

矸石山周边土壤中镉元素迁移特征分析

——以焦作九里山矿矸石山和朱村矿矸石山为例

逯晓喻^{1,2}, 李喆^{1,2}, 张月阳^{1,2}

(1. 河南省自然资源监测院, 河南郑州 450018; 2. 河南省地质灾害防治重点实验室, 河南郑州 450018)

摘要 焦作市矿山地质环境监测网络常年对九里山矿矸石山和朱村矿矸石山周边土壤重金属进行监测, 采用传统统计学方法对 2016—2020 年土壤中 Cd 检测数据进行处理并分析其动态变化特征。结果表明, 矿区周边土壤呈碱性, 均可检出 Cd 元素; 矸石山周边土壤中 Cd 含量均超出当地背景值, 煤矸石不断析出的 Cd 造成周边土壤 Cd 污染持续增大, 部分监测点位土壤达到 Cd 轻度污染等级。土壤中 Cd 含量随着埋深加大呈现出减小趋势。矸石山周边土壤剖面中 Cd 含量变化的影响因素主要包括当地主风向、土地利用类型、化肥施用等, 但是地下水水流方向的影响相对微弱。

关键词 矸石山; 土壤; Cd 元素; 影响因素; 迁移特征

中图分类号 X 53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)08-0068-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.08.016



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Analysis on Migration Characteristics of Cadmium in Soil around Gangue Hill—Taking the Gangue Hill in Jiulishan Coal Mine and Zhucun Coal Mine in Jiaozuo City as Examples

LU Xiao-yu^{1,2}, LI Zhe^{1,2}, ZHANG Yue-yang^{1,2} (1. Henan Province Natural Resources Monitoring Institute, Zhengzhou, Henan 450018; 2. Henan Provincial Key Laboratory of Geological Hazards Prevention, Zhengzhou, Henan 450018)

Abstract The Jiaozuo City Mine Geological Environment Monitoring Network monitors heavy metals in the soils around Jiulishan and Zhucun gangue hills all year round. Traditional statistical methods were used to process and analyze the dynamic change characteristics of Cd detection data in soils from 2016 to 2020. The results showed that the soil around the mining area was alkaline, and Cd could be detected. The content of Cd in the soil around the gangue hill exceeded the local background value. The continuous release of Cd from coal gangue had caused a continuous increase in Cd pollution in the surrounding soil, and some monitoring sites had reached a slight level of Cd pollution. The content of Cd in soil showed a decreasing trend with increasing burial depth. The main factors affecting the variation of Cd content in the soil profile around the waste dump included local main wind direction, land use type, fertilizer application, etc., but the impact of groundwater flow direction was relatively weak.

Key words Gangue hill; Soil; Cadmium; Influencing factors; Migration characteristic

焦作市矿山地质环境监测网络自 2016 年建立以来, 按照设计要求每年对矸石山附近土壤环境质量进行监测, 土壤环境及重金属含量作为其重要监测内容, 已积累了大量的监测数据。Cd 作为矸石山附近土壤重金属监测的重要组成部分, 具有较强的生物毒性^[1]。经过矸石自燃、风化和雨水淋溶等作用, 煤矸石中的 Cd 发生迁移, 进入周边水土环境, 被土壤中的黏土矿物和有机物吸附或固定而富集于土壤中, 造成了土壤和水体污染。土壤 Cd 污染具有不可逆性, 当 Cd 积累到一定程度不仅会抑制植物的正常生长, 还会被植物吸收通过食物链进入人体, 威胁到人类健康^[2-5]。因此, 研究矸石山附近土壤中的 Cd 分布特征对防治土壤 Cd 污染和保护人体健康具有重要的现实意义^[6-8]。该研究以焦作九里山矿和朱村矿矸石山周边土壤为研究对象, 分析 2016—2020 年土壤监测数据, 揭示矸石山周边土壤中 Cd 含量变化趋势的影响因素, 以期减缓煤矸石周边土壤重金属污染、开展有效生态修复工程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 九里山矿位于焦作矿区东部, 于 1970 年建井, 1983 年开始投产, 设计产煤能力为 90×10^4 t/a; 多年的

煤炭开采和洗选, 产生大量的煤矸石堆积形成矸石山; 目前矸石山占地面积约 5.7 万 m^2 , 矸石堆存量约 223 万 t, 堆存最高处达 61 m。朱村矿位于焦作市区西南部 5.5 km, 于 1955 年建井, 1958 年开始投产, 设计产煤能力为 60×10^4 t/a, 矸石山占地面积约 2 万 m^2 。此次研究对九里山矿矸石山附近不同路径中的土壤 Cd 含量进行分析, 分别为矸石山脚下 10 m 内垂直方向、该区主风向向下风向以及地下水流方向, 采取朱村矸石山同路径土壤样品作为平行对照组, 探究不同条件下土壤中 Cd 的富集效应。选取的矸石山沿主风向向下风向和地下水流向布设的采样点土地利用类型主要为林地和耕地, 耕地主要农作物为夏玉米和冬小麦, 林地种植树种主要为国槐和杨树。

1.2 样品采集 焦作市矿山地质环境监测网络样品监测点位于九里山矿和朱村矿 2 个煤矿矸石山附近。垂直剖面采样在矸石山坡脚 10 m 内进行, 开挖深度为 1.5 m, 埋深以 30 cm 为间隔, 采样深度依次为 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 m, 取剖面土样 5 件。根据焦作市气候特征, 其主风向为北东向, 沿着北东向下风向取样剖面布设, 按 20、50、100、200、300、500、1 000 m 的间距布设取样点, 采样深度 0~10 cm, 采用多点取样混合成一个代表样的方法采集样品。焦作地下水流向为南东向, 具体布设时充分考虑了现场的实际条件, 沿着南东地下水流向布设采样剖面, 采样线上按 20、50、100、200、300、500、1 000 m 的间距进行采样, 采样深度 0~10 cm。单个矸石

基金项目 2021 年国家级地质环境监测与预报项目(1212010140001-50003-21-12)。

作者简介 逯晓喻(1985—), 女, 山西孟县人, 工程师, 博士, 从事国土空间生态修复方面的研究。

收稿日期 2022-07-04; **修回日期** 2022-08-08

山每年共取土壤样品 19 件。此次研究涵盖 2016—2020 年共计 190 个样品,其中九里山矿矸石山和朱村矿矸石山各 95 个。

1.3 样品质量控制

1.3.1 取样点位质量控制。根据焦作市矿山地质环境监测网络设计书中标明的土壤取样起点、终点坐标,将取样点位置标注在谷歌卫星地图上,确定土壤取样的具体位置,现场利用 GPS 定位,保证土质取样点位的准确性。

1.3.2 土壤取样质量控制。严格控制土质取样深度,用铁锹挖坑到取样深度,然后用木铲清理取土工作面,将取样深度内的土壤进行充分混合后,采取混合后的土壤样。土质取样过程中,由一名技术人员负责监测点位的寻找,一名技术人员负责现场取样工作,另一名技术人员负责填写土壤样品采集记录表,记录影像资料,每位技术人员同时对其他技术人员的工作进行认真监督,严格按设计要求完成土质取样工作。

1.3.3 内业资料检查。技术人员对当天的影像资料和原始记录表资料进行自检整改,修改后再次进行检查和复查。土质取样工作完成后,由负责人再次检查是否符合设计要求。

1.4 样品检测 土壤带回实验室后经过处理,按照常规方法进行土壤理化性质、水溶性盐、土壤微量元素和重金属元素等测试。重金属含量检测仪器为 XSERIES 2 电感耦合等离子体质谱仪,pH 检测仪器为 PHS-3C 数字酸度计。

此次研究样品来自煤矿矸石山周边的土壤,主要分析土壤样品中 Cd 含量的分布特征。土地利用类型主要为农田和林地,为Ⅲ类土壤,因此采用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中三级标准值(表 1)作为土壤等级质量划分依据,采用检出率、Cd 单项污染指数进行土壤重金属污染等级评价(表 2)。其中单项污染指数 $P_i = C_i/S_i$,式中, C_i 为污染物实测值, S_i 为污染物评价标准。

表 1 土壤环境质量标准值

Table 1 Standard value of soil environmental quality

级别 Level	pH	镉含量 Cd content//mg/kg
一级 Level 1	自然背景	≤0.2
二级 Level 2	<6.5	≤0.3
	6.5~7.5	≤0.3
三级 Level 3	>7.5	≤0.6
	>6.5	≤1.0

表 2 农田土壤重金属污染等级标准

Table 2 Standard of heavy metal pollution levels in farmland soil

土壤等级 Soil class	单项污染指数(P_i) Single pollution index	污染等级 Pollution class	污染水平 Pollution level
I	$P_i < 1.0$	安全级	土壤未受到某重金属污染
II	$1.0 \leq P_i < 2.0$	轻度污染	土壤受到某重金属轻度污染
III	$2.0 \leq P_i < 3.0$	中度污染	土壤受到某重金属中度污染
IV	$3.0 \leq P_i < 5.0$	重度污染	土壤受到某重金属严重污染
V	$P_i \geq 5.0$	极严重污染	土壤受到某重金属极严重污染

2 结果与分析

2.1 矸石山周边土壤质量评价 从表 3 可以看出,2016—2020 年九里山矿矸石山周边 95 个土壤样品 pH 为 7.4~8.8,均为碱性土壤;Cd 检出率为 100%,且均高于河南省土壤环境背景值(0.064 mg/kg)^[9-10],Ⅲ类土壤超标率呈波动式增大,样品 Cd 含量最大值也呈增大趋势。朱村矿矸石山周边 95 个土壤样品 pH 为 7.5~8.9,土壤呈碱性;Cd 检出率为 100%,均高于河南省土壤环境背景值;除 2017 年单个样品超标外,其余样品 Cd 含量均未超标,Cd 含量最大值无明显趋势。两地矸石山周边土壤 Cd 检出率说明矸石山的堆积对周边土壤中 Cd 含量造成了影响,均高于环境背景值,且持续时间较长。

表 3 矸石山周边土壤 Cd 数据统计

Table 3 Statistics of Cd in soil around gangue hill

采样点 Sampling point	年份 Year	样本数 Sample number	检出率 Detectable rate//%	Cd 含量 Cd content//mg/kg			pH		Ⅲ类土壤超标率 Class III soil exceeding standard rate//%
				最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	
九里山矿矸石山周边 Gangue Hill in Jiulishan Coal Mine	2016	19	100	1.21	0.12	0.42	8.6	8.0	10.53
	2017	19	100	1.16	0.19	0.61	8.6	8.1	5.26
	2018	19	100	1.83	0.23	0.80	8.7	8.1	31.58
	2019	19	100	1.46	0.28	0.77	8.8	8.1	26.32
	2020	19	100	2.68	0.09	0.86	8.5	7.4	42.11
朱村矿矸石山周边 Gangue Hill in Zhucun Coal Mine	2016	19	100	0.27	0.10	0.16	8.5	7.9	0
	2017	19	100	1.19	0.10	0.24	8.0	7.6	5.26
	2018	19	100	0.76	0.11	0.27	8.7	8.0	0
	2019	19	100	0.35	0.08	0.21	8.9	7.6	0
	2020	19	100	0.98	0.13	0.37	8.7	7.5	0

2.2 垂直方向土壤中 Cd 含量变化 从图 1 可以看出,除个别点外,多数样品 Cd 含量均小于二级土壤环境质量标准值(≤0.6 mg/kg),Cd 单项污染指数均小于 1,土壤重金属污染等级为安全级,土壤未受到重金属污染。随着埋深的加大,雨水的淋溶作用减弱,九里山矿矸石山山脚下垂直样品中 Cd 含量随着取样深度增加呈现出减小趋势。

图 1a 显示九里山矿矸石山山脚下 10 m 处垂直样品中 Cd 含量于 2018 年达到最大值,之后表现出下降趋势,究其原因主要是九里山矿矸石山于 2019 年开展矿山生态修复工程,通过客土复绿、扶苗栽树等手段进行生态修复,一定程度上减缓了矸石山对山脚下土壤中 Cd 含量的影响。图 1b 朱村矿矸石山山脚下 10 m 处取样深度一定的情况下,2016—

2020年样品Cd含量表现出了增大趋势,说明矸石山持续不断地析出Cd元素,造成土壤的Cd出现富集效应。

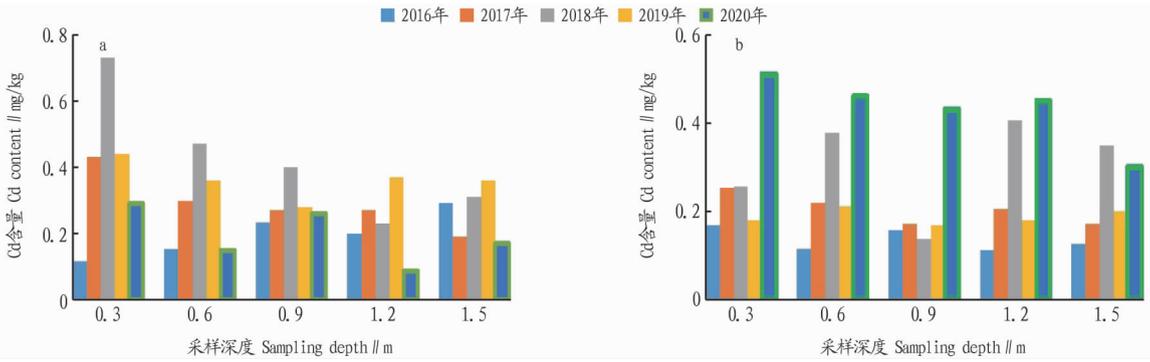


图1 九里山矿(a)和朱村矿(b)矸石山土壤中Cd含量随埋深变化

Fig.1 Change of Cd content in the soil of the gangue hill of Jiulishan Coal Mine (a) and Zhucun Coal Mine (b) with burial depth

2.3 主风向下风向土壤剖面中Cd含量变化 九里山矿矸石山主风向下风向土地利用类型主要为农田,主要农作物为夏玉米和冬小麦。以三级土壤环境质量标准为限,图2a显示随着年份的增加,同一距离的采样点样品中Cd含量大于1.0 mg/kg的样品数表现出增大趋势。客观上不考虑土地利用类型的情况下,含有Cd的灰尘随风迁移,降落地表后经过淋滤作用渗入土壤。距离矸石山越远,灰尘携带的Cd含量越低,土壤中Cd含量也越低。但当样品土壤均来自农田时,多年的数据表现出无明显规律,说明土壤中Cd含量受到农作物和化肥施用的影响^[11],减弱了土壤中Cd含量与距离矸石山远近的变化趋势。

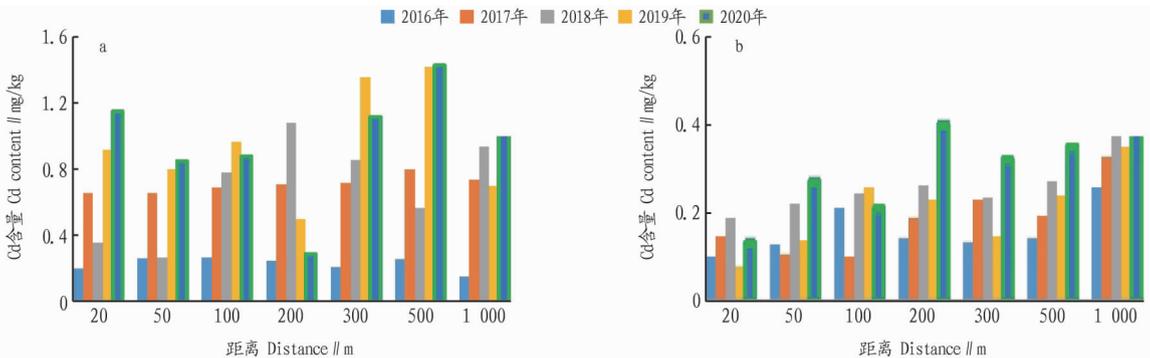


图2 九里山矿(a)和朱村矿(b)矸石山主风向下风向土壤剖面中Cd含量随距离变化

Fig.2 Change of Cd content in the soil profile in the downwind direction of the main wind direction of the gangue hill of Jiulishan Coal Mine (a) and Zhucun Coal Mine (b) with distance

2.4 地下水流方向土壤剖面中Cd含量变化 九里山矿矸石山沿地下水流方向土壤采样剖面土地利用类型主要为农田。从图3a可以看出,2016—2020年均存在Cd含量超过三级标准限值的土壤样品。当与矸石山距离小于100 m时,土壤剖面中Cd含量由2018年后开始下降,说明从2019年开始实施的矿山地质环境生态修复工程取得了一定的生态治理效果。农田施肥过程中会将Cd元素引入土壤,导致Cd在土壤中积累^[11-12]。当与矸石山距离超过200 m后,土壤中Cd含量主要受农田施肥的影响。说明土壤剖面中Cd含量变化受到土地利用类型和化肥施用影响,地下水流方向影响不突出。

朱村矿矸石山沿地下水流方向土壤采样剖面土地利用

朱村矿矸石山主风向下风向土地利用类型主要为林地,主要树种为国槐和杨树。样品中Cd含量均小于0.6 mg/kg,2016—2020年均均为二级土壤。土壤Cd污染等级为安全级,未受到重金属Cd污染。图2b显示多年来下风向土壤剖面Cd含量随与矸石山距离的增大表现出轻微富集现象,同一距离的土壤样品中Cd含量也呈小幅上升趋势。说明在不采取任何生态修复措施的情况下,煤矸石不断析出的Cd造成周边土壤Cd污染持续增大。土地利用类型为林地时,沿主风向下风向土壤中Cd含量随与矸石山距离的增加表现出微弱增大趋势。

类型主要为林地。从图3b可以看出,除2017年距离矸石山20 m处的样品Cd含量>1.00 mg/kg外,2016—2020年样品Cd含量均未超过三级土壤标准限值。距离矸石山20 m处位于矸石山围墙附近,建筑材料对原地土壤Cd含量影响较大,但范围和深度有限^[13]。样品多为土黄色,仅2020年1000 m处Cd含量为0.97 mg/kg的样品呈黑色,有机质含量较高,有机质对重金属有较强的吸附作用^[14-16],会对土壤中Cd产生富集效应。在不考虑2个异常值前提下,土地利用类型为林地时,沿矸石山附近地下水流方向土壤剖面中Cd含量相对稳定,无明显变化规律。

3 结论与讨论

焦作市矿山地质环境监测网络常年对矸石山附近土壤

环境质量进行监测。该研究采用传统统计学方法研究了 2016—2020 年九里山矿矸石山和朱村矿矸石山周边土壤中

Cd 元素空间分布特征,并进行了对比分析。

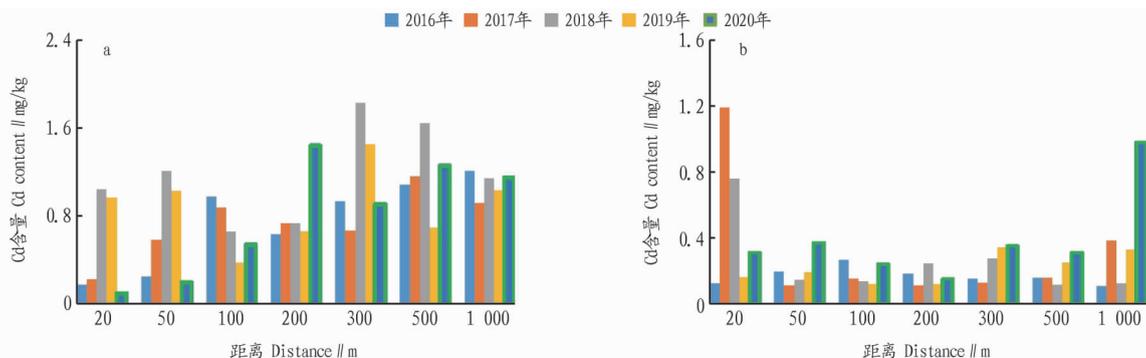


图 3 九里山矿(a)和朱村矿(b)矸石山地下水流动方向土壤剖面中 Cd 含量随距离变化

Fig.3 Change of Cd content in soil profiles along the direction of groundwater flow of the gangue hill of Jiulishan Coal Mine (a) and Zhucun Coal Mine (b) with distance

(1) 研究区土壤偏碱性,均可检出 Cd 元素,表明煤矸石受淋溶、风化作用造成的重金属排放和迁移直接或间接污染了周边土壤的生态环境。矸石山周边土壤中 Cd 含量均超出当地背景值,煤矸石不断析出的 Cd 造成周边土壤 Cd 污染持续增大,部分监测点位土壤达到 Cd 轻度污染等级。采取一定生态修复措施后,土壤中 Cd 含量有明显的降低趋势。

(2) 单考虑雨水淋溶作用,矸石山析出的重金属 Cd 对土壤的污染主要集中在浅层表面,即土壤中 Cd 含量随着埋深加大呈现出减小趋势。

(3) 矸石山周边土壤剖面中 Cd 含量变化的影响因素较多,主要包括当地主风向、土地利用类型、化肥施用等,但是地下水流动方向的影响相对微弱。

(4) 不同的土地利用类型导致矸石山周边土壤中 Cd 含量变化趋势出现差异,鉴于 Cd 元素威胁人体健康,矸石山周边下风向和地下水流动方向应减少农作物种植,应种植重金属耐性强的树木。

(5) 矿山地质环境生态修复工程亟待开展,构筑隔离带、客土复绿、扶苗栽树等措施都能够有效地减弱矸石山对周边土壤的重金属污染。

参考文献

[1] 王心义,杨建,郭慧霞.矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污染研究[J].

煤炭学报,2006,31(6):808-812.

[2] 张明亮,王海霞.煤矿区矸石山周边土壤重金属污染特征与规律[J].水土保持学报,2007,21(4):189-192.

[3] 乔爱萍.煤矿开采对土壤环境质量影响探讨[J].山西科技,2020,35(3):66-68.

[4] 王高辉.矿区煤矸石山周围土壤重金属分布规律研究[J].能源环境保护,2008,22(2):11-14,18.

[5] 张妍,李发东,欧阳竹,等.黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J].环境科学,2013,34(1):121-128.

[6] 刘伟,部允兵,周艳兵,等.农田土壤重金属空间变异多尺度分析:以北京顺义土壤 Cd 为例[J].农业环境科学学报,2019,38(1):87-94.

[7] 庞妍,同延安,梁连友,等.矿区农田土壤重金属分布特征与污染风险研究[J].农业机械学报,2014,45(11):165-171.

[8] 王爱雯,申娅,杨建波,等.秀山县农业区域土壤重金属分布特征及生态风险研究[J].安徽农业科学,2017,45(17):53-56.

[9] 邵丰收,周皓韵.河南省主要元素的土壤环境背景值[J].河南农业,1998(10):29.

[10] 李东艳,方元元,任玉芬,等.煤矸石堆周围土壤重金属污染特征分析:以焦作市中马村矿为例[J].煤田地质与勘探,2004,32(5):15-17.

[11] 管建慧,雒亚洲.长期施肥对土壤及玉米籽粒中 Cd 和 As 累积的影响[J].贵州农业科学,2015,43(12):95-99.

[12] 郑袁明,罗金发,陈同斌,等.北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征[J].地理研究,2005,24(4):542-548.

[13] 陈宇云,贾瑞,杨胜利,等.建筑垃圾中镉和砷的释放特征研究[J].环境科学与技术,2016,39(9):50-55,111.

[14] KHAN M A, KHAN S, KHAN A, et al. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments [J]. Science of the total environment, 2017, 601/602: 1591-1605.

[15] 陈同斌,陈志军.水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J].应用生态学报,2002,13(2):183-186.

[16] YUAN C L, LI Q, SUN Z Y, et al. Effects of natural organic matter on cadmium mobility in paddy soil: A review [J]. Journal of environmental sciences, 2021, 104: 204-215.

(上接第 67 页)

[8] 孙家柄.遥感原理与应用[M].3版.武汉:武汉大学出版社,2013.

[9] 邓书斌,陈秋锦,杜会建,等. ENVI 遥感图像处理方法[M].北京:高等教育出版社,2014.

[10] 辛雨琼,曹文侠,王世林,等.1988—2018 年东祁连山农牧交错区景观格局变化及驱动因素[J].草业科学,2020,37(10):1941-1951.

[11] 马慧娟,高小红,谷晓天.随机森林方法支持的复杂地形区土地利用/土地覆被分类研究[J].地球信息科学学报,2019,21(3):359-371.

[12] 贾琦.土默特右旗土地利用变化及其驱动力研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2009,37(S1):101-102.

[13] 布仁仓,胡远满,常禹,等.景观指数之间的相关分析[J].生态学报,

2005,25(10):2764-2775.

[14] 李付杰,杨彩云,高艳妮,等.2010—2018 年辽河保护区土地利用格局时空变化特征[J].环境工程技术学报,2020,10(6):1063-1071.

[15] 张建,雷刚,漆良华,等.2003—2018 年土地利用变化对丹江口市景观格局与生态服务价值的影响[J].生态学报,2021,41(4):1280-1290.

[16] 薛嵩嵩,高凡,何兵,等.1989—2017 年乌伦古河流域景观格局及驱动力分析[J].生态科学,2021,40(3):33-41.

[17] 梁庆璇,廖超明,滕永核,等.南宁市主城区土地利用景观格局变化及驱动力研究[J].江苏农业科学,2021,49(2):187-193.

[18] 马亚鑫,从辉,周维博,等.西安市土地利用景观格局动态演变及驱动力分析[J].西北林学院学报,2017,32(4):186-192.