

DOI: 10.5846/stxb202204070902

许喆, 米文宝, 米楠, 樊新刚. 工业运输活动对周边荒漠草原植物多样性与土壤性状的影响. 生态学报, 2023, 43(12): 5060-5071.

Xu Z, Mi W B, Mi N, Fan X G. Effects of industrial transportation activities on plant diversity and soil properties in the surrounding desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5060-5071.

工业运输活动对周边荒漠草原植物多样性与土壤性状的影响

许 喆¹, 米文宝^{1, 2}, 米 楠^{1, *}, 樊新刚³

¹ 宁夏大学农学院, 银川 750021

² 宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021

³ 宁夏大学经济管理学院, 银川 750021

摘要: 研究工业运输活动释放出的重金属元素对周边荒漠草原植被群落特征和土壤性状的关系, 为工业活动影响下的荒漠草原植被恢复和重建提供科学依据。以宁夏盐池县高沙窝工业集中区邻近的荒漠草原为研究对象, 结合前期土壤和降尘的重金属含量, 根据内梅罗污染指数划分了五个污染梯度(梯度 I、梯度 II、梯度 III、梯度 IV 和梯度 V), 采用野外调查和室内分析的方法, 对比分析了不同污染梯度下的植被群落特征与土壤性状的关系。结果显示: 在前三个污染梯度下物种组成相对较多, 禾本科(*Gramineae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、豆科(*Leguminosae*)和菊科(*Compositae*)为优势科。其中, 牛枝子(*Lespedeza potaninii*)和短花针茅(*Stipa breviflora*)的重要值分别为 59.41 和 44.26, 是研究区工业生产和交通运输影响下的主要物种。随着污染梯度的升高, 植物群落均匀度指数显著下降($P < 0.05$), 工业交通运输活动造成研究区荒漠草原植被组成单一, 群落结构不稳定。表层土壤养分受重金属影响波动较大, 土壤全氮和有机质是影响物种多样性指数的主要土壤因子, 随着污染梯度的升高显著降低($P < 0.05$)。研究表明, 高沙窝工业园区的交通运输活动对荒漠草原植物多样性和表层土壤性状产生了明显的影响。

关键词: 荒漠草原; 重金属; 植物多样性; 土壤养分; 冗余分析

Effects of industrial transportation activities on plant diversity and soil properties in the surrounding desert steppe

XU Zhe¹, MI Wenbao^{1, 2}, MI Nan^{1, *}, FAN Xingang³

¹ College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

² School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

³ School of Economics and Management, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Heavy metal elements released during industrial transportation have an impact on the vegetation community and soil properties of the desert steppe. The study of vegetation and soil could provide a scientific basis for the restoration and reconstruction of desert steppe vegetation under the influence of industrial activity area. The desert steppe around the Gaoshawo Industrial Concentration Zone in Yanchi County, Ningxia was selected as the experiment plot. Based on the accumulated heavy metal contents in soil and dust in the early stage, five pollution gradients (gradient I, gradient II, gradient III, gradient IV and gradient V) were divided according to the Nemerow pollution index. The relationship between vegetation community characteristics and soil properties under different pollution gradients was compared and analyzed by means of field investigation and indoor analysis. The results showed that the species composition was relatively abundant in

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03081); 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)资助项目(NXYLXK2017A01)

收稿日期: 2022-04-07; **网络出版日期:** 2023-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 705484905@qq.com

the first three pollution gradients, and *Gramineae*, *Chenopodiaceae*, *Leguminosae* and *Compositae* were the dominant families. Among them, *Lespedeza potaninii* and *Stipa breviflora* were the main species under the influence of industrial production and transportation in the study area, whose important values were 59.41 and 44.26, respectively. Moreover, with the increase of pollution gradient, the evenness index of plant community decreased significantly ($P < 0.05$), manifested by single vegetation composition and unstable community structures due to industrial transportation activities. The surface soil nutrients fluctuated greatly under the influence of heavy metals, and total soil nitrogen and organic matter with heavy metals were the main soil factors affecting the species diversity index, which decreased significantly with the increase of the pollution gradient ($P < 0.05$). Thus, it suggests that the industrial transportation activities in the Gaoshawo Industrial Zone significantly affect the desert steppe plant diversity and topsoil properties.

Key Words: desert steppe; heavy metals; plant diversity; soil nutrients; redundancy analysis

草地是我国陆地面积最大的生态系统,占全国土地总面积的 40%^[1],具有防风、固沙、调节气候、净化空气等生态功能^[2],对维系生态平衡和经济具有重要价值^[3]。目前,快速的城市化和工业化导致了自然资源的过度消耗和严重的环境污染,草地生态系统出现大面积的退化。在工业生产和交通运输过程中容易释放出不可溶性的污染物^[4-7],这些污染物通过干湿沉降沉积在土壤和植被中,造成周边土地的土壤污染、土壤质量下降、生物多样性丧失和景观破坏等^[8-9]。其中,重金属污染具有隐蔽性、累积性、滞后性和难以降解性等特点^[10],容易富集在土壤和植物中^[11],会降低土壤生物群落的多样性,对植物的生长产生不利影响,破坏生态系统的稳定性^[2]。研究发现,长期重金属污染胁迫下会激发植物的防御功能来应对环境的改变,影响植物群落原有的结构和物种分布^[12-14],在 Cd、Cr、Hg、Ni 和 Zn 等重金属元素富集区域,植被物种的丰富度和群落组成会发生巨大的变化^[15-17]。

荒漠草原生态安全问题一直是人们关注的热点,作为草地生态系统的重要组成部分^[18-19],在维护生态安全和社会经济发展等方面发挥着关键作用^[20]。由于荒漠草原生态环境相对脆弱,草原承载力较低,能量流动和物质循环速度比其他生态系统相对较慢,对外界的干扰较为敏感^[21]。目前关于荒漠草原物种组成和土壤性状的研究主要集中在:放牧^[22-25]、气候变化^[26-28]和灌丛引入^[29-32]等,工业活动产生的重金属对荒漠草原的影响鲜有报道。尽管土壤中的重金属元素可能来源于土壤母质或者是人为来源,但是在工业活动密集区,人类活动释放出的重金属污染物通常超过自然来源的贡献量^[33]。本研究在前期研究中确定了盐池县高沙窝工业园区附近的荒漠草原土壤和降尘中的重金属主要来源于工业生产和交通运输^[34-36]。因此,结合前期研究结果划分污染梯度,进一步分析不同污染梯度下的荒漠草原物种多样性分布和土壤环境因子间的关系,主要探究以下几个问题:(1)不同重金属污染梯度下草地植物组成;(2)不同重金属污染梯度下草地土壤性状;(3)不同污染梯度下的荒漠草原植物物种多样性分布和土壤环境因子间的关系。通过以上问题的分析,期为工业运输活动影响下的荒漠草原植物多样性保护和荒漠草原持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县高沙窝镇, (38°03'12.46"—38°09'24.95"N, 106°47'17.16"—107°00'33.59"E), 占地面积约为 80.46 km² (图 1)。东邻陕西定边县,南依甘肃环县,北部与内蒙古自治区鄂托克前旗的毛乌素沙漠相连,属于半干旱区向干旱区过渡地带。研究区平均海拔高度 1409 m,地势呈西北低,东南高态势,区域内地质条件相对稳定。气候类型为典型的中温带大陆性气候,以西北风及偏西风为主导风,风力最大可达 10 级。土壤类型以灰钙土、风沙土为主,颗粒组织松散,有机质及养分含量低。草原类型以干草原、荒漠草原和沙生植被为主,主要草地植物为:短花针茅 (*Stipa breviflora*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、白草 (*Pennisetum centrasiaticum*)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*)、萎陵菜 (*Potentilla chinensis*) 和猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 等。

研究区域内交通便捷,青银高速公路、307 国道、太中银铁路穿境而过。2018—2020 年期间,盐池县所属的地区规模以上工业增加值增速分别是 19.0%、15.5% 和 14.2%,高沙窝工业园是盐池工业园区区块二,依托宁东能源化工基地,重点发展煤炭开采、煤化工、电力等上下游产业链配套机械设备制造、维修及煤炭加工、物流产业。经调查统计,工业园区内约有 24 家企业,2 个加油站,每日进出园区运输煤炭的车辆为 18—20 车(次)。在前期土壤重金属污染特征及来源的研究中^[34],本研究发现在交通运输源中 Pb 贡献率在 70% 以上,尽管 2000 年就已经禁止使用含铅汽油,但是研究区是工业运输的主要地段,运输煤炭大车煤渣散落,汽车尾气等容易产生扬尘污染,造成研究区整体属于中等生态危险,并且受到南高北低的地势和主导风西北风的影响,呈现出以高速公路为分界点北高南低趋势。在降尘重金属的相关研究中^[35],综合多元分析结果发现,Zn、Cd 和 Pb 是研究区显著污染因子,这 3 种元素均与汽车制动器以及轮胎的磨损有关,通过对研究区荒漠草原土壤和降尘的综合分析,本研究确定研究区荒漠草原受到了交通运输的严重影响,在工业园区周围和运输路线两侧富集特征较为明显。

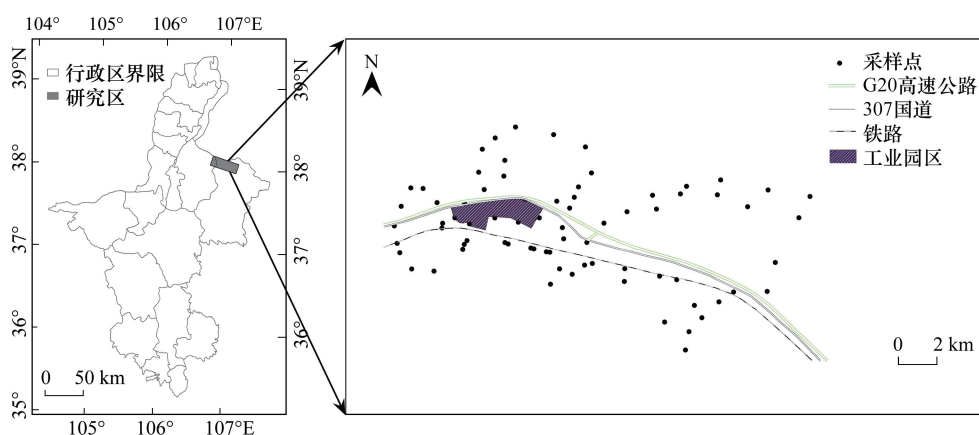


图 1 研究区位置图

Fig.1 Geographic position of study areas

1.2 样品收集与测定

在草地资源野外调查方法指导下,根据不同的方向,在距离工业园区不同距离,间隔 1—2 km,采用网格布点法,根据 2019 年 6 月研究区荒漠草原土壤重金属和土壤质量的分析结果^[34,36]以及 2020 年 1 月降尘重金属的分析结果^[35],结合内梅罗污染指数^[37]和实际情况,将研究区划分为五个梯度:清洁(梯度 I)、轻微污染(梯度 II)、中度污染(梯度 III)、重度污染(梯度 IV)和严重污染(梯度 V),其中,梯度 I 近似无污染状态,为本

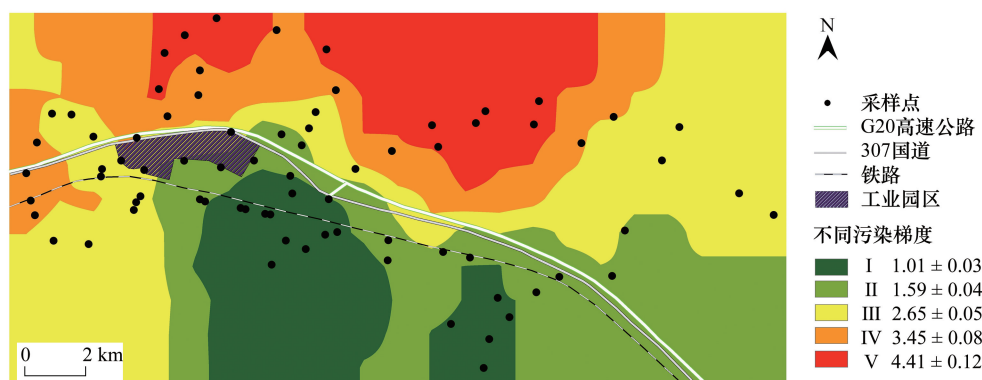


图 2 研究区不同污染梯度分布图

Fig.2 Distribution map of different pollution gradients in the study area

研究中的对照处理,具体单因子指数和内梅罗污染指数见图 2 和表 1。在每个梯度的样地选择上严格按照重金属污染指数,分别设置 10 个污染状况近似的样地(10 m×10 m),在每个样地内分别设置 3 个样方(1 m×1 m)。2020 年 7 月在植物生长旺盛时期,采用记名法记录物种丰富度及个数,测定群落总盖度、各物种的分盖度和个体数后,在样地按照对角线法取 1 个 50 cm×50 cm 的样方,采用刈割法,将植物齐地剪下装袋,带回试验室 105℃ 杀青 30 min 后 65℃ 烘干至恒重。完成样方内植物群落调查后,采用五点采样法将 0—10 cm、10—20 cm 和 20—30 cm 土层土壤分别装入自封袋,带回试验室用于测定土壤理化性质。土壤理化指标采取 3 组平行试验,取平均值。参照《土壤农化分析》^[38]测定:全氮用凯式定氮法;全磷用近红外光谱法;速效磷 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法;速效钾用火焰光度法;有机质含量用重铬酸钾法;pH 用电位法(土水比为 5:1)。

表 1 研究区重金属污染梯度划分

Table 1 Gradient classification of heavy metal pollution in the study area

污染指数 Pollution index	梯度 I Gradient I	梯度 II Gradient II	梯度 III Gradient III	梯度 IV Gradient IV	梯度 V Gradient V
铜 P_{Cu}	0.87±0.04	0.92±0.03	0.89±0.05	0.96±0.02	1.09±0.05
镉 P_{Cd}	1.27±0.04	1.55±0.03	1.61±0.03	1.59±0.03	1.65±0.03
铬 P_{Cr}	0.75±0.1	0.89±0.11	0.75±0.1	0.61±0.07	0.79±0.08
铅 P_{Pb}	1.02±0.04	1.85±0.07	3.48±0.07	4.72±0.12	5.91±0.17
锌 P_{Zn}	1.18±0.05	1.15±0.09	1.11±0.09	1.51±0.07	1.70±0.1
锰 P_{Mn}	0.87±0.11	0.92±0.07	0.79±0.07	1.16±0.1	1.26±0.07
钴 P_{Co}	0.92±0.15	1.01±0.14	0.94±0.16	1.84±0.2	1.58±0.2
内梅罗污染指数 P_N	1.01±0.03	1.59±0.04	2.65±0.05	3.57±0.08	4.41±0.12
污染等级 Pollution level	清洁	轻微	中度	重度	严重

1.3 数据处理及分析

1.3.1 植物多样性计算方法

参照余轩等^[39]草地群落生物多样性计算方法,计算物种的重要值(P_i)、多样性指数 Shannon-Wiener(H)、均匀度指数 Pielou index(J)、丰富度指数 Patrick index(R)和优势度指数-Simpson 指数(DS)。计算公式如下:

$$P_i = \frac{\text{相对盖度} + \text{相对密度} + \text{相对高度} + \text{相对生物量}}{4} \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, s) \quad (2)$$

$$J = - \frac{\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i}{\ln S} \quad (3)$$

$$R = \frac{S-1}{\ln N} \quad (4)$$

$$DS = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (5)$$

1.3.2 数据处理与分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析,计算数据平均值和标准差(SD),选择单因素分析方法(One-Way ANOVA)和 Duncan's multiple range test 方法分析指标间差异性。使用 Canoco 5.0 软件对植物多样性指数和土壤环境因子进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 不同梯度下草地植物物种组成以及数量特征

研究区草原类型为典型荒漠草原植物群落,在设置的研究样地中共调查到 36 个植物种类,分属 11 科

34 属(表 2),在本研究所划分的五个污染梯度中的植物物种组成数量依次为 20、18、20、11 和 13 种。在前三个污染梯度下物种组成相对较多,禾本科(*Gramineae*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、豆科(*Leguminosae*)和菊科(*Compositae*)为优势科。通过植物重要值的计算可以明确草地物种的重要程度,在研究区不同污染梯度下平均重要值为 6.47,梯度 I—梯度 V 的平均重要值分别为:5.01、5.56、5.00、9.09 和 7.69。牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)为优势植物。研究区受到外源性的重金属影响,随着污染梯度的升高,敏感植物逐渐减少,在这种生境下牛枝子和短花针茅的重要值分别为 59.41 和 44.26,是研究区工业生产和交通运输影响下的主要物种。

表 2 不同污染梯度下样地植物重要值

Table 2 Important value of plants in sample plots under different pollution gradients

植物种类 Plant species		梯度 I Gradient I	梯度 II Gradient II	梯度 III Gradient III	梯度 IV Gradient IV	梯度 V Gradient V
白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>	禾本科	6.29	6.81			
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	菊科	3.67	2.97	2.8	4.4	3.68
白茎盐生草 <i>Halogeton arachnoideus</i>	苋科		2.35		9.68	
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	禾本科		1.58			
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	禾本科		4.69			
叉枝鸦葱 <i>Scorzonera divaricata</i>	菊科	3.23				
刺藜 <i>Chenopodium aristatum</i>	藜科			5.51		
地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	大戟科			2.17		
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	禾本科	8.09	5.31	6.38	8.15	16.33
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	蔷薇科	2.82	9.53	7.46	4.37	
锋芒草 <i>Tragus mongolorum</i>	禾本科			3.51	14.14	8.43
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	豆科	7.76				
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科	5.85	5.56	6.34	3.83	13.32
黑沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	菊科		7.46			
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	禾本科		5.52	7.02	12.52	16.03
火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	菊科		1.85			1.3
芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	禾本科	2.44	4.49			
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	藜科				14.44	
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	禾本科	3.83	3.99			
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	蒺藜科	1.4				
牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>	牻牛儿苗科	8.16				
猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>	豆科			2.09		
牛枝子 <i>Lespedeza potaninii</i>	豆科	8.3	14.73	8.32	14.36	13.7
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	大戟科			3.65		
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	藜科		6.99			
砂珍棘豆 <i>Oxytropis psammodon</i>	豆科			5.96		
山苦荬 <i>Ixeris chinensis</i>	菊科					3.42
松叶猪毛菜 <i>Salsola laricifolia</i>	藜科	6.05	5.86	6.43	10.28	4.31
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>	旋花科	3.24				
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>	藜科	7.82				
兴安虫实 <i>Corispermum chinganicum</i>	藜科	9	5.35	5.2		5.82
银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	旋花科	3.45	3.09	1.94		6.56
硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>	禾本科	3.54	3.31	6.6		4.57
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	远志科					3.84
直立黄耆 <i>Astragalus adsurgens</i>	豆科			3.15	4.92	2.55
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科	2.18		9.13		

可以看出,不同污染梯度下植物群落重要值存在差异,随着重金属污染浓度的升高,耐旱、再生快、耐踏和对污染适应性强的植物重要值升高。通过对不同污染梯度下的植物群落多样性指数进行比较(表3),可知:丰富度指数变化趋势为:梯度Ⅰ>梯度Ⅲ>梯度Ⅱ>梯度Ⅳ>梯度Ⅴ。随着污染梯度的增加,均匀度指数逐渐下降,梯度Ⅴ与梯度Ⅰ相比指数下降了21.92% ($P<0.05$)。

表3 不同污染梯度下植物多样性指数

Table 3 Plant diversity index under different pollution gradients

项目 Item	梯度Ⅰ Gradient I	梯度Ⅱ Gradient II	梯度Ⅲ Gradient III	梯度Ⅳ Gradient IV	梯度Ⅴ Gradient V
丰富度指数 Patrick index	1.43±0.05b	1.34±0.12ab	1.40±0.21b	1.34±0.07ab	0.95±0.11a
多样性指数 Shannon-Wiener	2.01±0.06a	1.71±0.07a	1.96±0.36a	1.69±0.13a	1.46±0.21a
优势度指数 Simpson index	0.54±0.03a	0.49±0.05a	0.52±0.06a	0.49±0.06a	0.46±0.05a
均匀度指数 Pielou index	0.73±0.02a	0.70±0.04ab	0.70±0.05ab	0.68±0.04ab	0.57±0.04b

同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

2.2 不同梯度下土壤层间理化性质比较

通过三个土壤层的理化指标分析可以看出,不同污染梯度下的土壤理化性质具有一定的差异性(图3)。其中,土壤全氮含量在梯度Ⅲ处理下表层土壤与10—20 cm层和20—30 cm层比分别显著升高43.86%和47.54% ($P<0.05$),其他处理下差异不显著 ($P>0.05$)。在五个重金属污染梯度处理下,0—10 cm层土壤全磷含量均显著低于10—20 cm和20—30 cm土壤层 ($P<0.05$),尽管表层土壤全磷含量较低,但是不同重金属污染梯度对其影响不显著。速效钾含量在梯度Ⅲ处理下不同层土壤间差异显著 ($P<0.05$),表层土壤速效钾与10—20 cm和20—30 cm层相比含量升高了85.84%和98.11%。有机质含量在梯度Ⅴ处理下变化显著 ($P<0.05$),表层土壤有机质含量较低,在其他处理下差异不显著 ($P>0.05$)。可见,研究区荒漠草原表层土壤全磷含量较低,土壤全氮和速效钾在梯度Ⅲ处理下表层土壤含量波动明显,过量的重金属输入降低了土壤表层有机质含量。

2.3 植物群落与土壤环境因子的RDA分析

以往对植被指数和土壤性能之间关系的研究多采用传统的多元分析方法,但是由于环境因子易受到外界因素的影响,使结果可能具有一定的主观性。冗余分析(RDA)可以避免数据转换和多元分析的缺点。使用Monte Carlo检验,对研究区不同污染梯度下植被群落多样性指数和土壤环境因子进行RDA分析,结果见图4。图中红色箭头代表环境因子土壤理化指标,蓝色箭头代表植物多样性指数,图中线段长短表示植物群落特征与土壤环境因子关系的大小,箭头连线的夹角表示因子与排序轴的相关性,箭头的指向为因子变化趋势。由图4中0—10 cm层RDA分析可知,轴Ⅰ和轴Ⅱ能够解释96.76%的信息,较好的反映植被群落多样性和土壤环境因子之间的关系。土壤环境因子中速效磷、有机质、pH和电导率与优势度指数和多样性指数呈正相关,全氮与优势度指数和多样性指数呈负相关,其他指标间相关系数较小。在梯度Ⅴ处理下,土壤养分和植被群落因过量的重金属污染胁迫下呈下降趋势。图4中10—20 cm层RDA分析可知,轴Ⅰ和轴Ⅱ能够解释94.6%的信息。由图可知,优势度指数和多样性植物与速效磷和pH呈正相关,与有机质和全氮含量呈现负相关;丰富度指数和均匀度指数与土壤电导率、速效钾和全磷呈负相关,与其他指标间相关性较小。图4中20—30 cm层RDA分析可知,轴Ⅰ和轴Ⅱ能够解释87.98%的信息。表征植被群落多样性的指标优势度指数、多样性指数和均匀度指数与速效磷呈正相关,与有机质、速效钾、和电导率呈负相关,与其他指标相关性较小;丰富度指数与全氮呈正相关,与全磷和pH呈负相关,与其他土壤指标相关性较小。

综上,在10—20 cm和20—30 cm土壤层中,污染梯度的升高与植被多样性指数呈负相关关系,养分对群落特征的影响逐渐减少。表层土壤受到重金属污染土壤养分发生改变,从而导致植物群落特征改变。

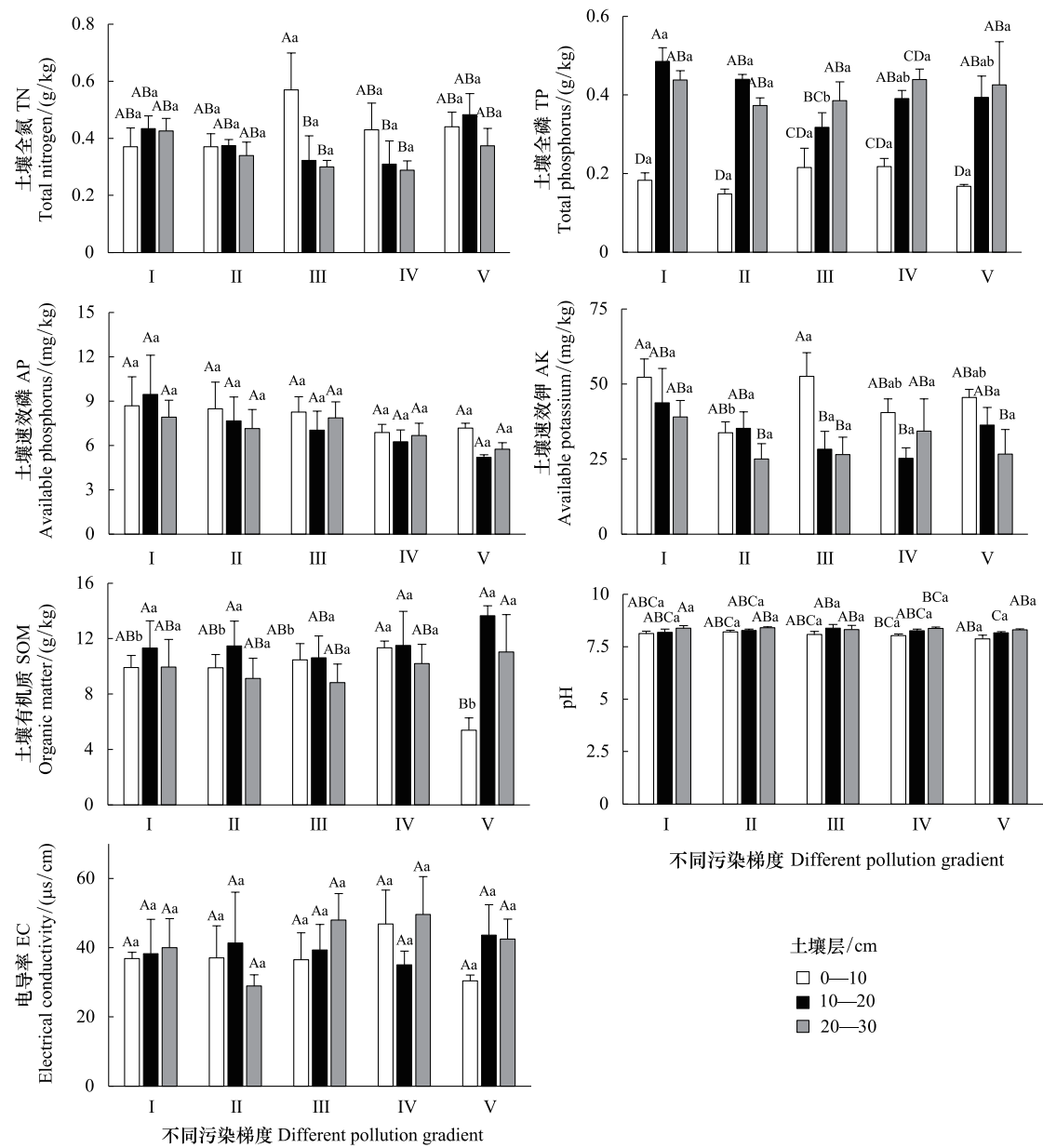


图3 不同污染梯度下三种土壤层理化性质比较

Fig.3 Comparison of physical and chemical properties of three soil layers under different pollution gradients

不同大写字母表示同一指标显著性差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一土壤层不同污染梯度下显著性差异 ($P < 0.05$); TN: 全氮 Total Nitrogen; TP: 全磷 Total Phosphorus; AP: 速效磷 Available Phosphorus; AK: 速效钾 Available Potassium; SOM: 有机质 Soil Organic Matter; EC: 电导率 Electrical Conductivity

3 讨论

3.1 不同污染梯度下植物物种组成及物种多样性

植物多样性是一个群落结构和功能复杂程度的度量,涵盖了物种的丰富程度,单位面积内物种的数量以及物种比例等,对生物多样性的保护具有重要的意义^[40],其维持机制一直是生态学的研究热点^[41]。植物物种的丰富度和多样性指数,与土壤中重金属元素的存在有着密切的联系^[17,42]。毕银丽等^[43]在矿区植物多样性的研究中发现,群落物种丰富度指数、群落种类多样性指数与物种优势度指数随着与采矿区距离的增大均

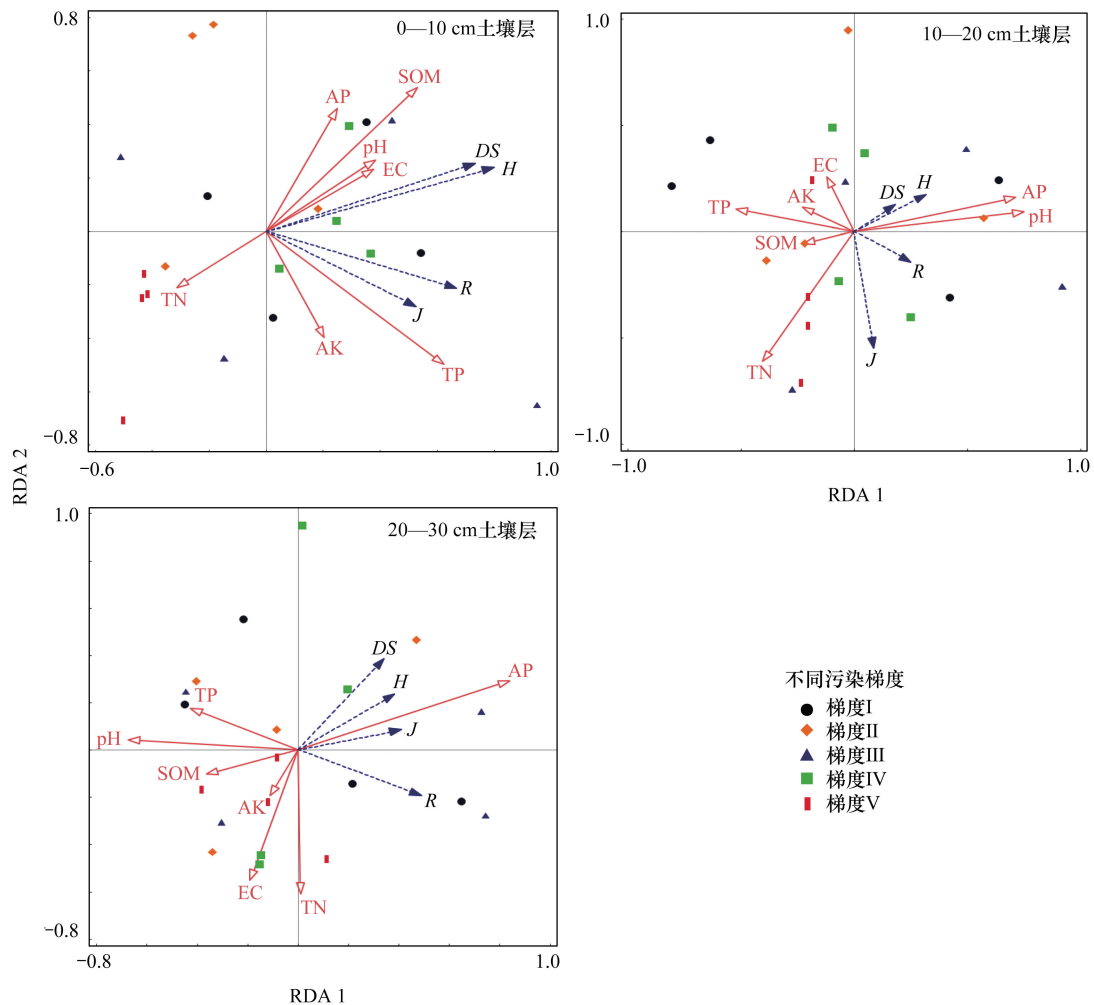


图4 植物群落多样性指数与土壤环境因子 RDA 排序图

Fig.4 RDA ordination diagram of plant community diversity index and soil environmental factors

R: 丰富度指数 Patrick index; H: 多样性指数 Shannon-Wiener; J: 均匀度指数 Pielou index; DS: 优势度指数 Simpson index

呈现增加的趋势,而均匀度指数无明显差异。但是在本研究中荒漠草原土壤环境受到不同程度重金属的影响,在植物物种组成上存在一定的差异性,只有丰富度指数和均匀度指数具有特定变化趋势,均表现出随着污染程度增加呈现下降趋势。荒漠草原受到干旱和半干旱的气候影响,荒漠草原物种组成较为简单且多样性指数较低^[39],过量的重金属污染的输入影响了植物的正常生长,造成植物组成单一,植物群落不稳定,进而降低了植物丰富度指数和均匀度指数。

通过计算发现牛枝子和短花针茅是样地建群优势种,并且在研究区这两种植物的重要值较高。Woch 等^[14]研究发现,土壤中重金属含量的增加会影响区域内植物物种的分布,特别是 Zn、Pn 和 Cd 富集的土壤中,植物种类的数量随着土壤重金属污染的增加而减少,这些重金属元素的含量决定了区域植被物种的组成。工业活动会导致土壤中重金属含量增加^[44],在重金属长期污染下,敏感的物种数量逐渐减少,这使得更加耐受土壤污染的物种存活下来并且随着时间的推移在生态系统中占有一定的优势^[45]。也有研究发现,在工业活动区周围的植物长期适应了重金属元素的输入,有些植物甚至可以富集大量的重金属,并且不会扰乱生态系统的稳定,对生态环境修复具有重要意义^[46—48]。一定浓度的重金属胁迫淘汰了部分物种,同时由于种间竞争减少,更加促进了短花针茅和牛枝子作为群落的建群种和优势种的生长,这两种优势种作为多年生植物,当没有干扰因素发生时,植物组织在土壤中的形态多以茎、球茎或块茎存在,在长期的演化过程中形成了对该区域

自然环境高度适应机制,独特的耐受特性和形态特征能够有效防御土壤污染。

3.2 不同污染梯度下土壤理化性质

土壤环境因子之间相互影响制约,受自然条件和植被群落的影响,目前关于植被多样性和土壤因子的研究较多,但是由于研究区域的差异性及不同类型的人为活动的输入,导致研究结果具有一定的差异性。李少华等^[49]在光伏电厂干扰下高寒荒漠草原地区发现,植物物种数量、盖度、地上生物量、土壤含水、有机质和全氮含量均升高,光伏电厂的建设有利于草地植被恢复,同时对土壤养分起到了改良作用。而在本研究中,高沙窝工业园区集多种行业于一体,其主要行业以煤化工为主,在洗煤加工和利用过程中的废水容易流入地表土壤,造成土壤二次污染。尽管在工业生产中的部分粉煤灰质地优良,但是通常以工厂不能使用的形式存在于生态环境中^[50],沉积在土壤中的污染物容易被植物吸附在根部,从而损害植物的正常生长^[51]。因此类似工厂对环境造成的影响是不可避免的,产生的污染物长期积累容易导致土壤质量和植物生产力下降。有研究发现重金属浓度随着距离和土壤深度的增加而降低^[52],通过不同土壤层的理化性质分析,研究区表层土壤更容易受到重金属的影响。在云南某矿区资源开采导致土壤有机质和全氮含量显著降低^[53],这与本研究中结论一致,有机质通过吸附与金属元素形成络合作用,降低了重金属的生物利用度。另一方面,有机质能够向土壤提供低分子量的有机物,作为螯合物并提高金属的生物利用度^[54]。总体上,荒漠草原常年干旱少雨并且沙化严重,植物覆盖度低,长势较差,生物量小,长期受到人为干扰,土壤固氮能力较低,磷元素流失严重,表层土壤随着污染梯度的变化含量受到波动。

3.3 植物多样性与土壤环境因子关系

本研究通过 RDA 分析进而明确不同重金属污染下土壤理化性能对植物群落多样性的影响, RDA 分析更直观地反映植物多样性指标与土壤环境因子之间的关系。魏卫东等^[55]在三江源高寒草甸的研究中,利用退化草地群落特征和土壤因子数据矩阵进行 RDA 分析,综合反映了土壤因子与草地退化之间的关系及相关程度。王兴等^[56]在宁夏荒漠草原弃耕地应用 RDA 对草地土壤与植被间关系进行分析,认为植物群落多样性指数受到土壤碳酸钙、全盐等的显著影响。通过分析,植被丰富度指数、多样性指数、优势度和均匀度与土壤养分相关,特别是在表层土壤分析中更加显著。研究区连接盐池县和宁东能源化工基地,随着工业发展,园区内企业数量的增加,常年车流量较大,工业运输活动释放出的重金属等污染物附着在土壤表面,加剧了荒漠草原的脆弱性。一般情况下随着重金属污染梯度的升高,土壤养分呈下降趋势,影响植物的正常生长,导致植物多样性和物种组成减少。部分植物经过长期的自然选择进化,对研究区内的重金属胁迫有一定的抗性和适应性从而成为优势物种长期生存。有结论认为土壤养分对生物多样性没有影响^[57],在荒漠草原地区土壤贫瘠干旱,营养循环缓慢,利用率低,植物生长受到土壤养分指标的限制,土壤养分同时也会限制植物生长状况^[58]。当外源性的污染输入减少时,土壤因子损害程度也会减弱,植物群落逐渐稳定,在这种生境下的植物死亡后产生大量养分丰富的枯落物,枯落物在土壤中积累、腐解,产生大量的养分,这些养分又被植物吸收利用,使群落物种丰富度、多样性得到提高^[59],可以概括为:植被生长可以增加土壤有机质和养分的积累,土壤养分的富集可归因于植被多样性指数的增加。在内蒙古胜利煤矿周边不同距离草地植物与土壤因子冗余分析结果表明,植物多样性指数与土壤有机质,含水量,速效磷等呈正相关^[43];金立群等^[60]认为土壤中氮是植物生长发育所需的大量元素,是调节生态系统生产力、结构与功能的重要元素;乔欧盟等^[61]研究中发现土壤有机质含量与物种丰富度和植被多样性指数呈显著正相关,以上与本研究的结论一致。

结果显示植物多样性指数和土壤环境因子之间存在着积极的相互作用。在研究区,草地植物受到不同程度的工业生产和交通运输的影响,特别是在梯度 V 中,过量的重金属输入造成了养分的限制,影响植物正常生长。

4 结论

为了进一步分析不同污染梯度下的荒漠草原植物物种多样性分布和土壤环境因子间的关系,对高沙窝工

业园区附近的荒漠草原植物多样性进行了调查和分析,得出如下结论:

(1) 研究样地共调查到 36 种植物, 分属 11 科 34 属, 其中在梯度 I—V 中污染梯度下物种组成数量分别为 20、18、20、11 和 13 种。随着重金属污染浓度的升高, 耐旱、再生快、耐踏和对污染适应性强的植物重要值升高。牛枝子和短花针茅的重要值分别为 59.41 和 44.26, 是研究区工业生产和交通运输影响下的主要物种。

(2) 通过对不同污染梯度下的植物群落多样性指数进行比较, 不同污染梯度下的丰富度指数变化趋势为: $I > III > II > IV > V$; 随着污染梯度的增加, 优势度指数差异不显著, 过量的重金属污染的输入影响了群落敏感植物的正常生长, 造成植物组成单一, 植物群落不稳定, 进而降低了植物丰富度指数和均匀度指数。

(3) 通过 RDA 分析可以看出, 在 10—20 cm 和 20—30 cm 土壤层中, 养分对群落特征的影响逐渐减少, 表层土壤受到重金属污染土壤养分发生改变, 从而导致植物群落特征改变。

参考文献 (References):

- [1] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997(6): 2-10.
- [2] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕一河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. 地球科学进展, 2009, 24(6): 571-576.
- [3] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源区草地生态系统综合评估指标体系. 地理研究, 2009, 28(2): 273-283.
- [4] Chen X, Xia X H, Zhao Y, Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1/3): 640-646.
- [5] Blok J. Environmental exposure of road borders to zinc. Science of the Total Environment, 2005, 348(1/3): 173-190.
- [6] Suzuki K, Yabuki T, Ono Y. Roadside *Rhododendron pulchrum* leaves as bioindicators of heavy metal pollution in traffic areas of Okayama, Japan. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 149(1/4): 133-141.
- [7] Pagotto C, Rémy N, Legret M, Le Cloirec P. Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway. Environmental Technology, 2001, 22(3): 307-319.
- [8] Farrington J D. The impact of mining activities on Mongolia's protected areas; a status report with policy recommendations. Integrated Environmental Assessment and Management, 2005, 1(3): 283-289.
- [9] Lei K, Pan H Y, Lin C Y. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas. Ecological Engineering, 2016, 90: 320-325.
- [10] 吴洋, 杨军, 周小勇, 雷梅, 高定, 乔鹏炜, 杜国栋. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价. 环境科学, 2015, 36(8): 2964-2971.
- [11] Fei X F, Xiao R, Christakos G, Langousis A, Ren Z Q, Tian Y, Lv X N. Comprehensive assessment and source apportionment of heavy metals in Shanghai agricultural soils with different fertility levels. Ecological Indicators, 2019, 106: 105508.
- [12] Ernst W H O. Evolution of metal tolerance in higher plants. Forest Science and Landscape Research, 2006, 80(3): 251-274.
- [13] Baker A J, Ernst W H O, Van Der Ent A, Malaisse F, Ginocchio R. Metallophytes: The unique biological resource, its ecology and conservational status in Europe, central Africa and Latin America//Batty L C, Hallberg K B, eds. Ecology of Industrial Pollution. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [14] Woch M W, Kapusta P, Stefanowicz A M. Variation in dry grassland communities along a heavy metals gradient. Ecotoxicology, 2016, 25(1): 80-90.
- [15] Lucassen E C H E T, Van Kempen M M L, Roelofs J G M, Van Der Velde G. Decline in metallophytes in tertiary polluted floodplain grasslands in the Netherlands: Experimental evidence for metal and nutritional changes in soil as driver factors. Chemistry and Ecology, 2010, 26(4): 273-287.
- [16] Mapaure I, Chimwamurombe P M, Mapani B S, Kamona F A. Impacts of mine dump pollution on plant species diversity, composition and structure of a semiarid savanna in Namibia. African Journal of Range & Forage Science, 2011, 28(3): 149-154.
- [17] Pandey L K, Han T, Gaur J P. Response of a phytoplanktonic assemblage to copper and zinc enrichment in microcosm. Ecotoxicology, 2015, 24(3): 573-582.
- [18] Zhang R Y, Wang Z W, Han G D, Schellenberg M P, Wu Q, Gu C. Grazing induced changes in plant diversity is a critical factor controlling grassland productivity in the Desert Steppe, Northern China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 265: 73-83.
- [19] Gong Li S, Harazono Y, Oikawa T, Zhao H L, Ying He Z, Chang X L. Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102(2/3): 125-137.
- [20] Kang L, Han X G, Zhang Z B, Sun O X. Grassland ecosystems in China: Review of current knowledge and research advancement. Philosophical

- Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [21] 陈林, 曹萌豪, 宋乃平, 李学斌, 邱开阳, 庞丹波. 中国荒漠草原的研究态势与热点分析——基于文献计量研究. 生态学报, 2021, 41(24): 9990-10000.
- [22] 潘嘉琛, 董智, 李红丽, 闫影影, 陈艺文, 李永强. 短花针茅荒漠草原土壤颗粒多重分形及理化性质对放牧强度的响应. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 93-99.
- [23] 王琪, 张峰, 赵萌莉, 张新宇, 张军. 放牧强度对短花针茅荒漠草原植物群落组成及种间关系的影响. 生态环境学报, 2021, 30(10): 1961-1967.
- [24] 张子胥, 于倚龙, 李永强, 焦树英, 董智, 韩国栋, 徐子云. 放牧强度对内蒙古荒漠草原土壤有机碳及其空间异质性的影响. 生态学报, 2021, 41(15): 6257-6266.
- [25] 赵美曼, 董智, 李红丽, 闫影影, 窦晓慧, 李斌鹏, 耿林昇. 苏尼特右旗荒漠草原不同放牧强度土壤可蚀性 K 值研究. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 135-142.
- [26] 候静, 杜灵通, 刘可, 朱玉果, 胡悦, 杨新国, 张学俭. 1982—2012 年北半球荒漠草原过渡带植被物候特征及其与气候因子的关系. 气候变化研究进展, 2017, 13(5): 473-482.
- [27] 王乐, 杜灵通, 丹杨, 宫菲, 郑琪琪, 马龙龙, 孟晨. 不同气候变化情景下荒漠草原生态系统碳动态模拟. 生态学报, 2020, 40(2): 657-666.
- [28] 李晓兵, 陈云浩, 张云霞, 范一大, 周涛, 谢锋. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254-261.
- [29] 李梓豪, 李卓凡, 张雷, 高孝威, 杨海峰, 张文军, 王晓江. 灌丛化过程对荒漠草原植被与土壤的影响. 西部林业科学, 2022, 51(1): 36-41.
- [30] 赵亚楠, 赵亚峰, 王红梅, 马彦平, 李志丽. 荒漠草原灌丛转变土壤水分与地上生物量空间异质性及阈值响应. 林业科学, 2021, 57(12): 1-12.
- [31] 于露, 郭天斗, 孙忠超, 马彦平, 李志丽, 赵亚楠, 王红梅. 荒漠草原向灌丛地转变过程中两种优势植物种子萌发及阈值特征. 生态学报, 2021, 41(10): 4160-4169.
- [32] 李志丽, 王红梅, 孙忠超, 马彦平, 赵亚楠, 李雪颖. 宁夏东部荒漠草原-灌丛地转变过程土壤氮素响应. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1230-1240.
- [33] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, Huang Z C, Wu H T, Chen H, Fan K K, Yu K, Wu X, Tian Q Z. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. Chemosphere, 2005, 60(4): 542-551.
- [34] Xu Z, Mi W B, Mi N, Fan X G, Zhou Y, Tian Y. Characteristics and sources of heavy metal pollution in desert steppe soil related to transportation and industrial activities. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(31): 38835-38848.
- [35] Xu Z, Mi W B, Mi N, Fan X G, Tian Y, Zhou Y, Zhao Y N. Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of dust fall related to industrial activities in desert steppes. PeerJ, 2021, 9: e12430.
- [36] Xu Z, Mi W B, Mi N, Fan X G, Zhou Y, Tian Y. Comprehensive evaluation of soil quality in a desert steppe influenced by industrial activities in northern China. Scientific Reports, 2021, 11(1): 17493.
- [37] Cheng J L, Shi Z, Zhu Y W. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(1): 50-54.
- [38] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [39] 余轩, 王兴, 吴婷, 王启学, 马昀, 谢莉, 宋乃平. 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系. 生态学报, 2021, 41(21): 8516-8524.
- [40] 王建, 王光鹏, 斯贵才, 沈妙根, 张更新. 青藏公路沿线植被多样性特征及其与环境因子的关系. 草业科学, 2013, 30(9): 1320-1329.
- [41] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 余飞燕, 董洪君, 王敏, 郝建锋. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系. 生态学报, 2021, 41(3): 1168-1177.
- [42] Becker T, Brändel M. Vegetation-environment relationships in a heavy metal-dry grassland complex. Folia Geobotanica, 2007, 42(1): 11-28.
- [43] 毕银丽, 李向磊, 彭苏萍, 解琳琳, 王党朝. 露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 205-213.
- [44] Han F X, Banin A, Su Y, Monts D L, Plodinec J M, Kingery W L, Triplett G E. Industrial age anthropogenic inputs of heavy metals into the pedosphere. Naturwissenschaften, 2002, 89(11): 497-504.
- [45] Pająk M, Błońska E, Szostak M, Gałsiorek M, Pietrzykowski M, Urban O, Derbis P. Restoration of vegetation in relation to soil properties of spoil heap heavily contaminated with heavy metals. Water Air & Soil Pollution, 2018, 229(12): 392.
- [46] Aihemaiti A, Jiang J G, Li D, Liu N, Yang M, Meng Y, Zou Q. The interactions of metal concentrations and soil properties on toxic metal accumulation of native plants in vanadium mining area. Journal of Environmental Management, 2018, 222: 216-226.
- [47] Bi Y L, Xie L L, Wang J, Zhang Y X, Wang K. Impact of host plants, slope position and subsidence on arbuscular mycorrhizal fungal communities in the coal mining area of north-central China. Journal of Arid Environments, 2019, 163: 68-76.

- [48] 高天鹏, 万子栋, 付靖雯, 王雪莹, 常国华, 陈映全, 台喜生, 李昌明. 重金属污染对金川矿区原生植物根际细菌群落的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, 2020, 56(4): 493-501.
- [49] 李少华, 高琪, 王学全, 兰岚, 杨占武. 光伏电站干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征. 水土保持学报, 2016, 30(6): 325-329.
- [50] Maiti D, Prasad B. Revegetation of fly ash-A review with emphasis on grass-legume plantation and bioaccumulation of metals. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2016, 14(2): 185-212.
- [51] Silva R V, Neves R, De Brito J, Dhir R K. Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 62: 22-32.
- [52] Meuser H. *Contaminated Urban Soils*. Dordrecht: Springer, 2010.
- [53] Kim S, Zang H D, Mortimer P, Shi L L, Li Y J, Xu J C, Ostermann A. Tree species and recovery time drives soil restoration after mining: A chronosequence study. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 1738-1747.
- [54] Heděneč P, Vinduková O, Kukla J, Šnajdr J, Baldrian P, Frouz J. Enzyme activity of topsoil layer on reclaimed and unreclaimed post-mining sites. *Biological Communications*, 2017, 62(1): 19-25.
- [55] 魏卫东, 刘育红, 马辉, 李积兰. 三江源区高寒草甸土壤与草地退化关系冗余分析. 生态科学, 2018, 37(3): 35-43.
- [56] 王兴, 宋乃平, 杨新国, 陈林, 刘秉儒, 曲文杰, 杨明秀, 肖绪培. 荒漠草原弃耕恢复草地土壤与植被的 RDA 分析. 草业学报, 2014, 23(2): 90-97.
- [57] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 曹广民, 施建军, 杜岩功. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应. 生态学报, 2008, 28(9): 4144-4152.
- [58] 张雪妮, 杨晓东, 吕光辉. 水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境的关系. 生态学报, 2016, 36(11): 3206-3215.
- [59] Zhang H, Chu L M. Plant community structure, soil properties and microbial characteristics in revegetated quarries. *Ecological Engineering*, 2011, 37(8): 1104-1111.
- [60] 金立群, 李希来, 孙华方, 张静, 周伟. 高寒矿区排土场不同坡向植被和土壤特征研究. 土壤, 2020, 52(4): 831-839.
- [61] 乔欧盟, 陈璋. 矿区不同类型生态护坡工程植物多样性对环境因子的响应. 应用生态学报, 2022, 33(3): 742-748.