

# 1980—2016 年科尔沁沙地土地利用 重心的时空迁移特征

赵珍珍, 冯建迪

(山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:** [目的] 研究科尔沁沙地土地利用时空演变特征, 为该区土地资源的合理开发和生态环境的改善提供科学依据。[方法] 基于土地利用重心迁移模型, 利用 1980—2016 年 Landsat 系列卫星影像, 分析该地区土地利用时空格局和空间转移特征。[结果] 1980—2016 年科尔沁沙地植被重心向西北方向迁移, 迁移速率为 64.6 m/a; 水体向东南方向迁移, 迁移速率为 389.3 m/a; 建筑用地向东北方向迁移, 迁移速率为 53.6 m/a; 沙地向西南方向迁移, 重心迁移速率为 379.5 m/a; 耕地向东北方向迁移, 重心迁移速率为 148.3 m/a。[结论] 1980—2016 年科尔沁沙地各土地利用类型在不同时期的重心迁移速率有较大差异, 建筑用地总体迁移速率最小, 水体和沙地的重心迁移速率相对较大, 该现象主要与科尔沁沙地生态环境脆弱有关, 造成了水资源持续性减少以及沙地随时反弹。

**关键词:** 土地利用; 重心; 科尔沁沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)04-0256-05

中图分类号: F301.24, K903

**文献参数:** 赵珍珍, 冯建迪. 1980—2016 年科尔沁沙地土地利用重心的时空迁移特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 256-260. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.040; Zhao Zhenzhen, Feng Jiandi. Spatial-temporal evolution features of land use gravity center in Horqin sandy land during 1980—2016[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 256-260.

## Spatial-temporal Evolution Features of Land Use Gravity Center in Horqin Sandy Land During 1980—2016

Zhao Zhenzhen, Feng Jiandi

(School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal evolution characteristics of land use in Horqin sandy land were studied in order to provide basic information for appropriate decision-making. [Methods] Based on the gravity center migration model of land use, the patterns and characteristics of spatial-temporal dynamics induced land use were analyzed with Landsat images from 1980 to 2016. [Results] The gravity center of vegetation migrated to the northwest at a rate of 64.6 m/a, and water body migrated to the southeast at a rate of 389.3 m/a. The gravity centers of construction land and cultivated land both migrated to the northeast at rates of 53.6 and 148.3 m/a, respectively. The gravity center of sandy land migrated to the southwest at a rate of 379.5 m/a. [Conclusion] There were great differences in the migration rate of gravity center among different land use types in different periods. The overall migration rate of construction land was the smallest, and water body and sand land were relatively large. This phenomenon was mainly related to the fragile ecological environment of Horqin sandy land, resulting in the sustained reduction of water resources and the rebound of sandy land at any time.

**Keywords:** land use; gravity center; Horqin sandy land

收稿日期: 2019-01-23

修回日期: 2019-03-02

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于多源数据且顾及异常现象的全球电离层 TEC 经验模型建立方法研究”(41804032)

第一作者: 赵珍珍(1987—), 女(汉族), 山东省嘉祥县人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事资源环境遥感。E-mail: zzzhao@whu.edu.cn.

通讯作者: 冯建迪(1988—), 男(汉族), 山东省巨野县人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事资源环境遥感及电离层等方面的研究。E-mail: jdfeng@whu.edu.cn.

近一个多世纪以来,全球生态环境发生了剧烈的变化,其中,土地荒漠化是当今社会面临的最严重的世界性的生态环境问题之一。荒漠化不仅威胁生态环境,同时也危害人类生存和社会稳定。我国沙漠化潜在发生面积约为  $4.50 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占国土总面积的 47.1%, 而且沙漠化类型多、分布范围广, 严重的影响了生态系统的安全以及制约我国经济社会的可持续发展<sup>[1]</sup>。为了履行《中华人民共和国防沙治沙法》和《联合国防治荒漠化公约》的相关义务, 国家林业局从 1994—2014 年分别组织完成了全国五次荒漠化和沙化监测工作。我国每年因土地荒漠化和沙化造成的直接经济损失约为 541 亿人民币, 占当年全国 GDP 的 1.41%<sup>[2-4]</sup>。

为了控制沙漠化产生的危害, 新中国成立以来, 国家和地方政府开展了大规模的防沙治沙工作, 如: “三北防护林体系建设工程”、“天然林资源保护”、“退耕还林(草)”、“京津风沙源治理”和“退牧还草”等生态保护与恢复建设工程<sup>[5-6]</sup>。但是, 现有的研究缺乏对科尔沁沙地进行系统的、长时间序列的分析和研究。为了评价各项生态修复工程建设的成效, 需要对荒漠化和沙化土地进行动态监测与评价, 及时地、准确地掌握沙漠化和沙化土地的现状以及动态演替规律, 从而更加高效地、有针对性地实施各项防沙治沙的政策和规划<sup>[7-8]</sup>。本文对科尔沁沙地进行长时间序列的动态监测, 基于土地利用重心迁移模型, 分析其自 20 世纪 80 年代到 2016 年土地利用重心迁移特征, 探明该地区不同时期各土地利用类型空间格局、重心迁移轨迹和重心迁移速率, 并以此揭示科尔沁沙地生态环境的不稳定性和脆弱性。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 科尔沁沙地区域特征

科尔沁沙地, 位于北纬  $42^{\circ}30'$ — $45^{\circ}30'$ , 东经  $119^{\circ}$ — $124^{\circ}$ , 东北平原西部, 内蒙古自治区东南部, 介于西辽河中下游的赤峰市和通辽市之间, 面积约为  $4.23 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是我国最大的沙地。科尔沁沙地属于半干旱温带大陆性季风气候区, 年平均降水量为 300~400 mm, 且多集中于夏季, 年平均气温约为  $7.1^{\circ}\text{C}$ , 年平均日照时数约为 2 959.3 h, 年平均风速约为 3.7 m/s, 风大是该地区气候的最突出特点之一。科尔沁沙地人口由 1980 年的 236.5 万人增长到 2016 年的 316.4 万人, 为满足生活需求, 耕地面积和牲畜存栏量也在不断增加。新中国成立以前的多种蒙地开垦政策, 以及新中国成立初期经历的四次垦荒人潮, 使科尔沁沙地不断经历着“开垦—沙化—弃

耕”。然而, 20 世纪以前, 科尔沁沙地也曾是水草丰美的大草原, 受气候变化, 主要是气温升高和降雨量少, 以及人类活动的影响, 草地和林地受到破坏, 沙地不断扩张, 生态环境不断恶化。故分析科尔沁沙地土地利用格局演变过程, 可为该地区调整土地利用结构和改善生态环境提供可靠的数据基础。

### 1.2 数据来源与预处理

研究所用的空间数据是覆盖科尔沁沙地的 1980, 1990, 2000, 2010, 2014 和 2016 年 6 个时期的 Landsat 系列卫星影像数据和通辽行政区划矢量数据, 影像来源于“地理空间数据云”平台。根据 Landsat 卫星的全球参考系统 WRS(world wide reference system), 共四景影像覆盖本研究区域, 其条带号/行编号为(120, 29), (120, 30), (121, 29)和(121, 30)。影像选取条件: 时间以研究年份为主, 若本年度无最佳影像可向前或向后两年; 每景影像的云量小于 1%; 具体日期以 7—9 月中下旬为最佳, 此时植被生长状况较好。

基于 ENVI 软件进行预处理, 主要过程包括辐射定标、FLAASH 大气校正、几何校正、镶嵌、去背景值等。根据科尔沁沙地范围界限, 裁剪预处理后的数据, 并进行匀色处理。值得注意的是, Landsat8OLI 影像处理过程须在 ENVI 5.0 及以上版本进行处理, 并下载该传感器对应的波谱响应函数 sli。

### 1.3 Landsat 系列卫星影像分类

根据遥感影像空间分辨率的高低以及研究区的特点, 确保遥感影像能够完成解译目标的前提条件下, 参考《土地利用现状分类(GB/T21010-2007)》, 将科尔沁沙地分为植被、水体、建筑用地、沙地和耕地 5 类。本研究选择监督分类与人工目视解译相结合的方法进行 Landsat 影像分类, 在提高解译速度的同时, 又能够保证解译精度。现有的监督分类方法很多, 常用的有最大似然法、最小距离法、决策树分类法、SVM 分类法等<sup>[15-16]</sup>。首先在 ENVI 软件平台上, 采用监督分类方法中的最小距离法进行影像分类, 获取初步分类结果, 该结果会出现错分和漏分的现象。因此, 下一步需要将该分类结果保存成矢量格式, 并转到 ArcGIS 软件平台上进行纠错改正。从分类结果中, 选取 200 个样本, 与 Google Earth 软件上的高分辨率遥感影像进行对比, 使最终分类精度达到 95%以上(附图 5)。

## 2 土地利用重心迁移模型

重心的概念源自于物理学, 是指在重力场中用于支撑目标物体在任何方位时重力合力的作用点。自

1984年起,这一概念逐渐被引入到社会经济学领域,用于研究人口、经济等方面重心变化情况<sup>[9-11]</sup>。土地利用重心迁移模型是借鉴人口分布重心变化的原理,用于揭示各类土地资源空间格局变化的过程<sup>[12-14]</sup>。本文利用土地利用重心迁移模型计算科尔沁沙地不同时期各土地利用类型的重心坐标,以及相邻时期各土地利用类型重心迁移距离和重心迁移速率,直观地反映该地区土地利用空间格局变迁的过程和变化的速度,进而体现出科尔沁沙地生态环境的不稳定性和脆弱性。 $t$ 时期土地利用类型为 $j$ 的重心坐标计算公式为:

$$X_{(j,t)} = \frac{\sum_{i=1}^n [LA_{(i,t)} \cdot X_{(i,t)}]}{\sum_{i=1}^n LA_{(i,t)}} \quad (1)$$

$$Y_{(j,t)} = \frac{\sum_{i=1}^n [LA_{(i,t)} \cdot Y_{(i,t)}]}{\sum_{i=1}^n LA_{(i,t)}} \quad (2)$$

式中: $X_{(j,t)}$ ,  $Y_{(j,t)}$ —— $t$ 时期土地利用类型为 $j$ 的重心经度和纬度坐标; $n$ —— $t$ 时期土地利用类型为 $j$ 的斑块总数; $LA_{(i,t)}$ —— $t$ 时期土地利用类型为 $j$ 的第 $i$ 个图斑的面积; $X_{(i,t)}$ ,  $Y_{(i,t)}$ —— $t$ 时期土地利用类型为 $j$ 的第 $i$ 个图斑的几何中心经度坐标和几何中心纬度坐标。

同一土地利用类型不同时期重心迁移距离测度的计算公式为:

$$D_{(i,m-n)} = \{ [X_{(i,m)} - X_{(i,n)}]^2 + [Y_{(i,m)} - Y_{(i,n)}]^2 \}^{1/2} \quad (3)$$

式中: $D_{(i,m-n)}$ —— $m$ 时期和 $n$ 时期土地利用类型为 $i$ 的重心移动距离; $[X_{(i,m)}, Y_{(i,m)}]$ ,  $[X_{(i,n)},$

$Y_{(i,n)}]$ —— $m$ 时期和 $n$ 时期土地利用类型为 $i$ 的重心坐标。

同一土地利用类型不同时期重心迁移速率的计算公式为:

$$V_{(i,m-n)} = D_{(i,m-n)} / (t_m - t_n) \quad (4)$$

式中: $V_{(i,m-n)}$ ——土地利用类型为 $i$ 的重心迁移速率; $t_m, t_n$ ——研究末期和研究初期。

### 3 结果与分析

基于各时期土地利用数据,利用重心迁移模型,计算得出1980—2016年科尔沁沙地不同时期各土地利用类型的重心坐标(如表1所示)。1980—2016年期间,科尔沁沙地的植被重心总体上向西北方向移动,植被最西北重心出现在2000年,最东南重心出现在1990年,两个时期植被重心经向移动了 $0.106^\circ$ ,纬向移动了 $0.077^\circ$ 。水体重心经向移动方向为西,移动了 $0.153^\circ$ ,纬向移动方向为南,移动了 $0.035^\circ$ 。建筑用地重心的最小经度和最小纬度均出现在1990年,坐标为 $(121.918^\circ, 43.382^\circ)$ ,最大经度和最大纬度出现在2016年,坐标为 $(121.943^\circ, 43.405^\circ)$ ,建筑用地的重心总体上向东北方向移动,移动的最大经度为 $0.025^\circ$ ,最大纬度为 $0.023^\circ$ 。沙地重心总体上向西南方向移动,重心经向移动的最大值为 $0.102^\circ$ ,重心纬向移动的最大值为 $0.128^\circ$ 。耕地重心总体上向东北方向移动,重心经向移动的最大值为 $0.041^\circ$ ,重心纬向移动的最大值为 $0.040^\circ$ 。

表1 1980—2016年科尔沁沙地各土地利用类型重心坐标

( $^\circ$ )

年份	经纬度	植被	水体	建筑用地	沙地	耕地
1980	东经	122.003	121.865	121.933	121.880	121.936
	北纬	43.357	43.405	43.391	43.469	43.420
1990	东经	122.056	121.887	121.918	121.838	121.934
	北纬	43.299	43.378	43.382	43.487	43.453
2000	东经	121.950	121.872	121.925	121.940	121.967
	北纬	43.376	43.366	43.386	43.415	43.426
2010	东经	121.966	121.973	121.926	121.935	121.947
	北纬	43.339	43.363	43.394	43.464	43.423
2014	东经	121.976	122.015	121.938	121.855	121.975
	北纬	43.322	43.373	43.402	43.446	43.453
2016	东经	121.977	122.018	121.943	121.859	121.961
	北纬	43.360	43.370	43.405	43.359	43.460

根据图1可知,从1980到1990年期间,植被重心经向移动 $0.053^\circ$ ,纬向移动 $0.058^\circ$ ,移动方向为东南,

移动距离为7 647.1 m。从1990—2000年,植被重心经向移动 $0.106^\circ$ ,纬向移动 $0.077^\circ$ ,移动方向为西北,

移动距离为 12 035.8 m。从 2000—2010 年,植被重心经向移动 0.016°,纬向移动 0.037°,移动方向为东南,移动距离为 4 386.7 m。从 2010—2014 年,植被重心经向移动 0.010°,纬向移动 0.017°,移动方向为东南,移动距离为 2 039.3 m。从 2014—2016 年,植被重心经向移动 0.001°,纬向移动 0.038°,移动方向为东北,移动距离为 4 205.4 m。其中,1990—2000 年植被重心移动距离最大,其次是 1980—1990 年。

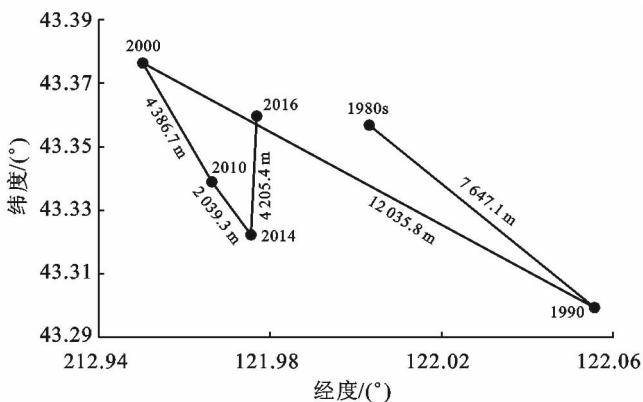


图 1 1980—2016 年科尔沁沙地植被重心迁移特征

从 1980—1990 年,研究区水体重心经向移动 0.022°,纬向移动 0.027°,移动方向为东南,移动距离为 3 577.8 m(图 2)。从 1990—2000 年,水体重心经向移动 0.015°,纬向移动 0.012°,移动方向为西南,移动距离为 1 804.2 m。从 2000—2010 年,水体重心经向移动 0.101°,纬向移动 0.003°,移动方向为东南,移动距离为 8 200.2 m。从 2010—2014 年,水体重心经向移动 0.042°,纬向移动 0.010°,移动方向为东北,移动距离为 3 533.8 m。从 2014—2016 年,水体重心经向移动 0.003°,纬向移动 0.003°,移动方向为东南,移动距离为 385.1 m。其中,2000—2010 年水体重心移动距离最大,其次是 1980—1990 年。

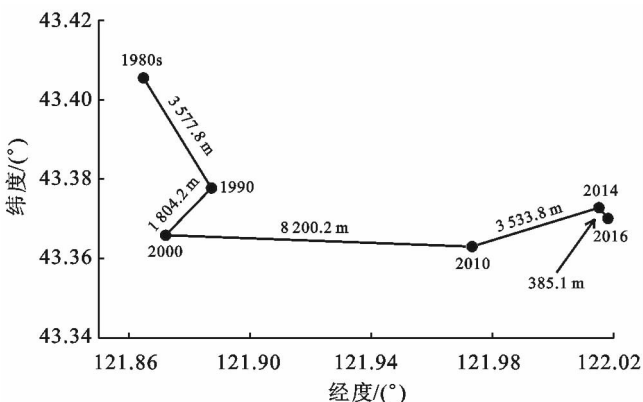


图 2 1980—2016 年科尔沁沙地水体重心迁移特征

1980—2016 年期间,建筑用地重心移动距离的幅度大小不一,移动方向也有所不同。1980—1990 年,水体重心的移动方向为西南,移动距离为 1 475.0 m,经向移动 0.015°,纬向移动 0.009°,是水体重心移动最快的时期(图 3)。1990—2016 年的 4 个时期内,水体重心移动的距离分别为 648.3、900.7、1 313.5 和 535.2 m,移动方向均为东北。

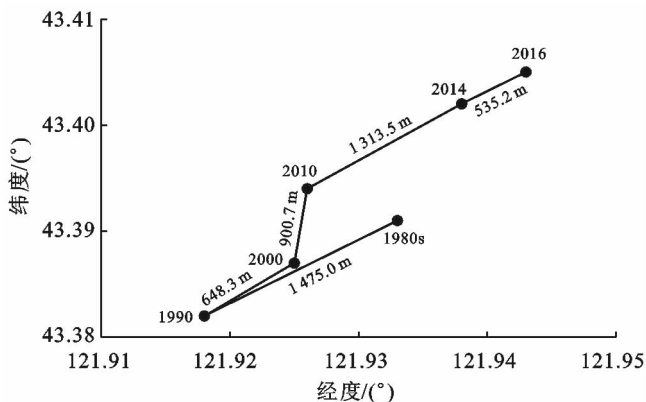


图 3 1980—2016 年科尔沁沙地建筑用地重心迁移特征

1980—2016 年期间,沙地重心变化幅度最大、最复杂。1980—1990 年,沙地重心向西北方向移动,移动距离为 3 812.6 m,经向移动 0.042°,纬向移动 0.018°(图 4)。1990—2000 年期间,沙地重心的移动转向为东南,而且移动距离达到了 11 382.5 m,是沙地重心移动最快的时期。2000—2010 年,沙地重心的移动方向开始掉头转为西北,移动距离为 5 429.6 m。2010—2014 年,沙地重心的移动方向与 1990—2000 年期间的方向相反,移动距离为 6 799.8 m,经向移动 0.080°,纬向移动 0.018°。2014—2016 年期间,沙地重心往南移动,移动距离为 9 720.5 m,纬向移动了 0.087°。

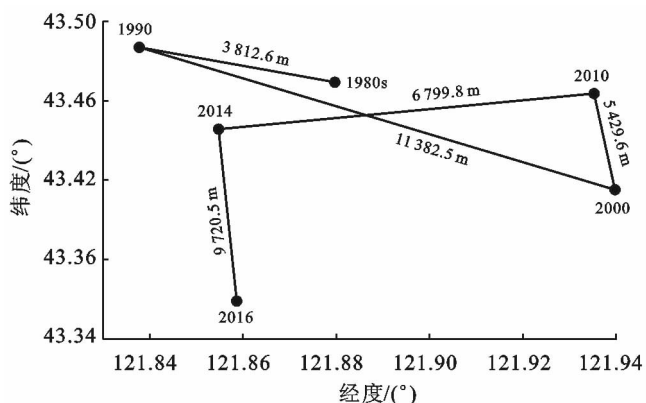


图 4 1980—2016 年科尔沁沙地重心迁移特征

相邻时期,耕地重心的移动方向和移动距离各有不同(图 5)。1990—2000 年和 2010—2014 年两个时

期,耕地重心的方向变化和距离变化最为突出,其中,1990—2000年,耕地重心的移动方向为东南,移动距离为4 018.4 m,经向移动了0.033°;2010—2014年,耕地重心转向东北方向,移动距离为4 009.7 m,经向移动0.028°,纬向移动0.030°。

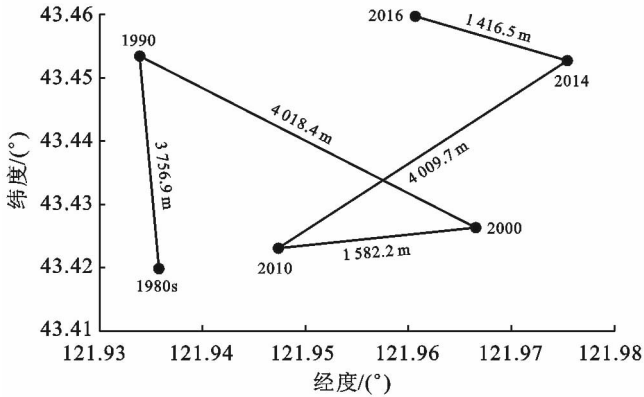


图 5 1980—2016 年科尔沁沙地耕地重心迁移特征

各土地利用类型的重心迁移速率能够更加直观地反映土地利用空间格局变化的速度。从表 2 可知,1980—2016 年,植被重心的迁移速率为 64.6 m/a,其中 2014—2016 年期间重心迁移速率为 2 012.7 m/a,达到最大值,最小值出现在 2000—2010 年期间。1980—2016 年,水体重心的迁移速率为 389.3 m/a,是植被重心迁移速率的 6 倍多,其中在 2010—2014 年,水体重心迁移速率达到最大值。1980—2016 年,建筑用地重心迁移速率为 53.6 m/a,说明该地区建筑用地的扩张主要发生在原有建筑用地的基础上,与植被重心迁移速率接近。沙地总体重心迁移速率为 379.5 m/a,2014—2016 年沙地重心迁移速率高达 4 860.3 m/a,说明沙地重心变化波动较大。耕地总体重心迁移速率为 148.3 m/a,2014—2016 年和 2000—2010 年期间重心迁移速率分别达到最大值和最小值,分别为 1 002.4 和 158.2 m/a。各土地利用类型在不同时期的重心迁移速率有较大差异,建筑用地总体迁移速率最小,水体和沙地的重心迁移速率相对较大,该现象主要与科尔沁沙地生态环境脆弱,造成的水资源持续性减少以及沙地随时反弹有关。

表 2 1980—2016 年科尔沁沙地

土地利用重心迁移速率 m/a

迁移速率	植被	水体	建筑用地	沙地	耕地
$V_{1980-1990}$	1 092.4	511.1	210.7	544.7	536.7
$V_{1990-2000}$	1 203.6	180.4	64.8	1 138.3	401.8
$V_{2000-2010}$	438.7	820.0	90.1	543.0	158.2
$V_{2010-2014}$	509.8	883.5	328.4	1 700.0	1 002.4
$V_{2014-2016}$	2 102.7	192.6	267.6	4 860.3	708.3
$V_{1980-2016}$	64.6	389.3	53.6	379.5	148.3

## 4 结论

本文基于 1980—2016 年科尔沁沙地土地利用数据,利用土地利用重心迁移模型,计算了不同时期各土地利用类型的重心坐标,以及相邻时期各土地利用类型重心迁移距离和重心迁移速率。研究结果显示,35 a 来科尔沁沙地的植被重心向西北方向迁移,水体重心向东南方向迁移,建筑用地重心向东北方向迁移,沙地重心向西南方向迁移,耕地重心向东北方向迁移;各时期,各土地利用类型重心迁移距离变化剧烈,但总的重心迁移速率有所减缓。科尔沁沙地近 35 a 的土地利用重心迁移轨迹和迁移速率,直观地反映了该地区土地利用空间格局变迁的过程,以及人类利用和改造土地资源在空间上的轨迹,揭示了科尔沁沙地生态环境的不稳定性和脆弱性,为土地资源的合理开发和生态环境的改善提供参考依据。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王涛,刘树林. 中国干旱区绿洲化、荒漠化调控区划(纲要)[J]. 中国沙漠,2013,33(4):959-966.
- [2] 朱震达. 全球变化与荒漠化[J]. 地学前缘,1997(2):213-219.
- [3] 常学礼,赵学勇,韩珍喜,等. 科尔沁沙地自然与人为因素对沙漠化影响的累加效应分析[J]. 中国沙漠,2005,25(4):466-471.
- [4] 刘纪远,张增祥,徐新良,等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报,2010,64(12):1411-1420.
- [5] 慈龙骏. 极端干旱荒漠的“荒漠化”[J]. 科学通报,2011,56(31):2616-2626.
- [6] 常学礼,鲁春霞,高玉葆. 人类经济活动对科尔沁沙地风沙环境的影响[J]. 资源科学,2003,25(5):78-83.
- [7] Pan Jinghu, Li Tianyu. Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space[J]. Natural Hazards, 2013,68(2):915-927.
- [8] Wang Chenye, Tang Jie, Li Zhaoyang, et al. Driving force analysis of land use and land cover temporal-spatial change in the west of Jilin Province[J]. Ecology & Environment, 2008,17(5):1914-1920.
- [9] 孙倩,张飞,丁建丽,等. 渭干河—库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究[J]. 生态学报,2012,32(10):3252-3265.
- [10] 郭碧云,张正峰. 农牧交错区土地利用重心迁移研究:以河北省沽源县为例[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(4):217-221.
- [11] 曹慧明,董仁才,邓红兵,等. 区域生态系统重心指标的概念与应用[J]. 生态学报,2016,36(12):3639-3645.

(下转第 299 页)

渗透水、堆场排水的重金属迁移对旱作土的影响小于水稻土,可以通过调整种植结构,减少水稻种植,改水作为旱作,也是减少磷石膏周边耕地重金属污染的有效途径,这方面的内容还值得深入研究。

### 3 结论

(1) 天然降雨对磷石膏堆场产生的侵蚀作用及淋溶作用是磷石膏中重金属迁移的主要原因。磷石膏露天堆放过程中污染地表水体的重金属主要是 Cd,其次是 Hg, As;堆场地表径流、渗透水及排水携带这些重金属迁移进入农田,对土壤环境质量产生明显的影响。

(2) 磷石膏堆场周边旱作土主要是 Cd, As, Zn 污染风险,而水稻土则主要是 Cd, As, Hg, Zn 的污染风险。

(3) 磷石膏堆场在降雨的侵蚀作用及淋溶作用下,以地表径流、侵蚀冲沟流水、堆场排水形式携带磷石膏颗粒及溶解性的重金属离子直接进入农田或引水灌溉进入农田后, Cd, Hg, Pb, As 等重金属元素在土壤中不断累积,土壤污染风险逐年增加。磷石膏堆场周边土壤中重金属含量随距堆场距离的增加,土壤重金属污染风险逐步减少。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 朱建国,代玉林. 贵州“十二五”磷化工产业基础与发展分析[J]. 贵州化工, 2011, 36(3): 21-22.

[2] 袁浩,徐景轶,张薇,等. 贵州省磷化工产业发展现状及“十三五”发展思路[J]. 安徽化工, 2016, 42(4): 16-18.

[3] 杨仲苗,王柏林. 二水法磷酸生产的污染防治[J]. 化工环保, 2004, 24(4): 294-297.

[4] 芦苗. 磷石膏堆放对地下水影响的研究[J]. 化工环保, 1989, 9(2): 70-75.

[5] 郑文成,贾洪彪,郭明,等. 平坝磷石膏堆场渗漏分析与污染防治对策[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 75-79.

[6] 陈敏涛,陈丽霞,熊俊. 天峰磷石膏堆场对区域水环境的影响分析[J]. 资源环境与工程, 2016, 30(3): 454-457.

[7] 段先前,韦俊发,丁坚平. 贵州某磷石膏堆场渗漏污染评价[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(2): 218-221.

[8] 查学芳,覃应机,吴攀,等. 磷石膏堆场渗漏影响下岩溶地下水地球化学过程[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1708-715.

[9] 李佳宣,施泽明,唐瑞玲,等. 磷石膏堆场对周围农田土壤重金属含量的影响[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010, 7(5): 52-55.

[10] 钟贵江,徐慧孜,杨刚. 磷石膏堆场周边耕地土壤镉形态及释放潜力分析[J]. 低碳世界, 2018, 8(7): 1-2.

[11] 王运长,李金娟,解田,等. 磷石膏改良基质中 Cd, Zn 在蔬菜内的富集和迁移特征[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13): 271-275.

[12] 李金娟,王运长,解田,等. 磷石膏改良基质中 As 和 F 在蔬菜内富集和迁移特征[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 150-154.

[13] 向仰州,刘方. 不同草种在磷石膏基质中生长适应性[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2010, 29(3): 525-528.

[14] 刘锋,王琪,黄启飞,等. 固体废物浸出毒性浸出方法标准研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 9-15.

[15] 侯赞. 磷石膏影响区重金属地球化学特征及其赋存形态研究[D]. 四川 成都:成都理工大学, 2015.

[16] 李佳宣,施泽明,唐瑞玲,等. 磷石膏堆场对周围农田土壤重金属含量的影响[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010(5): 52-55.

(上接第 260 页)

[12] 高志强,刘纪远. 我国耕地面积重心及耕地生态背景质量的动态变化[J]. 自然资源学报, 1998, 28(1): 92-95.

[13] Mao Dazhi, Cherkauer K A. Impacts of land-use change on hydrologic responses in the Great Lakes region[J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(1): 71-82.

[14] He Yingbin, Chen Youqi, Tang Huajun, et al. Exploring spatial change and gravity center movement for ecosystem services value using a spatially explicit

ecosystem services value index and gravity model[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2011, 175(1/4): 563-571.

[15] 段翰晨,薛娴. 基于 DEM 的科尔沁沙地沙漠化土地时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 240(8): 77-82.

[16] Pal M, Mather P M. Support vector machines for classification in remote sensing[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(5): 1007-1011.