基于 GIS 的河北省丰宁县土地沙化演变及驱动力分析

贾双竹，彭 博，范慧涛，宣立辉，郭宇嘉，谷建才

（河北农业大学 林学院，河北 保定 071000）

摘 要：[目的] 综合分析河北省丰宁县土壤沙化区沙化演变规律和驱动因子，为沙化土地治理及合理开发利用土地资源上提供技术依据。[方法] 以遥感和 GIS 作为信息获取和分析工具，通过对河北省丰宁县 2009，2014 年 2 期土地沙化遥感影像解译，研究了该区土地沙化的时空演变规律，并对引起其演变的驱动因子进行了探讨。[结果] 沙化土地在空间分布上具有明显的区域性，主要分布于中部以西地区，且沙化类型以固定沙地为主；近 5 a 来，尽管中度沙化面积有所增加，但沙化土地面积总体呈减少趋势，轻度沙化减少了 560.9 hm^2，重度沙化减少了 1 872.6 hm^2，沙化土地总面积减少了 809.2 hm^2；高原区较低山区易发生土地沙化，干旱区土壤沙化程度重于半干旱地区。[结论] 以当地地貌环境条件为基础，合理开发利用土地资源，增加林地面积，可有效减弱土地沙化。

关键词：河北省丰宁县；遥感；土地沙化；演变规律；驱动力

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)03-0200-06 **中图分类号**：S151$^+$.3，X171.1

文献参数：贾双竹，彭 博，范慧涛，等.基于 GIS 的河北省丰宁县土地沙化演变及驱动力分析[J].水土保持通报，2018，38(3)：200-205. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.032. Jia Shuangzhu，Peng Bo，Fan Huitao，et al. GIS-based analysis on evolution and driving forces of land desertification in Fengning County of Hebei Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(3)：200-205.

GIS-Based Analysis on Evolution and Driving Forces of Land Desertification in Fengning County of Hebei Province

JIA Shuangzhu，PENG Bo，FAN Huitao，XUAN Lihui，GUO Yujia，GU Jiancai

（*Forest College，Agricultural University of Hebei，Hebei，Baoding* 071000，*China*）

Abstract：[Objective] To analyze the evolution and driving forces of land desertification in order to provide technical references for land desertification controlling and the rational exploitation and utilization of land resources in the Fengning County，Hebei Province. [Methods] Through remotely sensed imagery interpretation based on remote sensing and GIS，we analyzed the temporal and spatial evolution of regional land desertification and its driving factors in the Fengning County in 2009 and 2014. [Results] The desertification land showed an obviously regional distribution，which was mainly distributed in the fixed sandy land of the midwest areas. Over the past 5 years，the total area of desertification land generally decreased despite the moderate desertification area increased，in which the area of mild desertification decreased by 560.9 hm^2，the area of severe desertification decreased by 1 872.6 hm^2，and the total area of desertification land decreased by 809.2 hm^2. The plateau was easier to form desertification than the lower hilly zone，the degree of desertification was more severe in the arid zone than that of semiarid zone. [Conclusion] Based on local landscapes and environmental conditions，developing and using land resources rationally，increasing forest areas，will effectively reduce the land desertification.

Keywords：**Fengning County of Hebei Province**；**remote sense**；**land desertification**；**evolution**；**driving factors**

土地沙化是指干旱、半干旱和部分半湿润地区，在具有一定沙质基础和干旱、大风动力条件下，由于过度人为活动与资源、环境不相协调所产生的一种以风沙活动为主要标志的环境或土地退化过程[1]。土

收稿日期：2017-10-09 **修回日期**：2018-01-06

资助项目：国家重点研发计划课题“坝上高原及华北北部山地沙化土地治理与沙产业技术研发及示范”(2016YFC0500802)

第一作者：贾双竹(1993—)，女(汉族)，河北省辛集市人，硕士研究生，研究方向为森林经理学。E-mail：1054752378@qq.com。

通讯作者：谷建才(1963—)，男(汉族)，河北省石家庄市藁城区人，博士，教授，博士生导师，主要从事森林经理等方面的研究。E-mail：gujiancai@126.com。

地沙化的大面积蔓延就形成荒漠化,是最严重的全球环境问题之一,地球上 20%的陆地正在受到沙漠化威胁[2-3]。土地沙漠化已成为制约中国特别是西部地区社会经济可持续发展的主要因素。因此,有关土地沙化的研究受到了国内外学者的广泛关注,何介南等[4]利用若尔盖县 4 期土地沙漠化监测数据研究了沙化程度的动态演变过程;薛占金等[5]从植被退化、土层厚度和风蚀强度等方面分析研究了晋北地区环境特征及土地沙化的成因机制;汪晓菲等[6]根据若尔盖县 4 次土地沙化监测数据及野外调查资料,研究了该地区沙化现状及发展动态;白龙等[7]研究分析了陕西省神木县 1986—2004 年土地沙化变化趋势及社会环境因素对其影响;邓东周等[8]、朱洪如[9]对不同地区土地沙化驱动因子进行了分析研究。前人对土地沙化特征及自然和人为因子的影响力进行了大量研究,但针对丰宁县土地沙化情况及地形、气候对沙化影响的相关研究很少。丰宁地区属于环京津风沙治理工程的重点地区之一,加强该地区的植被恢复建设,对改善河北的生态环境和保护京津地区的生态安全具有重要的意义。因此,本文拟利用卫星遥感影像监测,结合地理信息系统进行综合分析统计,对不同时期的遥感影像进行处理,对河北省丰宁县的大滩镇、鱼儿山镇、土城镇、万胜永乡、四岔口乡、外沟门乡、草原乡、小坝子乡、草原林场、大滩林场、四岔口林场 11 个主要土壤沙化区 2009—2014 年的沙化演变规律和驱动因子进行综合分析,为今后该地区沙化治理、土地资源的合理利用提供参考依据。

1　研究区概况

丰宁满族自治县位于河北省北部、承德市西部,地理坐标为东经 115°14′—117°24′,北纬 40°35′—42°00′,总面积为 8 765 km^2。地处燕山北麓和内蒙古高原南缘,地势由东南向西北呈阶梯状增高,分为坝下、接坝和坝上 3 个地貌单元。该县属于中温带半湿润半干旱大陆性季风型高原山地气候,春季多风干旱、夏季湿热多雨、秋季天高气爽、冬季寒冷干燥。全年多为西风、西北风,年均风速达每秒 4.3 m,年均大风日数 49 d,沙尘暴 13 d,年均气温 0.9～6.2 ℃,无霜期 110～145 d,年有效积温坝上地区为 1 082 ℃,坝下为 1 489 ℃,年日照时数 2 903.6 h,昼夜温差大,年降雨量 350～550 mm。植被具有内蒙古高原草原特点,类型复杂,物种组成丰富,以杨、桦树和大面积草甸草原为主。当地人为活动以农业生产和放牧对土壤沙化影响严重。丰宁县坝上地区土地沙化面积不断增加,20 世纪 70 年代为 34 224 hm^2,80 年代为57 591 hm^2,90 年代为 131 927 hm^2[10]。

2　数据及方法

2.1　数据来源及信息提取

选用 2009-07,2014-08 这 2 期 TM 遥感影像,尽量使得遥感数据无噪声和条带,云层覆盖低于 5%,利用 PCI Geomatica 等遥感图像处理软件,以 1∶50 000地形图为基准进行几何校正、图像融合、影像拼接等,建立研究区域的数字影像。校正采用的是二次多项式纠正法,即用高分辨率的全色影像对低分辨率的多光谱影像进行纠正。将原始影像与 DEM 等信息融合后采用基于“径向基函数”的神经网络方法进行遥感影像的计算机分类,分类精度均值大于 90%。利用 Kappa 系数对解译结果进行精度验证,经检验,研究区 2009 和 2014 年土地利用及沙化分类分级的 Kappa 系数均在 0.8 以上,分类结果良好[11]。利用 ArcGIS 软件的空间分析与统计功能提取沙化土地类型、程度、面积、土地利用类型、气候和地貌等信息,在此基础上分析沙化土地的时空变化特征及其与土地利用类型、气候、地貌等因子的相关性。

2.2　沙化土地分类分级

不同土地利用类型在遥感图像中呈现出的光谱信息不同,利用这一特征,采用监督分类中的最大似然法进行特征判别,结合遥感图像信息并参考 Google Earth 影像进行目视解译,将该区土地利用分为 6 类:耕地、林地、草地、居民建筑交通用地、水域和未利用地。

参照《沙化土地监测技术规程》(GB/T 24255-2009),结合解译得到的矢量图形数据,土地沙化类型分为 5 类:非沙化土地、固定沙地、半固定沙地、有明显沙化趋势的土地、沙化耕地。依据解译标志,参考相关研究[12],丰宁县土地沙化程度分为 4 类:非沙化土地、轻度沙化、中度沙化、重度沙化。

3　结果分析

3.1　沙化土地时空变化特征

分别采用 2009 和 2014 年的 TM 遥感影像经过解译,对丰宁县 5 a 来土地沙化在空间上和时间上的动态变化情况进行了研究,同时为了对比分析,分别按沙化程度和沙化类型的变动情况,利用 ArcGIS 得到不同时段沙化土地空间动态变化,同时对分类结果进行统计分析。

3.1.1　不同沙化程度时空变化特征　依据 2 期土地沙化数据,研究区内不同土地沙化程度空间分布及动态变化情况见图 1 所示。

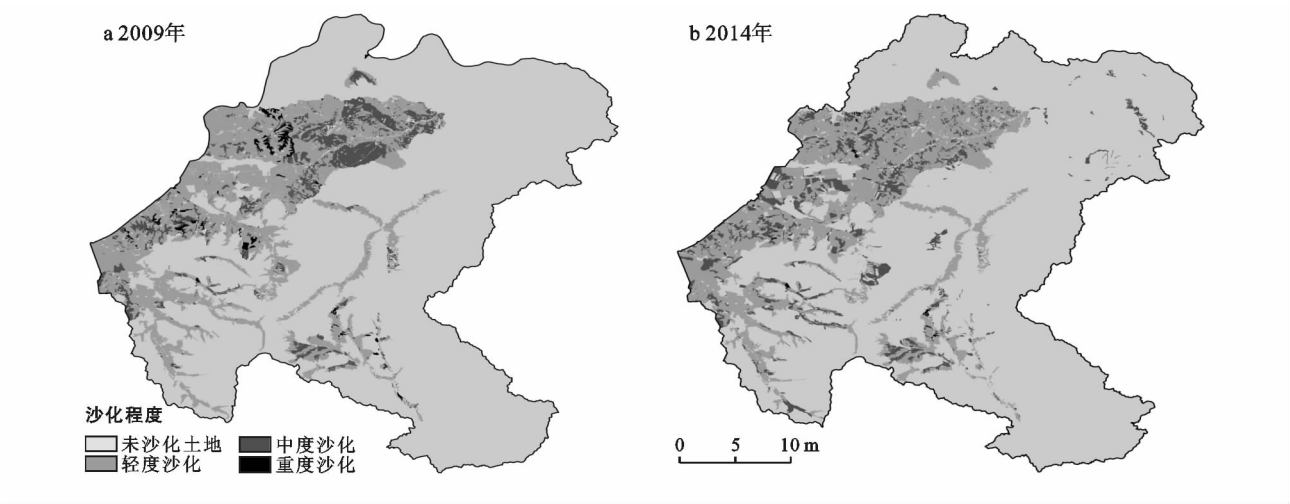


图 1 2009 年和 2014 年土地沙化程度分布

分析研究区不同土地沙化程度空间分布情况可以发现,2009 年土地沙化主要集中在中部以西地区,少数分布在南部地区;其中,中度沙化在中部偏上地区较为集中,重度沙化在西北方向上分布较为集中,其余均呈零星分布;到 2014 年,土地沙化在东北方向上出现零星分布,且为中度沙化;与 2009 年相比,中度沙化集中分布区现已呈零星分布,重度沙化分布极显著减少。

此次对丰宁县主要风沙区的 11 个乡镇土地沙化动态进行监测研究,监测面积总计 332 973.8 hm^2。分析研究区不同土地沙化程度动态变化结果可以看出,2009 年土地沙化面积为 85 506.3 hm^2,占总面积的 25.68%,轻度沙化、中度沙化、重度沙化占沙化土地总面积的比重分别为 78.42%,19.00%,2.58%;2014 年土地沙化面积为 84 697.1 hm^2,占总面积的 25.44%,轻度沙化、中度沙化、重度沙化占沙化土地总面积的比重分别为 78.51%,21.10%,0.39%;从 2009—2014 年,非沙化土地面积增加 809.2 hm^2,重度沙化面积显著减少,减少了 1 872.6 hm^2,轻度沙化面积减少了 560.9 hm^2,中度沙化面积增加了 1 624.3 hm^2。

3.1.2 不同沙化类型时空变化特征 依据 2 期土地沙化数据,研究区内不同土地沙化类型空间分布情况及动态变化见图 2。

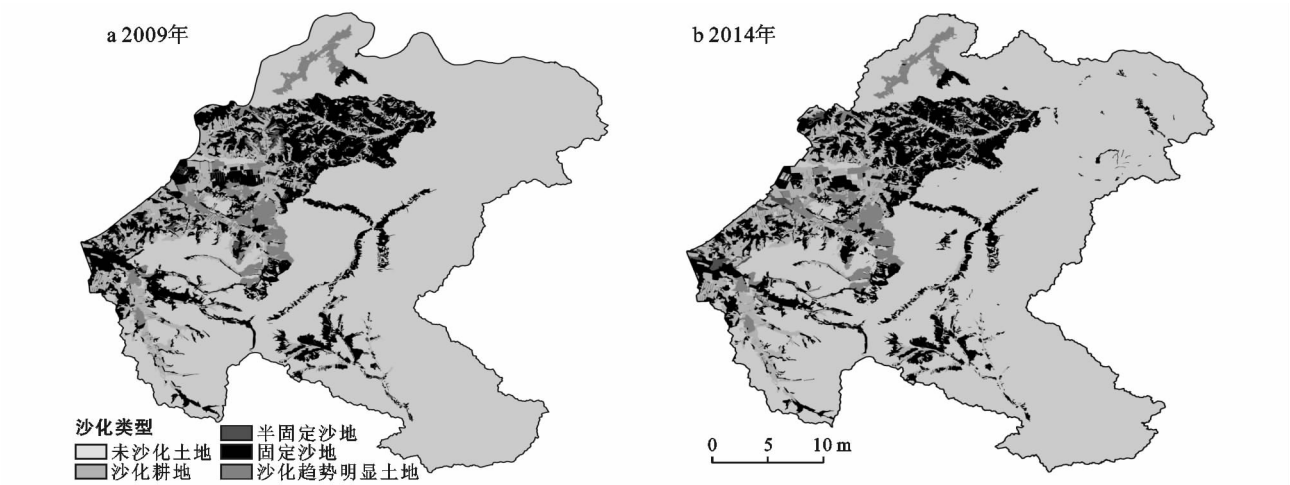


图 2 丰宁县 2009 年和 2014 年沙化土地类型分布

由图 2 沙化土地类型分布可以看出,有明显沙化趋势的土地主要分布在中部偏西及西北角地区,从 2009—2014 年,沙化耕地、有明显沙化趋势的土地在分布上变化不显著,但半固定沙地在分布上变动明显,2009 年半固定沙地在西北部分布较为集中,而西部地区也有零星分布;2014 年半固定沙地位置明显向左偏移,在西部方向上分 3 块呈较聚集分布,且 2009 年的半固定沙地分布区到 2014 年多转化为固定沙地分布区。

不同类型沙化土地面积统计分析结果表明,2009 年沙化土地面积共计 95 523.1 hm^2,占总面积的 28.69%。固定沙地、半固定沙地、有明显沙化趋势的

土地、沙化耕地占沙化土地总面积的百分比分别为 53.67%,2.16%,10.49%,33.68%。2014 年沙化土地面积为 94 895.6 hm^2,占总面积的 28.50%。固定沙地、半固定沙地、有明显沙化趋势的土地、沙化耕地占沙化土地总面积的百分比分别为 53.30%,2.06%,10.75%,33.89%。不同沙化类型土地面积与 2009 年相比,2014 年固定沙地面积减少了 697.6 hm^2,半固定沙地面积减少了 111.9 hm^2,有明显沙化趋势的土地面积增加了 181.6 hm^2,沙化耕地面积变动最小,仅减少了 5.5 hm^2。

3.2　沙化土地时空变化的驱动力分析

土地沙化是脆弱的生态环境与人类活动相互作用、相互影响而共同导致的结果,在土地沙化过程中引起土地沙化并发生改变的驱动因子众多且难以区分驱动作用大小,要结合当地情况进行判别[13-15]。丰宁县作为典型的土地沙化地区之一,脆弱的自然环境条件是造成土地沙化的根源,因此,本文结合当地的土地利用类型、气候条件、地貌类型对沙化土地时空变化做进一步分析。

3.2.1　*土地利用类型*　依据 2 期土地沙化数据,研究区不同土地利用类型空间分布情况及动态变化见附图 3 和表 1 所示。

分析研究区土地利用类型空间分布情况可以看出,耕地、林地及草地是该地区主要的土地利用形式,且中部以西地区的草地逐渐转变为林地,结合图 1 土地沙化程度分布情况可以看出,沙化区的主要土地利用类型为草地和耕地,而林地所在的中东、东南地区仅有少量分布。

表 1　2009—2014 年研究区土地利用类型面积　　hm^2

土地利用类型	非沙化土地		轻度沙化		中度沙化		重度沙化		沙化面积总计	
	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年
耕 地	30 896.9	31 718.1	28 856.5	28 347.1	3 160.9	3 600.9	150.4	214.5	32 167.9	32 162.4
林 地	85 318.8	114 689.1	7 810.6	17 124.2	469.4	2 241.4	2.53	111.7	8 282.5	19 477.2
草 地	120 073.2	79 721.8	30 389.4	21 024.3	12 612.2	12 024.7	2 054.3	8.5	45 055.8	33 057.5
居民工矿交通用地	4 373.3	4 177.3	0	0	0	0	0	0	4 373.3	4 177.3
水 域	4 542.3	4 665.5	0	0	0	0	0	0	4 542.3	4 665.5
未利用地	2 262.9	13 304.9	0	0	0	0	0	0	2 262.9	13 304.9

从表 1 土地利用类型面积动态变化情况可知,未利用地面积增加了 11 042.0 hm^2,但未出现沙化;到 2014 年非沙化土地中耕地面积增加了 821.2 hm^2,沙化面积基本不变;随着时间的推移,林地、草地面积动态变化明显,林地面积增加 40 565.0 hm^2,其中非沙化土地面积增加 29 370.3 hm^2,轻度沙化所占比重降低了 6.4%,尽管不同程度沙化面积较之前有所增加,但沙化面积所占比重变化较小;草地面积减少了 52 349.7 hm^2,轻度、中度沙化土地面积减少分别为 9 365.1,587.5 hm^2,重度沙化面积下降显著,面积减少了 2 045.8 hm^2,下降率达 99.6%。

3.2.2　*气 候*　依据当地的年平均降雨量,以年等降水量线<200 mm 为干旱区,200～400 mm 为半干旱区,>800 mm 为湿润区的标准[16],将研究区的气候划分为干旱、半干旱和湿润 3 种类型。则 2009—2014 年研究区气候类型分布情况及动态变化情况如图 3 及表 2 所示。

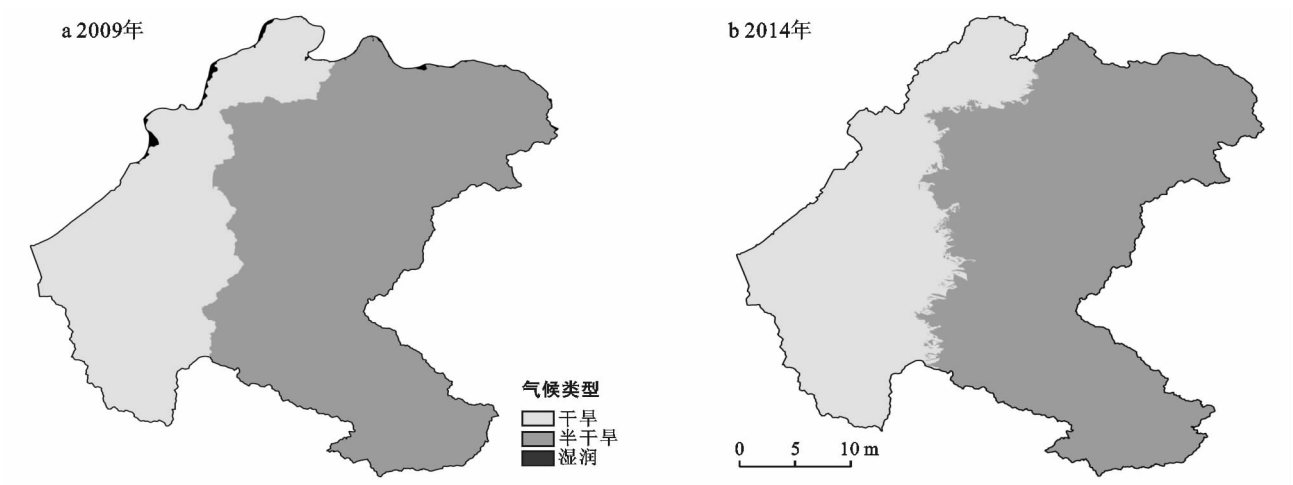


图 3　丰宁县 2009 年和 2014 年气候类型分布

表 2 2009—2014 年丰宁县不同气候类型沙化面积 hm^2

气候类型	非沙化土地		轻度沙化		中度沙化		重度沙化		沙化面积总计	
	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年
干 旱	67 627.3	74 384.8	41 949.0	39 215.0	5 505.2	10 916.0	1 885.9	214.8	49 340.1	50 345.7
半干旱	178 964.2	173 891.9	24 707.5	27 280.6	10 703.6	6 951.0	321.3	119.8	35 732.4	34 351.4
湿 润	875.7	0.0	399.9	0.0	34.0	0.0	0.0	0.0	433.9	0.0

从丰宁县气候类型分布图(图 3)可以看出,研究区以干旱和半干旱气候类型为主,2009 年有少量湿润气候的西北、东北部地区在 2014 年时的气候类型分别转化为干旱、半干旱气候类型。结合图 1 不同年份土地沙化程度分布可知,沙化土地主要分布在气候干旱条件下。

从表 2 可以看出,2009 年干旱、半干旱及湿润气候类型中沙化面积占沙化总面积的百分比为 57.70%,41.79%,0.51%;2014 年干旱、半干旱气候类型中沙化面积占沙化面积的百分比为 59.44%和 40.56%。轻度、中度及重度沙化面积所占沙化总面积的比重,2009 年干旱气候条件下分别为 85.02%,11.16%,3.82%;半干旱气候条件下各占 69.15%,29.95%,0.90%;2014 年干旱气候条件下分别为 77.89%,21.68%,0.43%;半干旱气候条件下各占 79.42%,20.23%,0.35%。2009—2014 年,干旱气候条件下的非沙化土地面积增加了 6 757.5 hm^2,沙化面积增加了 1 005.6 hm^2;半干旱气候条件下的非沙化土地面积减少了 5 072.3 hm^2,沙化面积减少了 1 381.0 hm^2。

3.2.3 地 貌 依据地貌对气候、土壤和植被地域差异影响的大小,结合当地地形地貌特点,以相对高度>500 m 为高原,200～500 m 为低山,<200 m 为其他的标准[17],将研究区的地貌类型分为高原、低山、其他 3 种类型。则 2009—2014 年研究区地貌类型分布情况及动态变化情况如图 4 和表 3 所示。

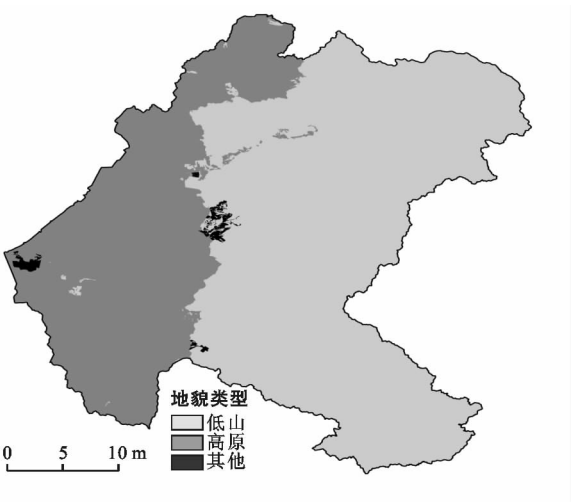


图 4 丰宁县地貌类型分布

表 3 2009—2014 年丰宁县不同地貌类型沙化面积 hm^2

地貌类型	非沙化土地		轻度沙化		中度沙化		重度沙化		沙化面积总计	
	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年	2009 年	2014 年
低 山	171 648.8	176 799.0	24 706.1	28 255.1	10 224.4	7 065.5	321.3	119.8	35 251.8	35 440.4
高 原	65 128.9	70 069.2	42 346.6	37 746.1	5 413.9	10 485.1	1 884.8	214.8	49 645.3	48 446.0
其 他	10 689.9	1 408.5	3.705	494.33	604.3	316.4	1.138	0.0	609.1	810.7

由研究区地貌分布图 4 可以看出,高原和低山为研究区内的 2 种主要地貌类型,其中,高原主要分布在西部地区,低山分布在东部地区,结合图 1 不同年份土地沙化程度分布可知,沙化土地主要分布在高原地区。

由表 3 可知,研究区地貌类型中,低山、高原及其他地貌类型沙化面积占沙化总面积的比重,2009 年分别为 41.23%,58.06%,0.71%;2014 年各占41.84%,57.20%,0.96%。轻度、中度及重度沙化面积所占沙化面积的比重,2009 年低山地貌条件下分别为 70.08%,29.00%和 0.91%;高原地貌条件下各占 85.30%,10.91%,3.79%;2014 年低山地貌条件下分别为 79.22%,19.94%,0.34%;高原地貌条件下各占 77.92%,21.64%,0.44%。2009—2014 年,低山地貌条件下的非沙化土地面积增加了 5 150.2 hm^2,沙化面积增加了 188.6 hm^2;高原地貌条件下的非沙化土地面积增加了 4 940.3 hm^2,沙化面积减少了 1 199.3 hm^2。

4 结论与讨论

2009—2014 年承德丰宁地区土地沙化程度、沙化类型在空间上和时间上都发生了较大变化。沙化土地主要分布在中部以西地区。2009 年的中度、重度沙化集中分布区到 2014 年沙化程度均显著下降。尽管中度沙化面积有所增加,但沙化面积总体呈扭转变好态势,轻度沙化面积减少了 560.9 hm^2,重度沙

化面积减少了 1 872.6 hm^2,非沙化土地面积增加了 809.2 hm^2。沙化土地以固定沙地为主,到 2014 年半固定沙地多转化为固定沙地。

对造成研究区土地沙化的土地利用类型、气候、地貌驱动因子进行分析,结果表明,沙化区主要土地利用类型为耕地和草地,而林地分布区土壤沙化程度低,林地面积增加能降低土地沙化。到 2014 年,林地面积增加 40 565.0 hm^2,草地面积减少 52 349.7 hm^2。研究区气候类型以干旱、半干旱为主,到 2014 年干旱区沙化面积为 50 345.7 hm^2,半干旱区沙化面积为 34 351.4 hm^2,干旱区沙化面积显著高于半干旱区。低山和高原是研究区的主要地貌类型,沙化土地集中分布区的地貌类型以高原为主,且高原区土地沙化面积大于低山区,2009 年高原区土地沙化面积比低山区多 14 393.5 hm^2,2014 年高原区土地沙化面积比低山区多 13 005.6 hm^2。

土壤沙化受多方面因素的共同影响。近 5 a 来土壤沙化出现好转,这与合理利用土地密不可分,多植树造林,有助于减少土壤流失,研究表明在该地区干旱环境条件下的高原区更容易造成土壤沙化,因此,要特别注重该地区的土地利用,要合理开发利用。

[参 考 文 献]

[1] 王静洁,蔡延玲.青海湖及其周围地区沙化土地变化动态研究[J].湖南林业科技,2016,43(6):81-89.

[2] 张浩,余军,王锋,等.陕西省荒漠化、沙化土地监测与动态变化分析[J].西北林学院学报,2015,30(1):184-188.

[3] 李金亚.科尔沁沙地草原沙化时空变化特征遥感监测及驱动力分析[D].北京:中国农业科学院,2014.

[4] 何介南,徐杰,康文星,等.若尔盖县土地沙化程度演变动态特征[J].林业科学,2016,52(1):159-165.

[5] 薛占金,秦作栋,孟宪文.晋北地区环境特征及其土地沙化机制研究[J].水土保持研究,2011,18(2):98-102.

[6] 汪晓菲,何平,康文星.若尔盖县土地沙化现状及沙化发展动态特征[J].中南林业科技大学学报,2014,34(12):124-129.

[7] 白龙,刘利民,小林達明,等.基于 3S 的黄土高原北部土地沙化分析:以陕西省神木县为例[J].草业科学,2010,27(12):32-37.

[8] 邓东周,杨执衡,陈洪,等.青藏高原东南缘高寒区土地沙化现状及驱动因子分析[J].西南林业大学学报,2011,31(5):27-32.

[9] 朱洪如.福建沿海土地沙化自然和人为驱动机制定量研究[J].林业勘察设计,2016,36(4):37-39,44.

[10] 刘全友.河北省坝上地区气候与沙化关系的研究[J].环境科学进展,1994,2(6):47-57.

[11] 张蓉.面向对象的遥感图像分类方法在土地利用土地覆盖中的应用研究[D].昆明:西南林学院,2008.

[12] 韩广,杨文斌.沙漠化土地等级划分问题的初步研究[J].中国沙漠,1997,17(3):237-242.

[13] 郭靖,刘萍,高亚琪,等.基于 RS 和 GIS 的托克逊县沙化土地时空动态分析与评价[J].林业资源管理,2009(1):89-94.

[14] 姜英,谷春莲,孙景梅,等.基于 RS 的塔里木河下游沙化土地/植被盖度动态变化研究:以尉犁县为例[J].西北林学院学报,2008,23(5):193-197.

[15] 王晓青,杨联安,姜英,等.毛乌素沙地南缘湿地/沙化土地动态变化分析[J].西北林学院学报,2007,22(4):73-77.

[16] 罗志成,王密侠.中国干旱地区及其类型划分的研究现状[J].干旱地区农业研究,1987(2):95-116.

[17] 周成虎,程维明,钱金凯,等.中国陆地 1∶100 万数字地貌分类体系研究[J].地球信息科学学报,2009,11(6):707-724.

(上接第 199 页)

[17] Mashimbye Z E, Cho M A, Nell J P, et al. Model-based integrated methods for quantitative estimation of soil salinity from hyperspectral remote sensing data: A case study of selected South African soils [J]. 2012, 22(5): 640-649.

[18] Lee S, Chol H, Cha K, et al. Random forest as a potential multivariate method for near-infrared (NIR) spectroscopic analysis of complex mixture samples: gasoline and naphtha [J]. Microchemical Journal, 2013,110:739-748.

[19] 马驰.基于 HJ-1A 高光谱影像的土壤盐碱化遥感研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(2):180-184.

[20] Bouaziz M, Matschullat J, Gloaguen R. Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2011,343(11):795-803.

[21] 史舟.土壤地面高光谱遥感原理与方法[M].北京:科学出版社,2014:46-47.

[22] Minasny B, McBratney A B, Bellon-Maurel V, et al. Removing the effect of soil moisture from NIR diffuse reflectance spectra for the prediction of soil organic carbon[J]. Geoderma, 2011,167:118-124

[23] 翁永玲,戚浩平,方洪宾,等.基于 PLSR 方法的青海—共和盆地土壤盐分高光谱遥感反演[J].土壤学报,2010,47(6):1256-1263.

[24] 关红,贾科利,张至楠.采用高光谱指数的龟裂碱土盐碱化信息提取与分析[J].红外与激光工程,2010,43(12):4154-4158.