

黄梦真,鲁瑞洁,赵瑾,等.柴达木盆地典型风蚀区土壤质量评价[J].中国沙漠,2023,43(3):199–209.

柴达木盆地典型风蚀区土壤质量评价

黄梦真,鲁瑞洁,赵瑾,马罗

(北京师范大学 防沙治沙教育部工程研究中心/地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)

摘要:开展土壤质量评价是有效保护土壤的关键环节,对保障生态系统稳定和区域生态安全及可持续发展至关重要。柴达木盆地是青藏高原土壤风蚀最严重的地区,风蚀导致的土壤系统的变化深刻影响着青藏高原生态安全屏障和水源涵养功能。本研究基于对柴达木盆地典型风蚀区表层土壤的理化性质分析,利用主成分分析法建立最小数据集,构建土壤质量综合指数并进行土壤质量评价。结果表明:(1)柴达木盆地土壤有机质、全氮、全磷、有效磷、容重、碳酸钙含量仅达到全国第二次土壤普查六级土壤肥力分级标准下的四级到六级水平指标评分空间分布上,有机质、全氮、有效磷、全磷、砂粒含量东高西低,速效钾、砾石含量则西高东低。(2)柴达木盆地土壤质量评价最小数据集(MDS)包括容重、有机质、全磷、速效钾、砂粒含量5个指标,基于最小数据集构建的土壤质量综合指数(MDS-SQI)具有较好的代表性和适用性。(3)盆地整体土壤质量较差,且呈现出东部土壤质量优于西部的分布规律。将研究区的土壤质量由高到低划分为I~V级,I~II级土壤样点主要分布在东部地区,且所占面积较小,中部和西部地区主要分布III~V级样点。(4)MDS-SQI和风蚀强度显著负相关,柴达木盆地土壤风蚀的防治是遏制土壤质量继续恶化的重要措施。

关键词:土壤质量评价;最小数据集;主成分分析法;柴达木盆地

文章编号: 1000-694X(2023)03-199-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00125

中图分类号: S158

文献标志码: A

0 引言

土壤位于大气圈、岩石圈、水圈和生物圈的交会处^[1],起到调节水分和提供植物生长发育所需养分的作用^[2],并维持地球上的生态系统^[3]。土壤质量是土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量三方面的综合量度,即土壤在生态系统的范围内,维持生物的生产能力、保护环境质量及促进动植物健康的能力^[4]。开展土壤质量评价是有效保护土壤的关键环节,对保障生态系统稳定和区域生态安全及可持续发展至关重要。

青藏高原被称为“世界屋脊”和“地球第三极”,既是 中国乃至世界重要的生态安全屏障^[5],也是中国江河源区重要的水源涵养地^[6]。柴达木盆地是青藏高原生态变化最为敏感和显著的地区^[7]。根据青海省第三次遥感普查结果,柴达木盆地 64.18%的土地发生水土流失,水土流失类型以风蚀为主,并伴

有轻微的水蚀和局部的冻融侵蚀^[8]。其中,风力侵蚀占水土流失总面积的 62.36%^[8]。柴达木盆地土壤风蚀严重,土地退化不断加剧,风蚀导致的土壤系统的变化对青藏高原生态安全产生深刻影响^[9]。

围绕柴达木盆地土壤风蚀现状及影响因素、风沙地貌、风沙灾害及防治等方面已经开展了大量研究。曹雪等^[10]和张胜邦等^[11]分别基于实地调查和风洞模拟实验对柴达木盆地东部的土壤侵蚀开展了研究;刘红英等^[12]结合遥感影像和气象数据,研究了柴达木盆地雅丹地貌的分布、形态特征和发育环境;丁召静^[13]进一步对其演化规律和过程进行探究;赵串串等^[14]基于对柴达木盆地土地沙漠化现状的研究,提出了土地沙漠化防治的具体措施和对策。这些研究为我们认识柴达木盆地的土壤风蚀提供了重要的理论和数据基础,但在土壤风蚀过程引起的土壤质量变化方面尚缺乏针对性、系统性的研究。

收稿日期:2022-08-03; 改回日期:2022-09-29

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0306)

作者简介:黄梦真(1999—),女,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为土壤风蚀与土壤质量。E-mail: Huang_Mengzhen@163.com

通信作者:鲁瑞洁(E-mail: ruijielu@bnu.edu.cn)

土壤质量的定量评价方法主要有多变量指标克立格法、土壤质量动力学方法、土壤质量综合指数法、灰色关联分析法、物元法、人工神经网络法和TOPSIS法等^[15]。其中,土壤质量综合指数法不仅能将土壤质量量化,而且能进行田块或地域间的比较,简单易行,应用较多^[16-20]。土壤质量评价中可供选择的指标很多,虽然选择更全面的指标能够更真实地反映土壤质量,但会显著增加数据获取的成本,常选择最小数据集(MDS)定量评价土壤质量^[21]。MDS包含了反映土壤质量最少的指标,可以通过测定较少的数据了解土壤的变化情况^[22]。构建MDS的方法主要有主成分分析、聚类分析、典范对应分析、逐步回归分析、偏最小二乘回归分析等^[15]。其中,主成分分析法可通过降维来减少变量,结合Norm值与相关性分析去除相关性较强的指标,同时能保留指标的主体信息,应用较为广泛^[23-28]。由于不同区域自然地理环境、土壤发育状况及质量不同,构建的MDS中土壤指标存在差异^[29]。

本研究在柴达木盆地典型风蚀区采集表层土壤质量样品,测定容重、pH值、碳酸钙等10个土壤理化性质指标,构建柴达木盆地典型风蚀区土壤质量评价指标体系,采用主成分分析法建立土壤质量评价的最小数据集,通过综合指数法对土壤质量进行综合评价,以期柴达木盆地土地管理、开发利用及开展沙漠化防治提供理论支撑。

1 研究区概况

柴达木盆地位于青藏高原的东北部、青海省西北部,是封闭型的巨大山间断陷盆地。盆地略呈三角形,面积约24万km²,西北抵阿尔金山脉,西南至昆仑山脉,东北有祁连山脉。盆地内平原区海拔2 675~3 350 m,平均2 800 m,四周高山海拔4 000~5 000 m^[30]。地貌呈同心圆状分布,从盆地四周到中部地区,分别发育形成了极高山、高山、戈壁、平原、盐沼及湖泊等地貌,其中,65%为戈壁、盐壳、流动沙丘和风蚀地貌^[31]。整体上南高北低、西高东低,地势起伏相对较大^[32]。

柴达木盆地属高原大陆性气候,气温变化剧烈。年降水量自东南部向西北部递减,在东南部可达200 mm,而西北部仅15 mm,年均相对湿度最小可低于5%^[10]。盆地风力强盛,年8级以上大风25~75 d,西部甚至可出现40 m·s⁻¹的强风,风力侵蚀强烈^[10]。柴达木盆地中河流大部为间歇性,主要分布

于盆地东部,西部水网极为稀疏。地带性的土壤有淡栗钙土、棕钙土和荒漠土类及亚类,非地带性的土壤类型有草甸土、沼泽土、盐土、碱土等,但主要土壤类型为棕钙土、盐土和风沙土^[32]。

盆地植被稀疏,结构简单,约有六成的群丛由一个或几个种组成^[33]。野外调查显示,在山麓洪积扇和冲积-洪积平原上以膜果麻黄(*Ephedra przewalskii*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和红砂(*Reaumuria songarica*)灌木所组成的荒漠植被群落为主;在盐性沼泽及盐湖、河流沿岸,莎草科植物(*Cyperaceae*)密生形成草丘,其中占优势的有针蔺(*Eleocharis pellucida*)、丝蓼草(*Schoenoplectus triqueter*)与黑花藁草(*Carex melanantha*)等盐生植被;盐湖与沼泽外围以芦苇(*Phragmites australis*)与赖草(*Leymus secalinus*)为主。

2 材料与方法

2.1 样品采集

野外采样于2019年7—8月进行,在柴达木盆地典型土壤风蚀区选取75个采样点(图1),相邻采样点之间的间隔约为40 km,采样点涉及的土壤类型主要为风沙土,地表类型包括荒漠草原、裸露沙砾地、戈壁、盐壳、雅丹、流动/固定沙丘、灌丛沙丘等。在每个采样点分别采集0~10 cm和10~20 cm两层的土壤样品,并在10 cm深度处用环刀采集土壤容重样品,共采集150个表层土壤样品和69个土壤容重样品。在采样的同时,拍照并记录各采样点的经纬度和海拔,现场调查采样点的植被盖度、砾石盖度、土地利用类型,判断采样点的风蚀强度。

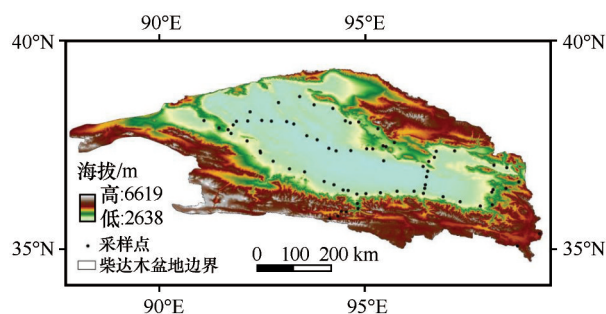


图1 柴达木盆地采样点位置

Fig.1 Location of sampling points in Qaidam Basin

2.2 土壤理化性质测定

本研究测定了土壤容重、pH值、碳酸钙、有机

质、全氮、机械组成(黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量、砾石含量)、全磷、有效磷、全钾、速效钾共10个土壤理化性质指标。

野外采集的新鲜样品带回实验室后先风干(环刀采集的容重样品除外)。将样品平铺在干净的硫酸纸上,摊成薄层,于室内阴凉通风处风干。用四分法分取适量的风干样品,剔除土壤以外的侵入体,如动植物残体、砖头、石块等,再用圆木棍将土样碾碎,使样品全部通过2 mm孔径的试验筛。过筛后的土样充分混匀,装入洁净的土样袋中,备用。

土壤容重的测定使用环刀法^[34];土壤pH值的测定采用电位法^[35];土壤碳酸钙的测定采用气量法^[36];土壤有机质^[37]和全氮^[38]的测定采用燃烧法,其中有机质通过测定样品中的有机碳含量间接获取;土壤机械组成的测定使用激光衍射法^[39],所使用的仪器为Mastersizer 3000激光粒度仪,前处理时称量土壤样品总质量及未通过2 mm筛的砾石质量,以计算砾石含量;土壤全磷的测定采用HClO₄-H₂SO₄氧化钼锑抗分光光度法^[40];土壤有效磷的测定采用NaHCO₃浸提钼锑抗分光光度法^[41];土壤全钾的测定采用NaOH熔融-火焰光度法^[42];土壤速效钾的测定采用醋酸铵浸提-火焰光度法^[42]。

2.3 土壤质量指数的构建

2.3.1 最小数据集的建立

本研究基于主成分分析法^[23-28]建立土壤质量评价的MDS,使用少量关键性指标来代替复杂的原始指标,实现土壤质量评价数据的约减和降维。

基于特征值≥1的原则确定主成分,并根据选定的主成分中的因子载荷进行指标分组,将因子载荷绝对值≥0.5的土壤指标分为一组,若某一土壤指标在多个主成分上均满足此条件,则依据相关分析结果将该土壤指标分到与该组其他指标相关性较低的一组。一般选择各组中具有最大Norm值的指标进入MDS。除Norm值外,还应考虑指标与其他主成分组之间的相关性,要尽量选取与其他主成分组中相关性较小的指标。Norm值的计算公式如下:

$$Norm = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 \lambda_k)} \quad (1)$$

式中: u_{ik} 为第*i*个变量在第*k*个主成分上的载荷; λ_k 是第*k*个主成分的特征值。

2.3.2 土壤指标评分及评价指标权重的计算

不同土壤理化性质指标对土壤综合质量的影

响程度不同,且各指标的量纲及变化范围也有很大差异,直接将各指标结果进行累加会造成土壤质量评价结果的偏差,为了确保评价结果的合理性和准确性,需要将各土壤指标标准化为0~1的无量纲分数,并确定MDS中各土壤指标的权重,再进行土壤质量的评价。

本研究中依据模糊数学理论^[43],基于线性隶属度函数对各土壤理化性质指标进行标准化。由于不同指标对作物的生长和土壤质量的影响方式不同,在土壤中并非所有指标都是越多越好,因此根据不同指标对土壤质量的影响情况,此处所采用的隶属度函数主要分以下3种:“越多越好”型函数(“S”型曲线函数)、“越少越好”型函数(反“S”型曲线函数)和“抛物线”型函数。

对于对作物的生长和土壤质量起积极促进作用的土壤指标,选用“越多越好”型函数对其进行标准化,这些指标包括土壤全磷、全钾、全氮、有效磷、速效钾、有机质、黏粒含量、粉粒含量。计算公式如下:

$$S_i = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: S_i 表示指标标准化后的线性隶属度(0~1); X 为该指标实测值; X_{\max} 为该指标的最大值; X_{\min} 为该指标的最小值。

对于对作物的生长和土壤质量起消极抑制作用的土壤指标,选用“越少越好”型函数对其进行标准化,包括土壤碳酸钙、砂粒含量、砾石含量。计算公式如下:

$$S_i = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

对于在一定变化范围内对作物的生长和土壤质量起促进作用,超过该范围将对作物的生长和土壤质量起抑制作用的指标,选用“抛物线”型函数进行标准化,包括土壤容重和pH值。对于“抛物线”型函数,当指标尚未达到相应的最适范围下界时计算公式同“越大越好”型函数,超出最适范围上界时计算公式同“越小越好”型函数。

基于主成分分析所得的指标公因子方差确定指标在土壤质量评价中的权重。

$$W_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (4)$$

式中: W_i 为各指标的权重值; C_i 为该指标在主成分分析中求得的公因子方差。

2.3.3 土壤质量指数的计算

本研究选用土壤质量综合指数法^[16-20]计算各采样点及整个研究区的土壤质量指数。土壤质量指数越大,表示该采样点或区域土壤质量越好,反之则越差。

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

式中: SQI 表示土壤质量指数; W_i 为各指标的权重值; S_i 表示指标标准化后的线性隶属度(0~1)。

表1 柴达木盆地采样点土壤指标状况

Table 1 Soil indicators of sampling points in Qaidam Basin

参数	容重 /(g·cm ⁻³)	pH值	碳酸钙 /%	有机质 /%	全氮 /%	全磷 /%	全钾 /%	有效磷 /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)	黏粒 /%	粉粒 /%	砂粒 /%	砾石 /%
最小值	0.847	7.020	0.150	0.018	0.003	0.003	0.201	0.016	66.135	0.000	3.655	1.642	0.000
最大值	1.928	9.460	33.030	23.284	0.902	0.144	5.301	42.984	11 854.503	15.760	88.430	96.345	63.910
平均值	1.412	8.208	8.866	0.765	0.048	0.056	1.669	7.113	712.997	2.751	35.110	51.684	10.422
标准差	0.248	0.510	5.176	2.453	0.095	0.028	0.661	5.931	1 679.794	2.854	21.130	21.168	15.081
变异系数	0.176	0.062	0.584	3.205	1.980	0.504	0.396	0.834	2.356	1.037	0.602	0.410	1.447

字体加粗表示强变异指标。

土壤pH值7.020~9.460,平均8.208,总体上呈弱碱性。在所有土壤理化性质指标中,除全钾总体上属于三级水平、速效钾属于一级水平外,土壤容重、碳酸钙、有机质、全氮、全磷、有效磷总体上均仅符合四级到六级标准,由各土壤指标情况反映柴达木盆地土壤质量较差。

变异系数可以表征指标的离散程度,当变异系数小于0.100时,表示该指标为弱变异指标;当变异系数为0.100~1.000时,该指标为中等变异指标;变异系数大于1.000时,该指标为强变异指标。各土壤指标的变异系数如表1,有机质、速效钾、全氮、黏粒含量、砾石含量为强变异指标,pH值为弱变异指标,其余指标均为中等变异指标。这说明柴达木盆地土壤pH值的空间变化不显著,其他指标均具有一定的空间变异性。

3.1.2 土壤指标评分空间分布

柴达木盆地各土壤指标评分空间分布情况如图2所示。在所选取土壤理化性质指标中,有机质、全氮、全磷、有效磷、砂粒含量均满足东高西低的变化规律;速效钾、砾石含量则与之相反,呈现西高东低的空间分布规律。其中,有机质和全氮高值区集中分布在盆地最东部,且范围较小;全磷、有效磷、砂粒含量自盆地东部向西部逐渐减少;砾石含量和

3 结果与分析

3.1 土壤指标特征

3.1.1 土壤指标的描述性统计

通过对各指标的最小值、最大值、平均值、标准差及变异系数的描述性统计,柴达木盆地采样点各土壤指标状况如表1所列。根据全国第二次土壤普查推荐的六级土壤肥力分级标准^[44]对各指标进行分级,一级表示指标反映的土壤质量最好,六级则最差。

速效钾则自盆地西部向东部逐渐减少。

除此之外,土壤碳酸钙评分在柴达木盆地西北部相对较低;粉粒含量和碳酸钙得分空间分布大致呈现互补的规律,粉粒含量得分高的区域碳酸钙得分较低;黏粒含量在盆地中心分布集中的高值区,从中心向四周逐渐减少;全钾则呈现中部高、东西部低的空间分布;容重在盆地东北部得分较高;pH值的空间分布差异不明显。

3.2 最小数据集的构建

3.2.1 土壤指标相关性分析

在筛选土壤质量评价最小数据集之前,对土壤指标进行相关性分析,以确定各土壤指标之间的相关程度。皮尔逊相关分析结果如表2所列。

柴达木盆地土壤理化性质指标中有多对之间显著相关($P<0.05$, $|r|\geq 0.3$),若选用全部的土壤指标进行土壤质量评价,在计算复杂的同时还会造成信息的冗余,有必要选择一部分代表性高的理化指标替代全部的指标来开展柴达木盆地的土壤质量评价。

3.2.2 土壤质量评价指标最小数据集

针对柴达木盆地13个土壤理化性质指标,进行主成分分析(表3)。根据特征值大于1的原则选取

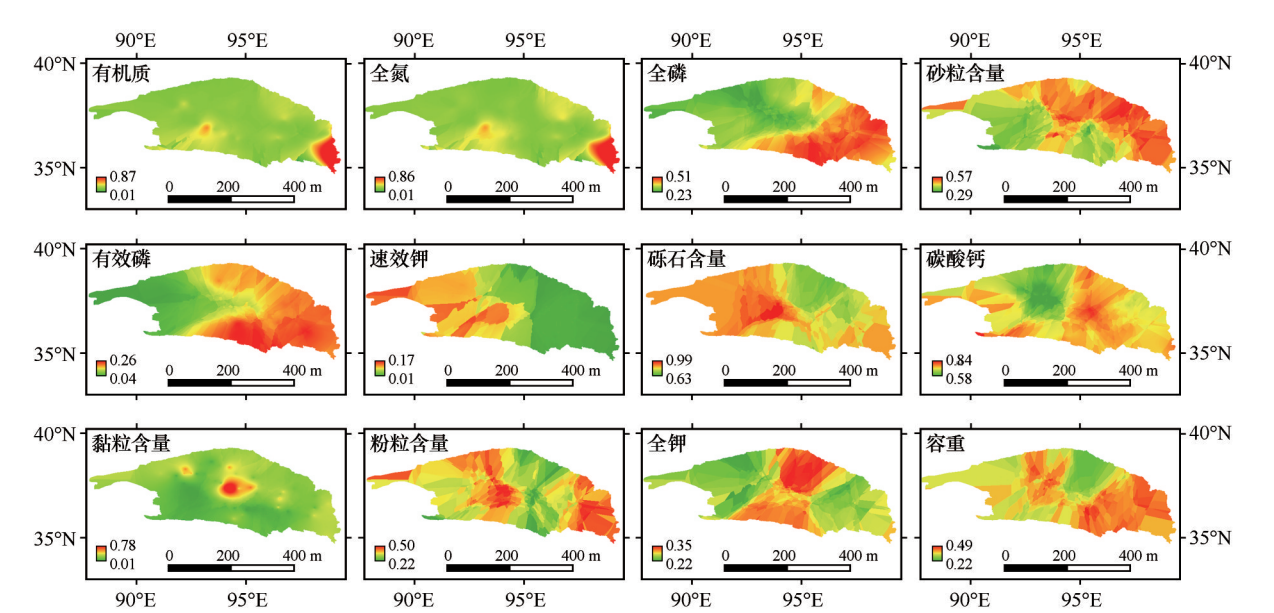


图2 柴达木盆地各土壤指标空间分布
Fig.2 Spatial distribution of soil indicacors in Qaidam Basin

表 2 土壤指标相关性分析

土壤指标	全氮	全磷	全钾	有效磷	速效钾	有机质	黏粒 含量	粉粒 含量	容重	pH值	碳酸钙	砂粒 含量	砾石 含量
全氮	1.000												
全磷	-0.073	1.000											
全钾	0.099	0.143	1.000										
有效磷	0.124	0.527**	-0.010	1.000									
速效钾	0.009	-0.087	0.327**	-0.127	1.000								
有机质	0.987**	-0.089	0.078	0.108	-0.004	1.000							
黏粒含量	0.034	-0.033	0.135	-0.049	0.244*	0.015	1.000						
粉粒含量	0.249*	-0.015	-0.124	0.095	0.340**	0.182	0.443**	1.000					
容重	-0.295*	0.197	0.165	-0.028	-0.465**	-0.270*	0.037	-0.562**	1.000				
pH值	-0.174	0.349**	0.135	0.260*	-0.102	-0.206	-0.147	-0.141	0.368**	1.000			
碳酸钙	-0.084	-0.030	-0.222	-0.016	-0.086	-0.095	0.196	0.326**	-0.095	0.075	1.000		
砂粒含量	-0.151	0.057	0.026	-0.042	-0.226	-0.088	-0.530**	-0.766**	0.194	-0.044	-0.307**	1.000	
砾石含量	-0.159	-0.054	0.121	-0.071	-0.228*	-0.146	-0.087	-0.462**	0.545**	0.301**	-0.078	-0.206	1.000

*, 显著相关($P<0.05$); **, 极显著相关($P<0.01$)。

5个主成分,其累积解释度达到76.65%,表示这5个主成分可以较好地解释全部土壤指标。

选择各主成分组因子载荷的绝对值大于0.5的指标为一组,共组成5个MDS备选组。其中,粉粒含量在第1主成分和第2主成分上的因子载荷绝对值均大于0.5,根据相关分析结果,粉粒含量和黏粒含量、砂粒含量、砾石含量、容重之间均有显著的相关性,但粉粒含量在第一主成分上的载荷明显高于

其在第二主成分上的载荷,所以将其归入第1组。因此,第1组的土壤指标包括黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量;第2组包括容重和砾石含量;第3组包括有机质和全氮;第4组包括pH值、全磷、有效磷;第5组包括碳酸钙、全钾、速效钾,根据土壤质量指标分组情况进一步确定最小数据集。

在分组1中,粉粒含量的 $Norm$ 值大于黏粒含量和砂粒含量,但砂粒含量和粉粒含量 $Norm$ 值相差不

表 3 主成分分析结果
Table 3 The results of principal component analysis

土壤指标	主成分					Norm 值	公因子 方差	分组
	1	2	3	4	5			
容重	-0.159	0.837	-0.195	0.131	0.022	1.316	0.781	2
pH 值	0.059	0.433	-0.187	0.569	0.045	1.042	0.552	4
碳酸钙	0.486	-0.043	-0.153	0.036	-0.528	1.013	0.542	5
有机质	0.020	-0.110	0.978	-0.026	0.042	1.430	0.972	3
全氮	0.077	-0.124	0.977	0.004	0.052	1.435	0.978	3
全磷	-0.056	0.013	-0.088	0.853	0.099	1.160	0.748	4
全钾	0.043	0.189	0.076	0.111	0.837	1.075	0.757	5
有效磷	-0.008	-0.094	0.168	0.823	-0.093	1.144	0.723	4
速效钾	0.309	-0.477	-0.136	-0.127	0.650	1.193	0.780	5
黏粒含量	0.733	0.010	-0.023	-0.087	0.191	1.155	0.581	1
粉粒含量	0.763	-0.536	0.140	0.077	-0.101	1.442	0.905	1
砂粒含量	-0.929	-0.050	-0.115	-0.010	0.041	1.439	0.880	1
砾石含量	0.068	0.865	-0.036	-0.083	0.052	1.303	0.764	2
特征值	2.358	2.228	2.102	1.798	1.479			
解释度	18.136	17.135	16.173	13.827	11.375			
累积解释度	18.136	35.271	51.444	65.271	76.645			

数字加粗表示各主成分分组中包含的指标。

大,且粉粒含量和全氮、速效钾、黏粒含量、容重、碳酸钙、砾石含量等土壤指标之间相关性显著,砂粒含量仅与黏粒含量、碳酸钙显著相关,所以在分组 1 中选择砂粒含量进入 MDS 中。在分组 2 中,选择 Norm 值较大的容重进入 MDS。在分组 3 中,全氮的 Norm 值略微大于有机质,但其与容重等指标的相关性强于有机质,所以选择有机质进入 MDS。在分组 4 中,选择 Norm 值最大的全磷进入 MDS。在分组 5 中,速效钾的 Norm 值明显高于碳酸钙和全钾,且速效钾的变异系数较大,具有明显的空间变异性,因此选择速效钾进入 MDS。

综上,最终确定的柴达木盆地土壤质量评价最小数据集包括容重、有机质、全磷、速效钾、砂粒含量(表 4)。

3.3 土壤质量评价

通过综合指数法计算各采样点的土壤质量综合指数,对结果进行描述统计,柴达木盆地土壤质量综合指数为 0.104~0.439,平均 0.258,土壤质量较差,变异系数为 0.269,属于中等变异程度。

表 4 MDS 指标及其权重
Table 4 Indicators in MDS and weights

土壤指标	公因子方差	权重
容重	0.781	0.188
有机质	0.972	0.234
全磷	0.748	0.180
速效钾	0.780	0.187
砂粒含量	0.880	0.211

本研究采用等间距法划分土壤质量指数的等级,以 0.070 为间隔,将研究区的土壤质量由高到低划分为 I~V 级,I 级土壤质量最好,V 级土壤质量最差,各级别土壤质量综合指数如下:I 级 0.380~0.450,II 级 0.310~0.380,III 级 0.240~0.310,IV 级 0.170~0.240,V 级 0.100~0.170。

所划分的各土壤质量等级采样点个数及占比如表 5,柴达木盆地 IV 级土壤占比最大,其次是 III 级土壤、II 级土壤,共 76.01% 的采样点处于 III~V 级,整体上土壤质量处于较差水平。

基于土壤质量综合指数空间分布情况,按照本

表 5 各土壤质量等级采样点占比

Table 5 Proportion of sampling points of each soil quality grade

土壤质量级别	I级	II级	III级	IV级	V级
采样点个数	5	13	23	26	8
比例/%	6.67	17.33	30.67	34.67	10.67

研究所划分的I~V级土壤质量分级标准,对各采样点的MDS-SQI进行重分类,可以得到柴达木盆地土壤质量等级的空间分布情况,如图3。研究区内I~II级土壤样点主要分布在盆地东部地区,且所占面积较小,中部和西部地区主要分布III~V级土壤样点,可见柴达木盆地东部土壤质量优于中部和西部,空间上大致满足自东向西逐渐变差的分布规律,且整体土壤质量处于较差水平。

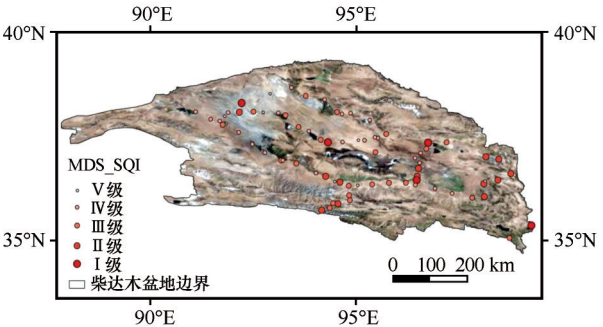


图3 柴达木盆地土壤质量等级空间分布
Fig.3 Spatial distribution of soil quality grade in Qaidam Basin

4 讨论

4.1 最小数据集的适用性验证

为了验证该最小数据集在柴达木盆地的适用性,使用MDS-SQI和TDS-SQI进行回归分析,TDS选取测定的所有指标,TDS-SQI的计算方法也使用土壤质量综合指数法,各土壤理化性质指标的权重由主成分分析所得的公因子方差计算而来(表6)。对MDS-SQI和TDS-SQI回归分析的结果如图4所示。

MDS-SQI和TDS-SQI之间相关系数为0.869 ($P<0.01$),两者之间显著相关;由回归分析结果可知,MDS-SQI和TDS-SQI之间线性拟合的系数 R^2 为0.741,表明MDS-SQI和TDS-SQI近似满足相同的变化规律,因此本研究中的最小数据集构建合理,其在柴达木盆地土壤质量评价过程中具有较好的

表 6 TDS指标及其权重

Table 6 TDS indicators and weights

土壤指标	公因子方差	权重
容重	0.781	0.078
pH值	0.552	0.055
碳酸钙	0.542	0.054
有机质	0.972	0.098
全氮	0.978	0.098
全磷	0.748	0.075
全钾	0.757	0.076
有效磷	0.723	0.073
速效钾	0.780	0.078
黏粒含量	0.581	0.058
粉粒含量	0.905	0.091
砂粒含量	0.880	0.088
砾石含量	0.764	0.077

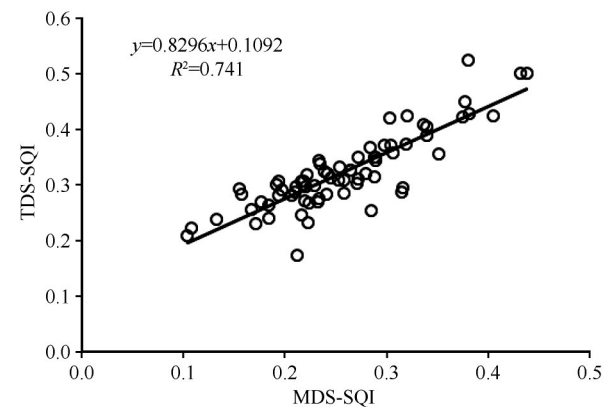


图4 MDS的适用性验证
Fig.4 Applicability validation of MDS

代表性和适用性。

柴达木盆地土壤质量评价最小数据集包括容重、有机质、全磷、速效钾、砂粒含量,包含了土壤结构、养分、质地等方面的指标,能够反映付贵全^[45]总结的风沙土应该具备的4个方面的功能,pH值、有机质、碳酸钙、氮磷钾能够衡量风沙土的增肥功能,容重可以表征保水功能,有机质和碳酸钙还可以反映固碳功能,机械组成则可以用来衡量育土功能。该最小数据集的5个指标综合表征了荒漠草原风沙土的4种功能,同时,大大减少了数据的冗余。刘利昆等^[28]、李月梅^[46]、刘江等^[47]对干旱或半干旱地区进行土壤质量评价时也选择了上述指标开展研究,但部分学者评价土壤质量时还选用了土壤微生物

量、土壤酶等指标^[48-51],本研究未选取这些指标的原因主要有3点:研究区为柴达木盆地的典型风蚀区,风沙土微生物含量和酶相对较低^[52];极端干旱区风沙土土壤微生物与土壤容重、养分含量等指标间具有明显的相关性^[53],不利于最小数据集指标的筛选;微生物群落结构、酶活性等指标采集、保存、测定比较困难,且成本较高,指标选取率不高^[15]。

4.2 柴达木盆地土壤风蚀与土壤质量

野外采样过程中,依据各采样点的植被盖度、风蚀地表面积占比、地表粗化程度、沙丘活化程度等地表景观综合特征,将风蚀强度从轻到重定性分为5个等级:微度风蚀、轻度风蚀、中度风蚀、强烈风蚀、极强风蚀,并根据实际情况确定各个采样点所属的等级。在所采集的75个采样点中,微度风蚀的点有16个,轻度风蚀的点有13个,中度风蚀的点有6个,强烈风蚀的点有35个,极强风蚀的点有5个,强烈和极强风蚀采样点占总采样点的53.3%,说明柴达木盆地土壤风蚀情况较为严重。

对采样点风蚀强度赋值,从微度风蚀到极强风蚀分别赋值为1~5,对MDS-SQI和风蚀强度之间的相关性进行分析。两者之间的皮尔逊相关系数为-0.509($P<0.01$),风蚀强度和土壤综合质量指数之间显著负相关,风蚀强度越强,采样点的土壤质量越差。该结果符合当前对土壤风蚀与土壤质量关系的一般认识^[54-57],风蚀导致土壤中细颗粒的损失,同时土壤容重增加,土壤毛管孔隙度和持水能力降低,土壤结构和团粒的稳定性受到破坏。由于土壤养分主要富集在细颗粒中,细颗粒的损失也造成土壤养分含量及有效性降低。风蚀从根本上削弱土壤的肥力,而土壤一经风蚀,想要恢复其原有的肥力状况是非常困难的,即使在人工措施的辅助下也需要耗费较长的时间和成本。因此,柴达木盆地土壤风蚀的防治是遏制土壤质量继续恶化的重要措施。

4.3 柴达木盆地土壤质量空间分异影响因素

土壤质量空间格局受多种因素的影响,刘昀东等^[58]认为影响风蚀荒漠化地区土壤质量演变的因素为风力侵蚀、荒漠植被、荒漠动物、人类活动4方面;陈金凤等^[59]对南雄盆地土壤质量分析时,主要考虑了母岩条件、植被类型、人类活动等因素。总的来说,可以将这些影响因素划分为自然和人文因

素两大类。自然因素包括地理位置、成土母质、土壤类型、地形地貌、气候水文、植被、外力侵蚀作用的影响等,人文因素包括土地利用方式、耕作管理措施、旅游活动等^[60-63]。研究认为,区域尺度土壤质量的空间分异主要受自然因素的影响,县域尺度和小尺度上一般与人文因素有关^[64-68]。

柴达木盆地满足东部土壤质量优于西部的空间分异规律,与汉光昭等^[69]对柴达木盆地高寒荒漠土壤有机碳空间分布研究结论相符合。可从地形、气候、植被土壤侵蚀等方面对其原因进行探讨。在地形上,柴达木盆地是一个被昆仑山、阿尔金山、祁连山等山脉环抱的封闭盆地^[70],在满足四周高、中心低的基本规律的同时,柴达木盆地地势自西北向东南倾斜,盆地西北部戈壁带内缘比高,盆地东南沉降剧烈,冲积与湖积平原广阔。根据曹雪等^[10]对柴达木盆地东部地区的土壤侵蚀现状调查,陡峭的地势更容易带来水土的流失,降低土壤质量。气候方面,据吕春艳等^[71]、高三星保等^[72]对柴达木盆地降水及大风特征分析,柴达木盆地以干旱为主要特点,年降水量自东南部到西北部递减;盆地风力强盛,年8级以上大风25~75 d,风速自西向东逐渐减弱,西部甚至可出现 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强风,风力侵蚀强。降水量的梯度变化直接影响土壤质量的优劣,风速通过风蚀过程影响土壤质量。通过野外调查发现,盆地东部采样点的植被盖度普遍高于盆地西部,该结果在王林林等^[70]关于柴达木盆地NDVI时空变化研究中得到验证。植被的存在既可以对地表起到一定的保护作用,减少水土流失,同时植被的根系及枯枝落叶聚集在地表,会使得土壤质量偏好^[73]。另外,杜庆等^[74]对柴达木盆地植被考察发现,盆地中部和西部分布大面积盐碱地,盐碱土中大量累积碳酸盐,其所含的盐分会影响土壤本身的质量状况以及作物的生长。综上,柴达木盆地西部地势陡峭,降水稀少,风力侵蚀强烈,植被盖度较低,且分布质量较差的盐碱土;东部地势相对平缓,降水较多,风速较小,植被盖度较高,所以会出现柴达木盆地东部地区土壤质量优于西部地区的空间变化规律。

5 结论

柴达木盆地土壤容重、碳酸钙、有机质、全氮、全磷、有效磷含量仅达到全国第二次土壤普查六级肥力分级标准下的四级到六级,土壤理化指标反映

出土壤质量状况较差。指标评分空间分布上,有机质、全氮、有效磷、全磷、砂粒含量满足东高西低,速效钾、砾石含量则与之相反,呈现西高东低的规律。

柴达木盆地土壤质量评价MDS包括容重、有机质、全磷、速效钾、砂粒含量。MDS-SQI和TDS-SQI近似满足相同的变化规律,最小数据集构建合理,其在柴达木盆地土壤质量评价过程中具有较好的代表性和适用性。

柴达木盆地整体土壤质量较差,在空间上呈现东部土壤质量优于西部的分布规律。将研究区的土壤质量由高到低划分为I~V级,I~II级土壤样点主要分布在东部地区,且所占面积较小,中部和西部地区主要分布III~V级土壤样点。

柴达木盆地西部地势陡峭,降水稀少,风力侵蚀强烈,植被盖度较低,且分布质量较差的盐碱土;东部地势相对平缓,降水较多,风速较小,植被盖度较高,所以会出现东部土壤质量优于西部的空间变化规律。MDS-SQI和风蚀强度之间显著负相关,柴达木盆地土壤风蚀的防治是遏制土壤质量继续恶化的重要措施。

参考文献:

- [1] Lehmann J, Bossio D A, Kogel-Knabner I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(10): 544-553.
- [2] 张桃林, 潘剑君, 赵其国. 土壤质量研究进展与方向[J]. *土壤*, 1999, 19(1): 2-8.
- [3] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. *生态学报*, 2006(3): 901-913.
- [4] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality [M]//Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. *Defining and Assessing Soil Quality for a Sustainable Environment*. SS-SA Special Publication 35, American Society of Agronomy, 1994: 3-21.
- [5] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [6] 王辉. 玛曲高寒草甸沙化特征及沙化驱动机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [7] 王发科, 苟日多杰, 祁贵明, 等. 柴达木盆地气候变化对荒漠化的影响[J]. *干旱气象*, 2007(3): 28-33.
- [8] 张福良, 李青基, 李积文, 等. 柴达木盆地水土流失现状及防治对策[J]. *中国水利*, 2012(18): 43-44.
- [9] 陈发虎, 汪亚峰, 甄晓林, 等. 全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究[J]. *中国藏学*, 2021(4): 21-28.
- [10] 曹雪, 焦菊英, 李建军, 等. 青藏高原柴达木盆地东部地区的土壤侵蚀现状调查[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 1-8.
- [11] 张胜邦, 董旭, 刘玉璋, 等. 柴达木盆地东南部土壤风蚀研究[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(3): 96-98.
- [12] 刘红英, 董治宝. 柴达木盆地雅丹形态特征及成因[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(3): 214-220.
- [13] 丁召静. 柴达木盆地雅丹释光年代学及其环境意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [14] 赵串串, 董旭, 辛文荣, 等. 柴达木盆地土地沙漠化现状分析与治理对策研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 196-199.
- [15] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 3043-3056.
- [16] 张雪, 孔范龙, 姜志翔. 基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2709-2718.
- [17] 刘文民, 田鹏, 刘利昆, 等. 青藏高原典型沙化区草地土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 118-124.
- [18] 杨冲, 王春燕, 王文颖, 等. 青藏高原黄河源区高寒草地土壤营养特征变化及质量评价[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(5): 896-908.
- [19] 奥勇, 蒋嶺峰, 白召弟, 等. 基于格网GIS的黄河流域土地生态质量综合评价[J]. *干旱区地理*, 2022, 45(1): 164-175.
- [20] 刘伟玮, 刘某承, 李文华, 等. 辽东山区林参复合经营土壤质量评价[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2631-2641.
- [21] 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.
- [22] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2715-2724.
- [23] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1326-1333.
- [24] 陈方正, 任健, 刘思涵, 等. 基于最小数据集的洞庭湖流域南部耕地土壤肥力综合评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1348-1359.
- [25] 朱鸣鸣, 徐镀涵, 陈光燕, 等. 基于最小数据集的喀斯特不同利用方式下土壤质量评价[J]. *草地学报*, 2021, 29(10): 2323-2331.
- [26] 廖程, 王德伟, 唐亮, 等. 基于最小数据集的成都平原某区土壤养分综合评价体系的构建[J]. *地球与环境*, 2021, 49(2): 189-197.
- [27] 王文武, 朱万泽, 李霞, 等. 基于最小数据集的大渡河干暖河谷典型植被土壤质量评价[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(6): 54-59.
- [28] 刘利昆, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于最小数据集的青藏公路沿线土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 125-131.
- [29] 赵孝丹, 颜雄, 李文昭, 等. 基于CNKI数据库的土壤质量评价文献计量分析[J]. *河南农业*, 2021(35): 56-58.
- [30] 白刚刚, 赵瑛, 陈菊林, 等. 柴达木盆地泥石流灾害特征与治理[J]. *青海大学学报*, 2016, 34(5): 58-62.
- [31] 刘秋漫. 近30年来柴达木盆地遥感生态环境质量评价[D]. 西宁: 青海师范大学, 2020.
- [32] 辛莹, 舒锴, 戴黎聪, 等. 青藏高原柴达木盆地高寒荒漠土壤有机碳空间特征[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(11): 113-118.
- [33] 张斯琦, 陈辉, 宋明华, 等. 2000-2015年柴达木盆地植被覆盖度时空变化及其与环境因子的关系[J]. *干旱区地理*, 2019, 42

- (5):1124-1132.
- [34] 土壤检测第4部分:土壤容重的测定:NY/T 1121.4-2006[S].
- [35] 土壤pH值的测定 电位法:HJ962-2018[S].
- [36] 森林土壤碳酸钙的测定:LY/T 1250-1999[S].
- [37] 土壤检测第6部分:土壤有机质的测定:NY/T 1121.6-2006[S].
- [38] 土壤检测第24部分:土壤全氮的测定 自动定氮仪法:NY/T 1121.24-2012[S].
- [39] 段世航,崔若然,江荣风,等.激光衍射法测定土壤粒径分布的研究进展[J].土壤,2020,52(2):247-253.
- [40] 土壤全磷测定法:NY/T88-1988[S].
- [41] 土壤有效磷的测定 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法:HJ704-2014[S].
- [42] 森林土壤钾的测定:LY/T 1234-2015[S].
- [43] 刘金山,胡承孝,孙学成,等.基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J].土壤通报,2012,43(5):1145-1150.
- [44] 全国土壤普查办公室.中国土壤[S].北京:中国农业出版社,1988.
- [45] 付贵全.生物炭对荒漠草地风沙土质量的影响研究[D].兰州:兰州大学,2022.
- [46] 李月梅.柴达木盆地枸杞种植区土壤养分空间变异特征[J].西南农业学报,2018,31(8):1643-1648.
- [47] 刘江,袁勤,张立欣,等.库布齐沙漠北缘不同人工灌木林地土壤肥力质量状况[J].西北林学院学报,2021,36(2):46-53.
- [48] 赵正,刘纯,尚明月,等.宁镇丘陵区村域小流域不同土壤景观下表土质量变化及评价[J].水土保持学报,2022,36(4):265-276.
- [49] 余坤,李国建,李百凤,等.不同秸秆还田方式对土壤质量改良效应的综合评价[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):213-221.
- [50] 陈梦迪,陈奇伯,黎建强,等.枯落物不同输入方式对云南松林地土壤质量的影响评价[J].云南农业大学学报(自然科学),2020,35(1):149-155.
- [51] 高娃,景宇鹏,樊明寿,等.土默川平原盐渍化土地不同利用方式的土壤质量评价[J].中国土壤与肥料,2019(6):22-31.
- [52] 吴秀芝,刘秉儒,阎欣,等.荒漠草地土壤微生物生物量和微生物熵对沙漠化的响应[J].应用生态学报,2019,30(8):2691-2698.
- [53] 靳正忠,雷加强,徐新文,等.塔里木沙漠公路防护林土壤微生物生物量与土壤环境因子的关系[J].应用生态学报,2009,20(1):51-57.
- [54] 赵哈林,周瑞莲,苏永中,等.我国北方半干旱地区土壤的沙漠化演变过程与机制[J].水土保持学报,2007(3):1-5.
- [55] Jason P F, Jayne B, David D B, et al. The ecology of dust[J]. Front of Ecological Environment, 2010, 8(8):423-430.
- [56] 丁国栋.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,2010:157-158.
- [57] Vogel C, Heister K, Buegger F, et al. Clay mineral composition modifies decomposition and sequestration of organic carbon and nitrogen in fine soil fractions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(4):427-442.
- [58] 刘昀东,高广磊,丁国栋,等.风蚀荒漠化地区土壤质量演变研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(5):161-168.
- [59] 陈金凤,余世钦,符加方,等.华南红层地貌区不同利用方式土壤质量特征及其影响因素:以南雄盆地为例[J].生态环境学报,2022,31(5):918-930.
- [60] 俞海,黄季焜,Scott Rozelle,等.土壤肥力变化的社会经济影响因素分析[J].资源科学,2003(2):63-72.
- [61] Tan Z, Lal R, Owens L, et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92:53-59.
- [62] 曹鹤,薛立,谢腾芳,等.华南地区八种人工林的土壤物理性质[J].生态学杂志,2009,28(4):620-625.
- [63] 周波,高云华,张池,等.华南赤红壤地区4种不同耕作模式对土壤肥力属性的影响[J].华北农学报,2012,27(增刊1):315-319.
- [64] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等.县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究[J].土壤学报,2003,40(1):79-88.
- [65] 雷咏雯,危常州,李俊华,等.不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究[J].土壤,2004,36(4):376-381.
- [66] 赵彦锋,史学正,于东升,等.小尺度土壤养分的空间变异及其影响因素探讨:以江苏省无锡市典型城乡交错区为例[J].土壤通报,2006,37(2):2214-2219.
- [67] 杨艳丽,史学正,于东升,等.区域尺度土壤养分空间变异及其影响因素研究[J].地理科学,2008,28(6):788-792.
- [68] 陈国平,程珊珊,丛明旸,等.三种阔叶林凋落物对下层土壤养分的影响[J].生态学杂志,2014,33(4):874-879.
- [69] 汉光昭,曹广超,曹生奎,等.高寒地区生态修复草地和林地土壤颗粒有机碳分解特征[J].中国沙漠,2022,42(5):36-43.
- [70] 王林林,刘普幸,王允.近14年来柴达木盆地NDVI时空变化及其影响因素[J].生态学杂志,2015,34(6):1713-1722.
- [71] 吕春艳,李旭,刘明歆,等.柴达木盆地1981-2017年降水及大气环流特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(3):78-87.
- [72] 高三星保,许学莲,何爱兵,等.1961-2018年柴达木盆地大风日数变化特征[J].现代农业科技,2021(20):163-165.
- [73] 曹晓云,祝存兄,陈国茜,等.2000-2021年柴达木盆地地表绿度变化及地形分异研究[J].生态环境学报,2022,31(6):1080-1090.
- [74] 杜庆,孙世洲.柴达木盆地植被考察简况[J].植物生态学与地植物学丛刊,1981(1):77-78.

Assessment of soil quality in typical wind erosion area of Qaidam Basin

Huang Mengzhen, Lu Ruijie, Zhao Jin, Ma Luo

(MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control / State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil quality assessment is the key to effectively protect soil, and it is crucial to ensure ecosystem stability, regional ecological security and sustainable development. The Qaidam Basin is the most serious wind erosion area in the Qinghai-Tibet Plateau. The change of soil system caused by wind erosion has a profound impact on the ecological security barrier and water conservation function of the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the analysis of physical and chemical properties of surface soil in typical wind erosion areas of Qaidam Basin, this paper uses principal component analysis to establish the minimum data set, and constructs the comprehensive index of soil quality for soil quality evaluation. The results show that the soil bulk density, calcium carbonate, organic matter, total nitrogen, total phosphorus and available phosphorus content in Qaidam Basin only reach the fourth or fifth grade under the quality classification standard of the second national soil census. The quality of soil physical and chemical indicators is poor. In terms of spatial distribution, the contents of organic matter, total nitrogen, available phosphorus, total phosphorus and sand in the eastern region of Qaidam Basin are higher than those in the western region, while the contents of available potassium and gravel in the western region are higher than those in the eastern region. The minimum data set (MDS) of soil quality evaluation in Qaidam Basin includes five indicators : bulk density, organic matter, total phosphorus, available potassium and sand content. The soil quality comprehensive index (MDS-SQI) based on the MDS has good representativeness and applicability. The overall soil quality in Qaidam Basin is poor, and gradually deteriorates from the eastern region to the western region. The soil quality in the study area is divided into grade I-V from good to poor. Grade I-II sampling points are mainly distributed in the eastern region, and the area is small. Grade III-V sampling points are mainly distributed in the central and western regions. The wind erosion intensity in Qaidam Basin is significantly negatively correlated with MDS-SQI, and the prevention and control of soil wind erosion in Qaidam Basin is an important measure to curb the continuous deterioration of soil quality.

Key words: soil quality assessment; minimum data set; principal component analysis; Qaidam Basin