行主成分分析，得到各个指标的公因子方差,用于计算各指标的权重(见表 4)。权重等于各指标的公因子方差占有所有指标公因子方差之和的比例^[19]。

3.5 火山矿泥质量指数计算

得到各指标的评分和权重后，根据如下方程计算火山矿泥质量指数(QI)：

$$QI=\sum_{i=1}^n W_i S_i$$

(2)

表 3 火山矿泥指标相关性分析
Table 3 Correlation analysis of volcano mud indexes

	Mn	砂粒	Cu	粉粒	黏粒	石英	含水量	pH	TOC	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe	Zn	Li	Sc	La	Sr	V	Ni	Ti	Cr	Ba
Mn	1																								
砂粒	0.191	1																							
Cu	-0.042	-0.042	1																						
粉粒	-0.196	-0.995**	0.036	1																					
黏粒	-0.124	-0.817**	0.059	0.755**	1																				
石英	-0.045	-0.096	-0.127	0.118	-0.030	1																			
含水量	0.150	-0.254*	0.153	0.259*	0.157	-0.229*	1																		
pH	-0.075	0.023	0.100	-0.027	-0.009	0.175	0.070	1																	
TOC	-0.097	0.212	0.396**	-0.190	-0.291*	-0.091	-0.115	0.011	1																
Ca	0.234*	0.150	0.334**	-0.148	-0.137	-0.086	0.191	0.116	0.218	1															
Mg	-0.009	-0.411**	0.464**	0.411**	0.329**	-0.136	0.137	-0.180	-0.014	0.291*	1														
K	-0.006	-0.424**	0.421**	0.433**	0.286*	-0.094	0.292*	-0.183	0.021	0.281*	0.857**	1													
Na	0.039	0.035	0.282*	-0.022	-0.100	-0.149	0.110	-0.186	0.097	0.512**	0.452**	0.531**	1												
Al	0.006	-0.356**	0.404**	0.360**	0.267*	-0.033	0.100	-0.132	0.056	0.292*	0.860**	0.868**	0.428**	1											
Fe	-0.034	-0.396**	0.295*	0.380**	0.411**	-0.079	0.045	-0.085	-0.029	0.165	0.786**	0.568**	0.252*	0.705**	1										
Zn	0.061	0.142	0.456**	-0.169	0.028	-0.126	-0.083	0.121	-0.048	0.204	0.170	-0.031	0.096	-0.002	0.143	1									
Li	0.095	-0.494**	0.334**	0.486**	0.447**	0.202	0.127	0.014	-0.103	0.090	0.615**	0.565**	0.202	0.662**	0.519**	0.063	1								
Sc	0.119	-0.401**	0.444**	0.375**	0.471**	0.036	0.247*	0.081	-0.245*	0.260*	0.606**	0.598**	0.186	0.713**	0.520**	0.256*	0.742**	1							
La	0.186	-0.093	0.445**	0.091	0.079	0.012	-0.075	-0.075	0.049	0.334**	0.433**	0.335**	0.195	0.468**	0.279*	0.497**	0.317**	0.584**	1						
Sr	0.421**	0.211	0.310**	-0.209	-0.184	0.033	0.159	0.081	0.182	0.683**	0.085	0.074	0.261*	0.152	0.095	0.301**	0.165	0.304**	0.426**	1					
V	0.031	-0.476**	0.556**	0.458**	0.488**	0.089	0.095	0.083	-0.009	0.223	0.697**	0.584**	0.203	0.692**	0.630**	0.205	0.761**	0.817**	0.535**	0.172	1				
Ni	0.059	-0.321**	0.606**	0.311**	0.309**	-0.047	-0.012	-0.115	0.183	0.303**	0.707**	0.511**	0.303**	0.559**	0.587**	0.426**	0.563**	0.541**	0.616**	0.297**	0.772**	1			
Ti	-0.040	-0.568**	0.243*	0.560**	0.492**	-0.047	0.194	-0.142	-0.131	0.029	0.619**	0.639**	0.216	0.630**	0.488**	0.028	0.629**	0.640**	0.464**	0.002	0.678**	0.530**	1		
Cr	-0.023	-0.408**	0.553**	0.397**	0.393**	0.001	-0.013	0.007	0.090	0.120	0.741**	0.583**	0.192	0.730**	0.654**	0.300**	0.713**	0.759**	0.625**	0.133	0.911**	0.830**	0.677**	1	
Ba	0.274*	-0.031	0.327**	0.027	0.045	-0.135	-0.178	-0.233*	0.160	0.237*	0.429**	0.314**	0.205	0.428**	0.352**	0.453**	0.251*	0.397**	0.735**	0.421**	0.431**	0.618**	0.405**	0.568**	1

注:***和* 分别为在 1%和 5%水平下显著相关。

表 4 火山矿泥指标权重
Table 4 Weights of volcano mud indexes

要素类型	V	Al	含水量	黏粒
公因子方差	0.831	0.768	0.905	0.590
权重	0.269	0.248	0.293	0.191

式中, S_i 代表指标得分, n 为指标数量, W_i 代表指标权重. QI 值越高, 表示火山矿泥质量更好. 根据研究区的相关文献资料及课题组累积成果, 将五大连池火山矿泥分为 4 个等级. 分类范围为: I 级矿泥 ($QI \geq 0.75$), II 级矿泥 ($0.5 \leq QI < 0.75$), III 级矿泥 ($0.25 \leq QI < 0.5$), IV 级矿泥 ($QI < 0.25$). 计算每座火山周边火山矿泥的质量综合指数平均值、等级及对应的火山矿泥面积, 结果见表 5.

表 5 五大连池火山矿泥质量指数平均值、等级及储量
Table 5 Average quality index, grade and reserves of Wudalianchi volcano mud

火山名称	QI	等级	储量/ 10^4 m^3
药泉山	0.868	I	10.55
老黑山	0.946	I	4.73
火烧山	0.988	I	16.48
东龙门山	0.249	IV	5.12
西龙门山	0.707	II	3.54
东焦德布山	0.662	II	2.68
西焦德布山	0.651	II	2.99
南格拉球山	0.484	III	1.54
北格拉球山	0.522	III	2.03
尾山	0.733	II	4.58
莫拉布山	0.332	III	9.67
卧虎山	-	-	-
笔架山	-	-	-
小孤山	-	-	-

4 结果与讨论

由表 5 可知, 五大连池风景区 14 座火山中卧虎山、小孤山和笔架山的周围湿地已经被完全开垦为农田和工地、养殖场等, 未发现火山矿泥. 药泉山、老黑山、火烧山的火山矿泥质量最好, 为 I 级矿泥, 占总矿

泥储量的 49.69%; 东西焦德布山、西龙门山、尾山的火山矿泥较好, 为 II 级矿泥, 占总矿泥储量的 21.58%; 莫拉布山、南北格拉球山的火山矿泥质量一般, 为 III 级矿泥, 占总矿泥储量的 20.72%; 东龙门山的火山矿泥质量较差, 为 IV 级矿泥, 占总矿泥储量的 8.01%.

结合图 1 可知, 五大连池火山矿泥质量等级空间分布呈现一定的规律性, 以新期火山(老黑山和火烧山)周边的火山矿泥质量最优. 以其为中心, 向外延伸, 质量逐渐降低, 且西部火山周边的火山矿泥质量整体优于东部. 优质矿泥赋存湿地均毗邻矿水区或地表堰塞湖, 且集中位于五大连池风景区核心景点附近, 生态环境保护较好, 远离农田, 为优质火山矿泥的形成提供了有利条件. I 级火山矿泥所占比例最高, 接近总储量的一半, 这部分是五大连池火山矿泥的精华, 目前大部分已经被隔离管控. 建议进一步建设火山矿泥保护区及卫生防护区, 防止人类活动的干扰, 拦截污染的进入, 并加大科研投入, 实现珍稀资源的高值化利用. II、III、IV 级火山矿泥约占五大连池火山矿泥总储量的一半, 目前均未被列入监管, 赋存火山矿泥的湿地已经受到不同程度的破坏, 出现退化现象. 这部分火山矿泥资源价值被低估, 具有巨大开发潜力. 建议相关部门给予重视, 制定可操作的管控措施, 确保这部分火山矿泥资源能够被科学、有序、合理地开发和利用. 此外, 目前尚有很多可能赋存火山矿泥的研究区域未被调查, 迫切需要相关部门组织力量开展勘探工作, 尽早发现并保护好这种珍贵的矿产资源.

5 结论

1) 采用因子分析法和最小数据集法筛选出火山矿泥质量评价指标为 V、Al、含水量、黏粒.

2) 通过计算火山矿泥质量指数, 将五大连池火山矿泥分为 4 个等级, 其中 I 级矿泥的储量面积最大, 约占总储量的一半. 火山矿泥质量等级空间分布呈现一定的规律性, 新期火山(老黑山和火烧山)周边的火山矿泥质量最优. 以其为中心, 向外延伸, 质量逐渐降低, 且西部火山周边的火山矿泥质量整体优于东部.

3) 因子分析法和最小数据集法减少了人为主观因素的影响, 客观性、科学性和规范性强, 易于推广, 适合在火山矿泥质量评价中应用.

参考文献(References):

- [1] 韩春兰, 顾欣燕, 刘杨杨, 等. 长白山山脉火山喷出物发育土壤的特性及系统分类研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1061–1070.
Han C L, Gu X Y, Liu Y Y, et al. Properties and taxonomy of soils developed from volcano ejects in Changbai Mountains [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(6): 1061–1070.
- [2] 高思萌. 五大连池火山矿泥的微生物多样性及其环境调控机理研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2019.
Gao S M. Microbial diversity of Wudalianchi volcanic sludge and its correlation with environmental factors [D]. Shenyang: Shenyang University, 2019.
- [3] 毛翔, 李江海, 高危言, 等. 黑龙江五大连池火山群火山分布与断裂关系新认识[J]. 高校地质学报, 2010, 16(2): 226–235.
Mao X, Li J H, Gao W Y, et al. Vent distribution of Wudalianchi volcanoes Heilongjiang Province, China and its relation to faults [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(2): 226–235.
- [4] 王希英, 谢振华, 方振兴. 五大连池火山矿泥在化妆品中的应用研究[J]. 日用化学品科学, 2014, 37(8): 26–29.
Wang X Y, Xie Z H, Fang Z X. Application of Wudalianchi volcanic mineral mud in cosmetics [J]. Detergent & Cosmetics, 2014, 37(8): 26–29.
- [5] Kamarudin N H N, Setiabudi H D, Jalil A A, et al. Utilization of Lapindo volcanic mud for enhanced sono-sorption removal of acid orange 52 [J]. Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 2019, 14(1): 189–195.
- [6] Negiş H, Şeker C. Estimation of soil quality of under long term sugar beet-wheat cropping system by factor analysis [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51(4): 440–455.
- [7] 张贞, 魏朝富, 高明, 等. 土壤质量评价方法进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 999–1006.
Zhang Z, Wei C F, Gao M, et al. Assessment methods for soil quality: A review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(5): 999–1006.
- [8] 黄勇, 杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展[J]. 地质通报, 2009, 28(1): 130–136.
Huang Y, Yang Z F. Recent research progress of overseas soil quality evaluation [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(1): 130–136.
- [9] 洪淇钧, 吴克宁, 冯喆, 等. 大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 565–578.
Yang Q J, Wu K N, Feng Z, et al. Soil quality assessment on large spatial scales: advancement and revelation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 565–578.
- [10] Aroh J E K, Roy M, Wada A C. Soil quality evaluation and classification system: criteria for determining fertility classes for agricultural production [J]. Scholedge International Journal of Multidisciplinary & Allied Studies, 2020, 6(12): 137–155.
- [11] 刘江, 吕涛, 张立欣, 等. 基于主成分分析的不同种植年限甘草地土壤质量评价[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 162–171.
Liu J, Lv T, Zhang L X, et al. Soil quality assessment by principal component analysis in Glycyrrhiza uralensis stands of differing ages [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(6): 162–171.
- [12] 姜龙群, 侯贵廷, 黄淇, 等. 基于因子分析和最小数据集的土壤养分评价——以房山平原区为例[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1034–1040.
Jiang L Q, Hou G T, Huang Q, et al. Evaluation of soil fertility quality with a minimum data set and factor analysis in the Fangshan plain of Beijing [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(5): 1034–1040.
- [13] 张连金, 赖光辉, 孔颖, 等. 基于因子分析法的北京九龙山土壤质量评价[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 7–14.
Zhang L J, Lai G H, Kong Y, et al. Evaluation of soil quality in Beijing Jiulong Mountain based on factor analysis method [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3): 7–14.
- [14] 吴春生, 刘高焕, 黄翀, 等. 基于 MDS 和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1275–1286.
Wu C S, Liu G H, Huang C, et al. Soil quality assessment of the Yellow River Delta based on MDS and fuzzy logic model [J]. Resources Science, 2016, 38(7): 1275–1286.
- [15] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 265–273.
Li P F, Zhang X C, Hao M D, et al. Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 265–273.
- [16] 娄义宝, 史东梅, 蒋光毅, 等. 基于最小数据集的紫色丘陵区坡耕地耕层土壤质量评价[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 75–85.
Lou Y B, Shi D M, Jiang G Y, et al. Evaluation of soil quality in the cultivated-layer of sloping farmland in purple hilly area based on minimum data set [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(5): 75–85.
- [17] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 16–25.
Li G L, Chen J, Tan M Z, et al. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 16–25.
- [18] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions [J]. Ecological Indicators, 2017, 75: 307–320.

(下转第 601 页/Continued on Page 601)

- Chen N S, Huang N. Emergency investigation on debris flow 8.8 disaster in Qiaowo Town, Puge County, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2018, 36(3): 482-487.
- [12] 陈志, 杨志全, 刘传秋. 云南省麻栗坡县猛洞河“9.02”泥石流调查[J]. 山地学报, 2019, 37(4): 631-638.
- Chen Z, Yang Z Q, Liu C Q. Investigation of the “9.02” debris flows in Mengdong River, Malipo County, Yunnan, China [J]. Mountain Research, 2019, 37(4): 631-638.
- [13] 黄达, 唐川, 黄润秋, 等. 美姑河洛马洛西沟泥石流特征及危险性研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(2): 162-167.
- Huang D, Tang C, Huang R Q, et al. Study on debris flow features and hazards of the Ermaluoxi Gully on Meigu River, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(2): 162-167.
- [14] 陈光曦, 王继康, 王林海, 等. 泥石流防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 65-89.
- Chen G X, Wang J K, Wang L H, et al. Debris flow prevention [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983: 65-89. (in Chinese)
- [15] 袁颖, 王帅伟, 满兵. 四川都江堰椿芽树沟泥石流特征参数计算及防治工程设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(2): 51-56.
- Yuan Y, Wang S W, Man B. Calculation of characteristic parameters and design of control work against of debris flow in Chunyashu gully, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(2): 51-56.
- [16] 邓虎, 陈宁生, 胡桂胜, 等. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流流动力学特征参数计算[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(4): 833-838.
- Deng H, Chen N S, Hu G S, et al. Calculation of dynamics parameters of Sanyanyu Gully in Zhouqu, Gansu [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(4): 833-838.
- [17] 王国卫, 李明波, 蒋明光, 等. 基于加权信息量模型的湖南省麻阳县地质灾害危险性评价与区划[J]. 地质与资源, 2020, 29(3): 266-272.
- Wang G W, Li M B, Jiang M G, et al. Risk assessment and zoning of the geological hazards in Mayang County of Hunan Province based on weighted information model [J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 266-272.
- [18] 李彩侠, 马煜. 四川都江堰龙溪河流域泥石流成因、特征和危险性评价[J]. 地质与资源, 2019, 28(3): 298-304.
- Li C X, Ma Y. Causes, characteristics and hazard assessment of the debris flows in Longxi River Basin, Sichuan Province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(3): 298-304.
- [19] 朱进守, 邓辉, 苑泉, 等. 藏东高山峡谷地带地质灾害危险性评价——以西藏贡觉县为例[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 272-278.
- Zhu J S, Deng H, Yuan Q, et al. Risk assessment on the geohazards in alpine and gorge region of Eastern Tibet: A case study of Gonjo County [J]. Geology and Resources, 2018, 27(3): 272-278.
- [20] 刘希林, 唐川, 陈明, 等. 泥石流危险范围的模型实验预测法[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(3): 67-73.
- Liu X L, Tang C, Chen M, et al. The model experiment forecast on the risk range of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 1993, 2(3): 67-73.
- [21] 刘希林, 唐川, 朱静, 等. 泥石流危险范围的流域背景预测法[J]. 自然灾害学报, 1992, 1(3): 56-67.
- Liu X L, Tang C, Zhu J, et al. The drainage background forecast on the risk range of debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 1992, 1(3): 56-67.

(上接第 589 页/Continued from Page 589)

- [19] 王希英, 方振兴, 吴婧, 等. 五大连池火山矿泥清洁泥膜的制备工艺[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(24): 41-43.
- Wang X Y, Fang Z X, Wu J, et al. The preparation technology of clean mud film of Wudalianchi mud [J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(24): 41-43.
- [20] 方振兴, 王希英, 吴婧, 等. 五大连池矿泉接骨木眼霜的制备工艺研究[J]. 香料香精化妆品, 2019(5): 52-54.
- Fang Z X, Wang X Y, Wu J, et al. Study on preparation of Wudalianchi mineral elderberry eye cream [J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2019(5): 52-54.
- [21] 尤传誉, 冶雪艳, 张海燕, 等. 五大连池地区矿泥分布特征及储量评价[J]. 地质与勘探, 2015, 51(1): 61-67.
- You C Y, Ye X Y, Zhang H Y, et al. Distribution characteristic and reserve evaluation of the peloid in the Wudalianchi area, Heilongjiang Province [J]. Geology and Exploration, 2015, 51(1): 61-67.