

DOI: 10.5846/stxb202007081771

张轶群, 吴迪, 李嘉珣, 付晓, 吴钢. 草原矿区土壤环境损害基线评估判定的应用研究——以内蒙古草原矿区为例. 生态学报, 2021, 41(18): 7417-7424.

Zhang Y Q, Wu D, Li J X, Fu X, Wu G. Baseline assessment of grassland soil in mining area: A case study in the Inner Mongolia grassland. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7417-7424.

草原矿区土壤环境损害基线评估判定的应用研究 ——以内蒙古草原矿区为例

张轶群^{1,2}, 吴 迪³, 李嘉珣⁴, 付 晓^{1,*}, 吴 钢^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中科院建筑设计研究院有限公司, 北京 100086

4 住房和城乡建设部政策研究中心, 北京 100835

摘要:草原生态环境损害评估鉴定中, 土壤基线是重要的评价标准。如何确定土壤基线, 寻找适宜的基线判定方法, 进而判定草原土壤的受损害程度, 已成为草原生态系统损害评估鉴定、生态系统保护及修复工作中的关键。基于科学、务实、准确的原则, 对内蒙古 2 个草原矿区土壤的总有机质(TOM)、N、P、K 含量进行采样分析, 采用历史数据法、参考点位法和统计点位法来判定土壤基线。结果表明, 胜利矿区土壤养分均值与参考点位法基线值差异较小, 采矿对胜利矿区土壤养分含量未见直接的影响。宝日希勒矿区土壤中 TOM 含量均值明显低于 3 种方法得出的基线值, N、K 均值与参考点位法基线值相似, P 均值位于 3 种基线值之间。可见采矿对宝日希勒矿区土壤中 TOM 的含量造成了直接影响, 对 N、P、K 含量未见直接的影响。最适宜该地区的方法取决于样本质量和评估尺度, 建议以参考点位法为主, 历史数据法和统计点位法作为验证工具, 3 种方法共同使用。

关键词:草原土壤质量; 土壤基线; 判定方法; 生态损害; 生态评价

Baseline assessment of grassland soil in mining area: A case study in the Inner Mongolia grassland

ZHANG Yiqun^{1,2}, WU Di³, LI Jiaxun⁴, FU Xiao^{1,*}, WU Gang^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Architecture Design and Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China

4 Policy Research Center, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Beijing 100835, China

Abstract: Soil baseline is regarded as an important indicator in the assessment of grassland ecological and environmental damage. How to determine the soil baseline, find the suitable method, and determine the damage degree of soil have become the key point of grassland protection and ecological assessment. In this study, we selected three methods to determine the soil nutrients baseline (total organic matter (TOM), N, P, and K) in Shengli mining area of Xilin Gol Grassland and Baorixile mining area of Hulun Buir Grassland in northern China based on practical and accurate criteria. The soil nutrients' baselines were analyzed by historical data method, reference site method, and the statistical method. The results showed relatively small difference between the soil nutrient level of Shengli mining area and its soil baseline of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503603, 2016YFC0501101)

收稿日期: 2020-07-08; 网络出版日期: 2021-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaofu@cees.ac.cn

reference site method. The content of K was disturbed by mining but its average had not decreased significantly compared with the baseline values, so mining activities had no direct impact on the soil nutrient level of Shengli mining area. The average content of TOM in the soil of Baorixile mining area was obviously lower than the baselines of the three methods. The average contents of N and K were similar to the baseline of reference site method, and the average content of P was in the range of three baselines. As a result, mining had a direct impact on the content of TOM in the soil of Baorixile mining area, but no direct impact on the content of N, P, and K. All three methods could be used to determine the grassland soil baseline, but the results were different, and each method had its own advantages and disadvantages. Historical data method reflected the actual historical state of the grassland in the study area, and could be used as a comparative standard for the assessment and identification of ecological environment damage, but it lacked consideration of natural evolution and other factors. Reference site method was most effective when areas with the same natural conditions and ecological function were available, which could be very hard to find in reality. The calculation process of statistical method was prompt and convenient, and its utilization of data was quite high, whereas it was not suitable for the grassland area with high degree of human interference. The most appropriate method for baseline determination may depend on the availability of sample data and evaluation scale. Reference site method would be preferred, while historical data method and statistical method can be the substitutes. It is recommended to use multiple methods together to verify the result.

Key Words: grassland soil quality; soil baseline; determining method; ecological damage; ecological assessment

统筹“山水林田湖草”系统治理,实行最严格的生态环境保护制度^[1]。内蒙古大草原是我国重要的陆地生态系统,具有水土保持、固沙固碳、维持生态系统平衡、促进物质能量循环等多种生态功能^[2-3],不仅是众多动植物的栖息地,更是我国北方重要的生态屏障^[4]。近年来随着过度放牧、私开滥垦、矿山开采、城镇化扩展等人为干扰的不断增加,水土流失、草原荒漠化、生物量减少等生态问题屡见不鲜^[5-7],如何评价草原生态系统的受损程度已成为草原保护管理和可持续发展的重要内容。

生态环境损害是指因生态破坏、环境污染造成大气、地表水、地下水、土壤等环境要素和植物、动物、微生物等生物要素的不利改变,及上述要素构成的生态系统功能退化的行为^[8]。随着我国经济的高速发展,人们对生态系统的干扰与日俱增,生态环境损害鉴定评估的案件越来越多。2016年《生态环境损害鉴定评估技术指南总纲》及2017年《生态环境损害赔偿制度改革方案》的颁布,明确了生态环境损害的赔偿范围、责任主体、索赔主体和损害赔偿解决途径等^[9-10],标志着我国已逐步建立比较完善的生态环境损害评估鉴定、修复和赔偿制度。

基线通常用于描述在生态破坏行为发生前,没有人为干扰或不利改变情况下的状态^[11]。基线值可以是一组数值或一个区间值,是反映一个地区生态系统状态的综合性指标集,可用于判定人为干扰的程度^[12]。土壤损害基线是判断生态环境损害发生的依据,也是确认生态环境损害的时空尺度、损害程度、确认生态环境损害修复的重要标准^[13]。土壤基线目前在国内的生态环境损害评估鉴定研究中已得到开展和应用,如吉林省抚松县落叶阔叶混交林土壤养分基线的判定^[14],内蒙古锡林浩特市胜利矿区土壤重金属含量基线的研究^[15],新疆伊犁河流域土壤重金属基线的研究及污染评价^[16],长沙市乔口镇土壤重金属基线值的厘定应用等^[17]。

土壤基线因研究目标及研究区域的不同存在很大的差异,目前国际上尚未存在通用的判定方法,常见的方法包括历史数据法、参考点位法、环境标准法、统计点位法、模型预测法和专家判别法等,各方法都有优缺点和使用的局限性,实际研究应用中只能根据评价区域的具体情况选择最适合的方法^[18]。

内蒙古草原矿区的土壤基线因相关研究较少,目前尚未存在统一评价标准,如何判定土壤环境的基线在草原生态损害评估鉴定中显得十分重要。土壤养分由于受人为干扰的高敏感性,可作为评价土壤质量和草原生态系统健康的重要指标^[19-21]。本研究以内蒙古2个典型的草原矿区为研究对象,采用历史数据法、参考点

位法和统计点位法来计算土壤养分基线。本研究的目的是:(1)用3种方法来判定草原土壤基线,检验不同方法所得结果的差异;(2)根据所得的基线值,分析采矿对周边草原土壤养分的影响;(3)确定适合草原土壤基线判定的方法,并分析不同方法的适用范围。以期更好的为草原生态系统损害的评估鉴定、生态保护和污染防治提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及采样调查

本研究以内蒙古草原矿区为例,选择了位于典型草原的锡林郭勒盟胜利露天矿区、以及位于草甸草原的呼伦贝尔市宝日希勒露天矿区为研究对象,对草原矿区的土壤养分基线进行判定及分析。

1.1.1 锡林郭勒盟胜利矿区

胜利矿区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟(以下简称“锡盟”),地处东经 $115^{\circ}13'$ — $117^{\circ}06'$,北纬 $43^{\circ}02'$ — $44^{\circ}52'$,该地区气候高寒干旱,无霜期短,具有寒冷、风大、雨少、日照长、温差大、蒸发力强的特点。平均气温为 $0-3^{\circ}\text{C}$,年平均风速为 $4-5\text{ m/s}$,年均降水量为 295 mm ^[22]。区域内以典型草原为主,土壤以风沙土、栗钙土、黑钙土为主,偏碱性,全盟土壤总的养分状况是缺磷、氮中等、钾中等、有机质中等偏高的水平^[23]。锡盟煤炭资源丰富,已探明储量1448亿t,褐煤总储量在全国居第一位。锡盟煤电基地是国家“十二五”规划中大力发展的7个以电力外送为主的千万千瓦级清洁高效大型煤电基地之一^[24]。胜利矿区西一号露天矿于2004年开始投产运营,目前生产能力约为2000万t/a。

在胜利矿区西一号露天矿的南、西和北3个方向进行样本调查,采场东侧为内排土场未设置样点。根据矿区的实际情况,在矿区西向(开采推进方向)距采场外围边界0、0.25、0.7、1.5 km处各设置1个调查样地,在南侧边界0 km、西南边界0、0.5、3 km处各设置1个调查样地,在北排土场北侧0.7、3 km、沿帮排土场北侧0.5、3.5 km、沿帮与北排土场之间距采场1.5、3 km处各设置1个调查样地(图1)。同时在矿区南15 km处未受采矿干扰的草原对照区设置1个调查样地。在每个 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 调查样地随机设置3个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方,每个样方用直径5 cm土钻按梅花法采集0—20 cm混合土样。混合后装入自密封塑料袋带回实验室风干。采用半微量凯氏法(Semi micro Kjeldahl method)和电感耦合等离子体质谱法(Inductively coupled plasma mass spectrometry)测定土壤中总有机质(TOM)、N、P、K的含量^[25]。

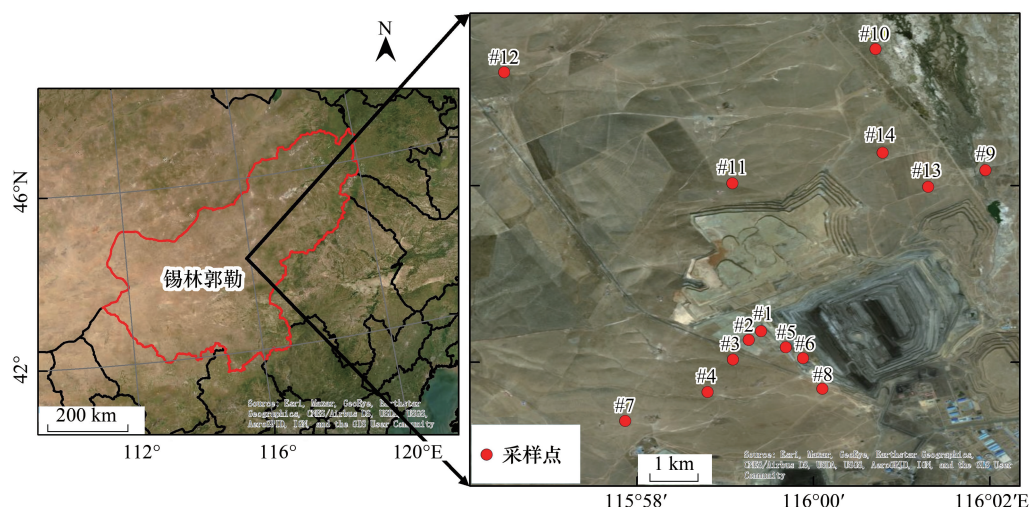


图1 胜利矿区位置及采样点分布

Fig.1 Location of Shengli open-pit mine and distribution of sampling points

1.1.2 呼伦贝尔市宝日希勒矿区

宝日希勒矿区位于内蒙古自治区呼伦贝尔市,地理坐标为东经 115°31′—126°04′,北纬 47°05′—53°20′。该区域属于温带大陆性季风气候,冬季严寒漫长,夏季温凉短促,春秋风多而干燥。年平均气温-1℃,年平均降水量 398 mm^[26]。区域内以草甸草原为主,其他草类包括森林草原和沙地草原。土壤类型以黑钙土为主,其他包括栗钙土和暗栗钙土等^[27]。该地区自然资源丰富,已探明煤炭储量 580 亿 t。宝日希勒露天矿于 2001 年开始投产运营,目前生产能力约为 3000 万 t/a。

在呼伦贝尔草原宝日希勒矿区周围共采集了 112 个土壤样点(图 2)。在矿区的东、东北、北、西北、西和南方向共设置了 7 条采样带,每条样带至少 15 个采样点,样点之间的距离为 400 m 至 1000 m,采样区包括草原的原状区和复垦区,尽可能避开牧区、河流、道路和人为设施,但有个别样点位于农业区(小麦种植)旁侧。同时在矿区南 10 km 处未受采矿干扰的草原对照区设置 1 个调查样地。每个土壤样地为 1 m×1 m 方格,采用五点法取 0—20 cm 层土样 500 g,混合后装入自密封塑料袋带回实验室风干。采用半微量凯氏法和电感耦合等离子体质谱法测定土壤中 TOM、N、P、K 的含量。

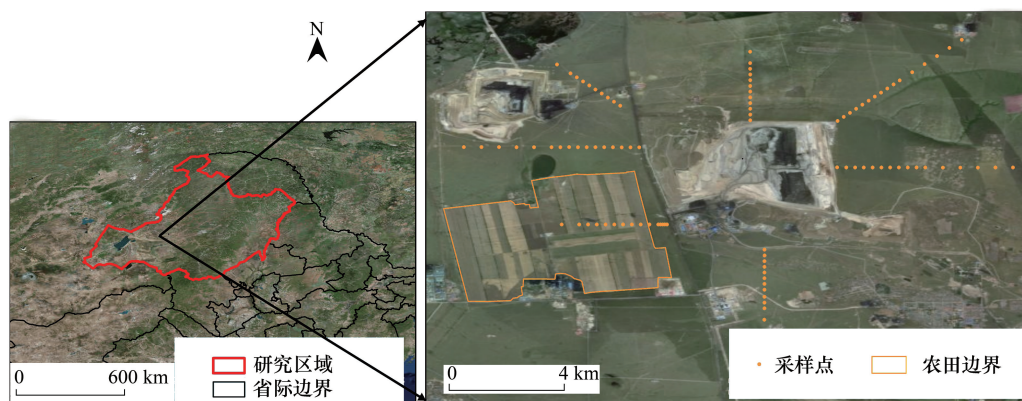


图 2 宝日希勒矿区位置及采样点分布

Fig.2 Location of Baorixile open-pit mine and distribution of sampling points

1.2 研究方法

草原生态环境损害评估鉴定工作包括评估准备、损害确认调查、因果关系和机理分析、生态环境损害量化评估和损害赔偿及修复共 6 个方面,工作流程如图 3 所示。土壤基线的判定在草原生态环境损害评价中至关重要,是草原生态损害量化的前提^[28]。通过确定损害区域的土壤基线,再与当下生态环境状态进行比较,通过两者的差异来判定损害程度,继而为后续的生态损害量化评估和责任判定提供依据^[29]。

本研究采用历史数据法、参考点位法、统计点位法共 3 种方法判定矿区周边草原土壤养分基线,包括土壤中 TOM、N、P、K 的含量,研究采矿对周边草原土壤养分的影响程度,并分析 3 种基线判定方法的科学性与适用性,3 种方法的特点及优缺点如表 1 所示。

表 1 基线判定方法及优缺点

Table 1 Baseline determination methods with advantages and disadvantages

判定方法 Determination method	特点 Feature	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
历史数据法 Historical data method	损害行为发生前评价区域的历史状态	评价区域受干扰前的历史状态最直接客观	历史数据难以获取;生态系统演化后与历史状态存在差异
参考点位法 Reference site method	相同自然条件下未受干扰的对照区域状态	评价结果准确客观	相同自然条件的未受干扰区域可能不存在
统计点位法 Statistical method	利用样本调查结果进行统计分析得出基线值	考虑了人为干扰与生态系统的自然变异	样本量较少的情况下会影响精度

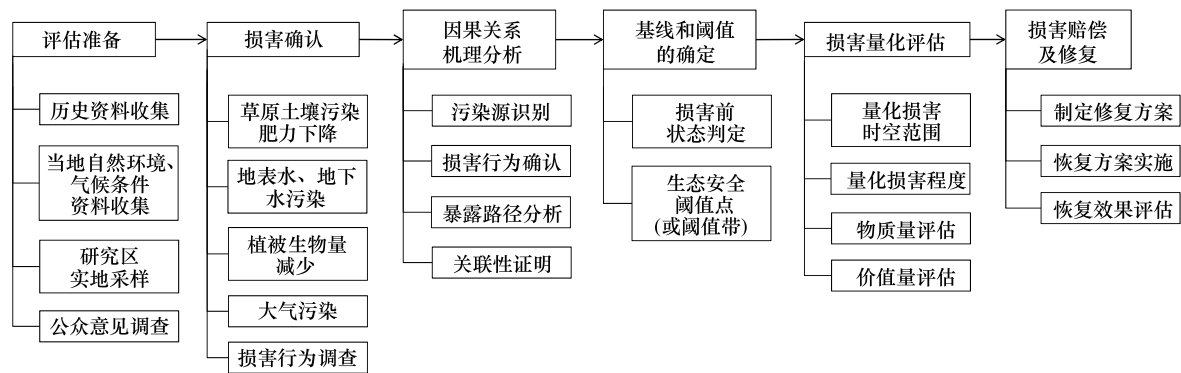


图3 草原生态环境损害评估鉴定流程

Fig.3 Assessment process of grassland ecological damage

历史数据法选用中国土壤数据库中锡盟、呼伦贝尔市 1998—2010 年的土壤养分平均值作为基线值^[30]。参考点位法选用未受采矿干扰对照区的样本平均值作为基线值。统计点位法包括群体分布法和三分位法。群体分布法由美国环保署(U.S. EPA)提出,用于研究人类干扰较强地区基线的方法^[31]。该方法以评价区内全部有效样点(去除已知损害严重的样点)为样本集,选择每个指标数据频数分布的后 25%作为该地区的基线值^[32]。本研究将采集的土壤样本各养分指标值按从大到小顺序排列,预设含量高为土壤质量良好,排除约 10%受损样本,选择每个指标值最高四分位的数值作为基线值。三分位法也是由美国环保署提出,用于研究受人类干扰程度较小地区基线的方法^[33]。该方法使用全部样本数据,将各指标值按从大到小顺序排列,选择指标数值最大的前三分之一的中位数作为基线值^[34]。

2 草原矿区土壤损害基线的判定与讨论

2.1 土壤基线的判定结果与分析

首先通过群体分布法、三分位法计算得出胜利矿区、宝日希勒矿区的土壤养分基线值,再将两种方法所得的数值取平均值,作为统计点位法得出的基线值(表 2、表 3)。

表 2 统计点位法下的胜利矿区土壤基线值/(g/kg)

Table 2 Soil baseline of Shengli mining area based on statistical method

土壤养分 Soil nutrient	群体分布法 Population distribution method	三分位法 Trisection method	统计点位法基线值 Statistical method
总有机质 Total organic matter	31.6	31.83	31.71
氮 N	1.03	1.05	1.04
磷 P	0.75	0.79	0.77
钾 K	19.15	19.34	19.25

表 3 统计点位法下的宝日希勒矿区土壤基线值/(g/kg)

Table 3 Soil baseline of Baorixile mining area based on statistical method

土壤养分 Soil nutrient	群体分布法 Population distribution method	三分位法 Trisection method	统计点位法基线值 Statistical method
总有机质 Total organic matter	54.59	59.58	57.04
氮 N	3.07	3.31	3.19
磷 P	1.96	2.17	2.07
钾 K	29.96	32.27	31.11

再将草原矿区的采样平均值与统计点位法、历史数据法和参考点位法所得的基线值进行对比分析(表 4、表 5),结果如下:

胜利矿区的 TOM、P、K 样本均值与 3 种方法所得的基线值都较为相似,N 的样本均值与参考点位法基线值较为相似,但低于统计点位法基线值、明显低于历史数据法基线值。可见胜利矿区总体土壤养分与参考点位法中未受采矿干扰的草原对照区差异相对较小,但土壤的平均 N 含量与历史数据值的差异较大,说明目前的矿区草原及对照区草原的土壤环境已与历史状态发生了变化,如自然演变等原因,导致了土壤中 N 含量的下降。对胜利矿区样本与对照区进行差异显著性检验,发现 TOM、N、P 差异都不具有显著性($P>0.05$),但 K 差异具有显著性($P<0.05$),说明矿区周边土壤中 K 的含量受到了采矿的干扰,但 K 平均含量与 3 种方法所得的基线值相比,尚未有明显下降。可见采矿对胜利矿区土壤中 TOM、N、P、K 养分含量未见明显的影响。

宝日希勒矿区土壤中 TOM 平均含量明显低于 3 种方法得出的基线值,土壤中 N、K 平均含量虽然低于历史数据法基线值和统计点位法基线值,但与参考点位法中未受采矿干扰的草原对照区差异较小。P 平均含量位于 3 种方法所得基线值之间。对宝日希勒矿区样本与对照区进行差异显著性检验,发现 TOM 和 P 的差异显著性非常显著($P<0.01$),N 和 K 差异都不具有显著性($P>0.05$),说明矿区周边土壤中 TOM 和 P 的含量受到了采矿的干扰。P 平均含量高于对照区,但低于历史数据法和统计点位法所得的基线值。可见采矿对宝日希勒矿区土壤中 TOM 的含量造成了明显的下降,对土壤中 N、P、K 含量未见明显的影响。

表 4 胜利矿区样本平均值与 3 种方法所得基线值的对比/(g/kg)

Table 4 Comparison between the average value of samples in Shengli mining area and baseline values obtained by three methods

土壤养分 Soil nutrient	矿区样本平均值 Sample average of mining zone	统计点位法基线值 Statistical method	历史数据法基线值 Historical data method	参考点位法基线值 Reference site method
总有机质 Total organic matter	29.1	31.71	27.62	30.91
氮 N/(g/kg)	0.71	1.04	1.51	0.7
磷 P/(g/kg)	0.72	0.77	0.66	0.72
钾 K/(g/kg)	18.35	19.25	20.81	19.31

表 5 宝日希勒矿区样本平均值与 3 种方法所得基线值的对比/(g/kg)

Table 5 Comparison between the average value of samples in Baorixile mining area and baseline values obtained by three methods

土壤养分 Soil nutrient	矿区样本平均值 Sample average of mining zone	统计点位法基线值 Statistical method	历史数据法基线值 Historical data method	参考点位法基线值 Reference site method
总有机质 Total organic matter	41.77	57.04	53.51	63.5
氮 N	2.29	3.19	2.65	2.2
磷 P	1.75	2.07	2.07	1.1
钾 K	21.08	31.11	23.25	20.9

2.2 3 种基线判定方法的差异与适用性讨论

3 种判定方法均可用于确定草原土壤基线,但结果之间存在差异,3 种方法各有优缺点。历史数据法反映了研究区草原的历史真实状态,可作为生态环境损害评估鉴定的重要标准^[18],但缺乏对自然演变等因素的考虑,仅可作为评判参考,不建议单独使用。

统计点位法所采用的群体分布法和三分位法由于对数据的筛选、计算方式的不同,导致结果不同。本研究由于样点选取的随机性以及土壤空间异质性,个别样点的某些指标异常,如宝日希勒矿区分布在西南方向农田区域的部分样点,由于受到农业活动干扰,养分含量极高,群体分布法排除了这些异常样本(占样本总量的 10%)。而三分位法作为群体分布法的补充方法^[31],其判定标准比群体分布法更为严格,保留所有样本数据,不做任何排除,所以三分位法所得的基线值高于群体分布法。胜利矿区由于不存在采矿外的其他人为干扰,异常样本较少,所以群体分布法和三分位法的结果差异不大。综上所述,统计点位法的计算过程简单便

捷,对数据的利用度高,适合在人为干扰程度较低的草原区使用。

参考点位法应尽可能的选择相同自然条件、生态功能一致、距离相对较近、未受人类活动干扰的对照区^[35]。如果不能满足以上条件,可通过建立与评价区域相似度评价指标体系等方式,定量分析参考点位与评价区域(评价要素)的相似性^[15],来选择较为合适的对照区。同时,该方法综合考虑了生态系统的自然变异,适合于矿区草原生态系统土壤环境损害基线的判定。

综上所述,对于草原矿区的土壤基线判定,建议先采用参考点位法进行评价区和对照区的对比,之后用历史数据法和统计点位法对结果进行检验。在使用以上方法判定较大范围的土壤基线时,随着评价范围的扩大,土壤的理化性质、植被优势种、气候条件、干扰源等都将有所不同,需综合考虑风险源及权重等影响因素,并结合专家意见等。此外,样本数量决定了数据质量,未来的研究中应根据实际情况尽可能扩大采样范围,提高数据质量,并深入研究相关影响因素的作用机理,不断改进完善基线判定方法,提高研究结果的精度。草原生态系统的基线判定需满足以下几个条件:(1)研究对象的准确描述性;(2)结合实地考察和样本采集;(3)实操性、经济性和时效性强;(4)多种方法对所得结果共同验证。

3 结论

本研究以内蒙古锡盟胜利矿区、呼伦贝尔市宝日希勒矿区为研究对象,对矿区土壤中 TOM、N、P、K 含量进行采样分析和基线判定。结果表明,胜利矿区土壤养分值与参考点位法基线值差异较小,采矿对胜利矿区土壤养分含量未见直接的影响。宝日希勒矿区土壤中 TOM 含量明显低于 3 种方法得出的基线值,N、K 含量与参考点位法基线值相似,P 均值位于 3 种基线值之间。可见采矿对宝日希勒矿区土壤中 TOM 的含量造成了明显下降,对 N、P、K 含量未见明显的影响。对于草原矿区的土壤基线判定,建议优先采用参考点位法,同时将历史数据法和统计点位法用于检验对比。

参考文献(References):

- [1] 成金华, 尤喆. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(2):1-6.
- [2] Xu Y Q, Wan S Q, Cheng W X, Li L H. Impacts of grazing intensity on denitrification and N₂O production in a semi-arid grassland ecosystem. Biogeochemistry, 2008, 88(2):103-115.
- [3] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630):253-260.
- [4] 白永飞, 赵玉金, 王扬, 周楷玲. 中国北方草地生态系统服务评估和功能分区助力生态安全屏障建设. 中国科学院院刊, 2020, 35(6):675-689.
- [5] Balvanera P, Pfisterer A B, Buchmann N, He J S, Nakashizuka T, Raffaelli D, Schmid B. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. Ecology Letters, 2006, 9(10):1146-1156.
- [6] Wang L Y, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Xiao Y, Ouyang Z Y. An assessment of the impact of urbanization on soil erosion in Inner Mongolia. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(3):550.
- [7] 韩林桅, 付晓, 严岩, 王辰星, 吴钢. 基于解释结构模型的煤电一体化开发生态环境累积效应识别. 应用生态学报, 2017, 28(5):1653-1660.
- [8] 王金南, 刘倩, 齐霁, 於方. 加快建立生态环境损害赔偿制度体系. 环境保护, 2016, 44(2):26-29.
- [9] 於方, 张衍桑, 徐伟攀. 《生态环境损害鉴定评估技术指南总纲》解读. 环境保护, 2016, 44(20):9-11.
- [10] 吴惟予. 生态环境损害赔偿中的利益代表机制研究——以社会公共利益与国家利益为分析工具. 河北法学, 2019, 37(3):129-146.
- [11] Stoddard J L, Larsen D P, Hawkins C P, Johnson R K, Norris R H. Setting expectations for the ecological condition of streams: the concept of reference condition. Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America, 2006, 16(4):1267-1276.
- [12] Hawkins C P, Olson J R, Hill R A. The reference condition: predicting benchmarks for ecological and water-quality assessments. Journal of the North American Benthological Society, 2010, 29(1):312-343.
- [13] 梁增强, 毛安琪, 杨菁. 生态环境损害鉴定评估技术难点探讨. 环境与发展, 2019, 31(12):241-242.
- [14] 李嘉珣, 曹飞飞, 吴钢. 3 种判定落叶阔叶混交林土壤损害基线的方法研究——以吉林省抚松县为例. 生态学报, 2019, 39(17):6218-6226.

- [15] 韩林桅, 全元, 付晓, 单鹏, 吴钢. 参考点位法在土壤基线判定中的改进与应用. 生态学报, 2018, 38(21):7813-7818.
- [16] 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹. 伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价. 环境科学, 2014, 35(6):2392-2400.
- [17] 范凯, 韦朝阳, 杨晓松. 长沙市乔口镇土壤重金属地球化学基线值的厘定及应用. 环境科学学报, 2014, 34(12):3076-3083.
- [18] 龚雪刚, 廖晓勇, 阎秀兰, 李尤, 杨坤, 赵丹. 环境损害鉴定评估的土壤基线确定方法. 地理研究, 2016, 35(11):2025-2040.
- [19] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, Cline R G, Harris R F, Schuman G E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1):4-10.
- [20] Zeng Q C, Liu Y, Li X, Huang Y M. How fencing affects the soil quality and plant biomass in the grassland of the loess plateau. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(10):1117.
- [21] Heneghan L, Miller S P, Baer S, Callahan Jr M A, Montgomery J, Pavao-Zuckerman M, Rhoades C C, Richardson S. Integrating soil ecological knowledge into restoration management. Restoration Ecology, 2008, 16(4):608-617.
- [22] 佟斯琴, 刘桂香, 武娜. 1961-2010 年锡林郭勒盟气温和降水时空变化特征. 水土保持通报, 2016, 36(5):340-345, 351-351.
- [23] 顾永瑞, 张彤, 白红玉. 内蒙土壤环境背景值属性分类. 内蒙古环境保护, 1995, 7(1):6-9.
- [24] 周政达, 王辰星, 付晓, 全元, 魏东, 王毅, 高雅, 李思远, 吴钢. 基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系. 生态学报, 2014, 34(11):2830-2836.
- [25] Kim S C, Yang J E, Kim D K, Cheong Y W, Skousen J, Jung Y S. Screening of extraction methods for Cd and As bioavailability prediction in rhizospheric soil using multivariate analyses. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1):327-335.
- [26] 娜仁夫, 那仁满都拉, 郭恩亮, 特力格尔. 呼伦贝尔市 1961 年—2017 年气候变化特征分析. 内蒙古科技与经济, 2020, (5):50-52.
- [27] 魏复盛, 杨国治, 蒋德珍, 刘志虹, 孙本民. 中国土壤元素背景值基本统计量及其特征. 中国环境监测, 1991, 7(1):1-6.
- [28] 曹飞飞, 付晓, 李嘉珣, 汪铭一, 吴钢. 基于灰色拓扑理论的草地生态系统损害基线动态预测. 生态学报, 2020, 40(2):540-548.
- [29] 李欢欢, 张雪琦, 张永霖, 董仁才. 城市生态环境损害鉴定评估监测体系研究. 生态学报, 2019, 39(17):6469-6476.
- [30] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤数据库. <http://vdb3.soil.csdb.cn/>. (请作者补充本条文献引用日期)
- [31] USEPA. Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria; Technical Guidance Document. Washington, DC; U.S. Environmental Protection Agency, 1998.
- [32] Angradi T R, Bartsch W M, Trebitz A S, Brady V J, Launspach J J. A depth-adjusted ambient distribution approach for setting numeric removal targets for a Great Lakes Area of Concern beneficial use impairment: degraded benthos. Journal of Great Lakes Research, 2017, 43(1):108-120.
- [33] Dodds W K, Carney E, Angelo R T. Determining ecoregional reference conditions for nutrients, secchi depth and chlorophyll *a* in Kansas lakes and reservoirs. Lake and Reservoir Management, 2006, 22(2):151-159.
- [34] Gibson G, Carlson R, Simpson J, Smeltzer E, Gerritson J, Chapra S, Heiskary S, Jones J, Kennedy R. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual Lakes and Reservoirs. Washington, DC; U.S. Environmental Protection Agency, 2000.
- [35] 李嘉珣, 曹飞飞, 汪铭一, 吴钢. 参照点位法下的参照状态在草原生态系统损害基线判定中的应用分析. 生态学报, 2019, 39(19):6966-6973.