

基于相对降水利用率的内蒙古风蚀区沙漠化研究

泉涛, 王静璞*, 党文硕, 刘新秋, 沈瑞华 (鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264025)

摘要 以 MODIS NDVI 数据和降水量站点数据为基础, 计算内蒙古风蚀区 2001—2018 年的相对降水利用率(RUE_r), 通过分析 RUE_r 的时间变化、空间分布及变异系数, 综合评价内蒙古风蚀区 18 年间的沙漠化演变情况。结果表明, 18 年间内蒙古风蚀区内的 RUE_r 呈现出微弱的下降趋势, 沙漠化程度加剧; 空间分布上, 62.98% 的地区为正斜率, 植被呈恢复状态, 降水为影响沙漠化的主导因素; 37.02% 的地区为负斜率, 植被出现退化现象, 人类活动为影响沙漠化的主导因素。研究区内 89.09% 的地区为轻度沙漠化, 重度沙漠化地区集中在内蒙古西北部, 中度沙漠化和非沙漠化地区在研究区内零星分布。18 年间内蒙古风蚀区的沙漠化变异程度较大, 87.91% 的地区表现为脆弱到非常脆弱, 仅有 12.09% 的地区表现为稳定到非常稳定。

关键词 沙漠化; 相对降水利用率; 时空变化; 内蒙古风蚀区

中图分类号 X144 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)08-0072-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.08.019



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Desertification in Wind Erosion Area of Inner Mongolia Based on RUE_r
QUAN Tao, WANG Jing-pu, DANG Wen-shuo et al (School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025)

Abstract Based on MODIS NDVI data and precipitation station data, this paper calculated the relative rainfall utilization efficiency (RUE_r) in the wind erosion area of Inner Mongolia from 2001 to 2018. By analyzing the temporal variation, spatial distribution and coefficient of variation of RUE_r, the evolution of desertification in the wind erosion area of Inner Mongolia in the past 18 years was evaluated comprehensively. The results showed that during the past 18 years, the RUE_r in the wind erosion area of Inner Mongolia had shown a weak downward trend, which means the degree of desertification had increased. In terms of spatial distribution, 62.98% of the study areas had a positive slope, vegetation was in a recovery state, precipitation was the leading factor affecting desertification, 37.02% of the study areas had a negative slope, vegetation was in a degraded state, human activity was the leading factor affecting desertification. 89.09% of the study areas were light desertification. The areas with heavy desertification were concentrated in the northwest of Inner Mongolia, while the areas with moderate and no desertification are scattered in the study areas. In the past 18 years, the degree of desertification variation in the wind erosion area of Inner Mongolia was relatively large, 87.91% of the study areas were fragile to very fragile, and only 12.09% of the study areas were stable to very stable.

Key words Desertification; Relative rainfall utilization efficiency; Spatial-temporal variation; Wind erosion area of Inner Mongolia

近年来, 由于全球变暖和人类对环境的过度干预, 沙漠化成为一个影响全球的环境问题^[1]。内蒙古自治区面积广大, 气候干旱多风沙, 易造成水土流失, 加之近年来经济的快速发展带来过度放牧、资源开采不合理等问题, 使内蒙古成为我国沙漠化形势最严峻、治理任务最艰巨的地区之一^[2-3]。

植被破坏是沙漠化最为显著的特征之一, 因此植被信息成为评价沙漠化的一个重要指标。遥感技术可以快速准确地获取地面植被信息, 加之全天候、多角度、大范围的优势, 其在土地沙漠化监测中的应用已经非常普遍^[4]。近年来, 许多学者从不同角度对内蒙古沙漠化进行了研究, 其中大多分析了内蒙古地区的荒漠化指数、湿润指数、植被指数、植被覆盖度和降水利用率等指标的时空变化特征, 并与气候因子、地形因子等进行了相关性分析^[5-8]。

降水利用率(rainfall utilization efficiency, RUE)是净初级生产力(net primary productivity, NPP)与降水量的比值, 用来反映植被生长与耗水特性之间的关系, 同时干旱、半干旱地区的植被生产力与降水量具有密切的关系, 因此, RUE 的变化对干旱、半干旱地区荒漠草原生态系统的健康具有显著的指示作用, 能科学地反映沙漠化的演变特征^[8-12]。该研究利

用 2001—2018 年生长季 4—10 月的 MODIS NDVI 数据和气象站点逐日降水量数据, 通过计算各年相对降水利用率来反演内蒙古风蚀区的沙漠化演变情况, 科学评价内蒙古风蚀区的生态环境, 以期内蒙古风蚀区沙漠化监测预警及治理工作提供数据及理论支持。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 内蒙古自治区(37°24'~53°23'N, 97°12'~126°04'E)是我国北部重要的生态屏障, 纬度偏高, 经度范围跨度较大(图 1), 自东向西表现出极强的经度地带性, 植被类型相应表现为温带森林、温带草原和温带荒漠。为更加科学准确地研究内蒙古沙漠化的演变特征, 该研究将内蒙古境内的无土壤风蚀发生的温带森林区去除, 将剩余易发生风蚀的温带草原区、温带荒漠区作为研究区, 综合研究该区域的土地沙漠化演变情况。

内蒙古风蚀区约占全国面积的 1/10, 是气候变化的敏感脆弱区, 也是易发生沙漠化的典型地区^[13]。该区地势较高, 平均海拔在 1 000 m 左右, 有大小河流千余条, 大小湖泊近千个。主要气候类型为温带大陆性气候, 冬春漫长, 干寒多风沙; 夏季短促, 雨热同期, 日照充足, 风能资源丰富。在脆弱的自然环境和以畜牧业为主的国民经济影响下, 该区土地沙漠化的形势较为严峻。

1.2 数据源及预处理 该研究采用的遥感影像选自 NASA/MODIS 系列数据的 MOD13Q1 植被指数数据集(来源: <https://modis.gsfc.nasa.gov>), 下载了 2001—2018 年生长季 4—

基金项目 国家自然科学基金项目(41701005); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810451006)。

作者简介 泉涛(1998—), 男, 山东商河人, 从事沙漠化、植被遥感研究。

*通信作者, 副教授, 博士, 从事沙漠化、植被遥感研究。

收稿日期 2020-09-02; **修回日期** 2020-09-23

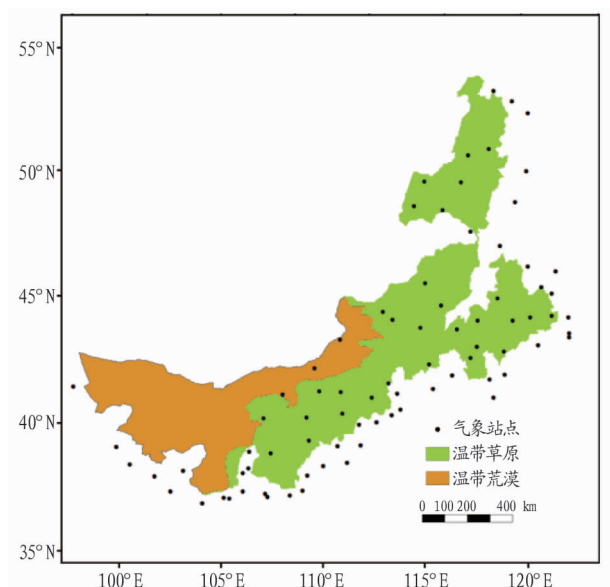


图1 内蒙古风蚀区地理位置及周边气象站点分布

Fig.1 The geographical location of the wind erosion area in Inner Mongolia and the distribution of surrounding meteorological stations

10月覆盖内蒙古风蚀区的6个瓦片(h25v03、h25v04、h25v05、h26v04、h26v05、h27v04)的影像,共1428景。利用MRT(MODIS reprojection tool)对同期数据进行拼接、投影,并提取出各年NDVI数据。在ENVI软件中利用最大值合成法计算各年各像元的NDVI最大值,作为计算RUE的基础数据。采用的气象数据为中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中的降水量数据(来源: <http://data.cma.cn>)。利用Excel软件筛选出内蒙古风蚀区及周边共80个气象站点的数据,计算出各年生长季的月平均降水量,并在ArcGIS软件中进行克里金插值,得到2001—2018年生长季内蒙古风蚀区空间分辨率250 m(与遥感影像保持一致)的月降水量的栅格图像。

1.3 研究方法

1.3.1 相对降水利用率。姬盼盼等^[14]研究表明,在干旱、半干旱地区NDVI对NPP的作用相对较强;林志东等^[15]研究指出在自然状态下NDVI与NPP的相关系数较高。因此该研究用NDVI替代NPP与降水量(P)求商来计算RUE,计算公式如下:

$$RUE = \frac{NDVI}{P} \quad (1)$$

由于RUE在数学意义上仅反映2个指数的比值关系,因此当研究大范围地区沙漠化演变情况时,在降水量较少的干旱地区,会出现2个指数均较低但RUE值反而高的现象,故对研究区内RUE数据进行频率统计,以[5%,95%]为置信区间,分别求出各年潜在降水利用率最值 RUE_{min} 和 RUE_{max} ,进而计算研究区各年的相对降水利用率(RUE_r),计算公式如下:

$$RUE_r = \frac{RUE - RUE_{min}}{RUE_{max} - RUE_{min}} \quad (2)$$

RUE_r 在一定程度上消除了降水带来的影响,其值反映了该地区内自然植被的相对状态。同时,年平均相对降水利用率 RUE_{mer} 可反映该土地长期的生产能力,年极大相对降水利用率 RUE_{exr} 可反映该土地受到破坏后的恢复弹力,且潜在RUE的最值是根据RUE的概率分布的5%和95%分位数确定的, RUE_r 的计算结果会超出0~1的范围,因此可根据 RUE_r 的数值来评价土地生产力^[16],计算公式如下:

$$RUE_{mer} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$RUE_{exr} = x_i \quad (4)$$

式中, n 为年份总数,即 n 为18; x_i 为第 i 年的 RUE_r ; x_i 为2001—2018年NDVI值最大的年份对应的 RUE_r 。

1.3.2 趋势分析方法。用一元线性回归方程的斜率slope来分析 RUE_r 的年际变化趋势,以此来分析内蒙古风蚀区沙漠化的年际变化特征。若 $slope > 0$,说明 RUE_r 呈增加趋势,植被呈恢复状态,沙漠化形势转好; $slope = 0$,说明 RUE_r 保持不变; $slope < 0$,说明 RUE_r 呈下降趋势,植被呈退化状态,沙漠化形势加剧。计算公式如下:

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中, n 为年份总数,即 n 为18; i 为1~18的年序号; x_i 为第 i 年的 RUE_r 。

1.3.3 变异系数。变异系数(CV)是反映一组单个观测数中各观测量变化程度的统计量,也是反映时间和空间变异程度的重要指标,数值越大说明其变异程度越大。为进一步分析研究区沙漠化发展的稳定程度,该研究计算了研究区内 RUE_r 的变异系数,并将其划分为非常稳定($CV \leq 0.15$)、稳定($0.15 < CV \leq 0.30$)、脆弱($0.30 < CV \leq 0.45$)、非常脆弱($CV > 0.45$)共4个等级。计算公式如下:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \quad (6)$$

式中, n 为年份总数,即 n 为18; x_i 为第 i 年的 RUE_r ; $\bar{x}$ 为 RUE_{mer} 。

2 结果与分析

2.1 内蒙古风蚀区沙漠化程度时间变化特征 由内蒙古风蚀区2001—2018年生长季月平均降水量年际变化趋势(图2)可知,18年间内蒙古风蚀区内降水量呈增加趋势。研究区内生长季月平均降水量的平均值为379.64 mm,最大值出现在2018年,为509.18 mm,最低值出现在2005年,为294.64 mm。从生长季月降水量的距平值变化来看,2001、2004、2005、2006、2007、2009、2010、2011、2015年呈现出负距平,其余年份均呈现出正距平。

由于降水量存在很大的年际变化,仅计算年际比例不足以达到沙漠化监测的预期效果,因此以时间为自变量, RUE_r 为因变量,对时间序列 RUE_r 进行线性回归分析,其回归斜率主要取决于NDVI与降水量的相关性,斜率为正,表明植被

正在恢复,斜率为负,表明植被正在退化,以此来监测长期以来植被对降水的响应。

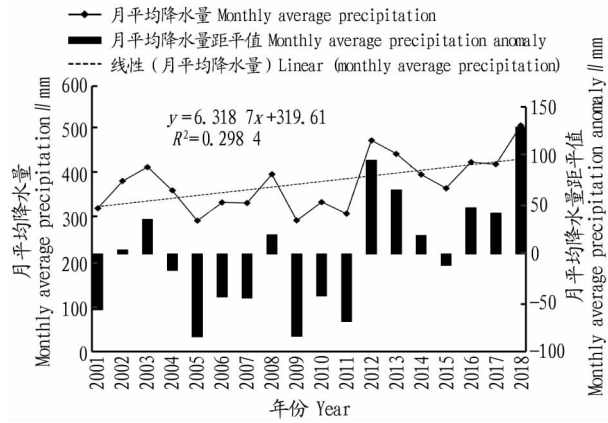


图2 2001—2018年内蒙古风蚀区生长季月平均降水量年际变化

Fig.2 Interannual variation of monthly average precipitation in the growing season in Inner Mongolia from 2001 to 2018

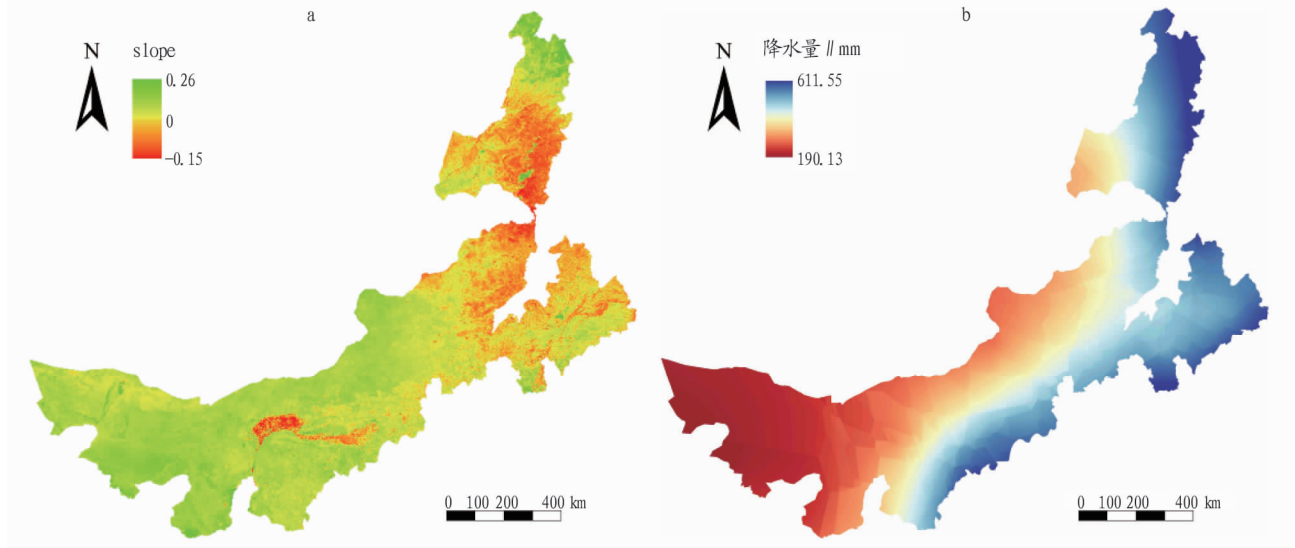


图3 2001—2018年内蒙古风蚀区相对降水利用率回归斜率(a)及生长季月平均降水量(b)空间分布

Fig.3 The spatial distribution of the regression slope of RUE_r (a) and the monthly average precipitation in the growing season (b) in the wind erosion area of Inner Mongolia from 2001 to 2018

城市地区,因此降水对沙漠化的影响作用减弱,人类活动成为导致植被退化、加剧沙漠化的主导因素。

2.2 内蒙古风蚀区沙漠化程度空间分布特征 由内蒙古风蚀区 2001—2018 年 RUE_{mer} 和 RUE_{exr} 空间分布(图 4)可知,2001—2018 年大兴安岭周围地区以及河套平原地区为 RUE_{mer} 值较高的地区,具有较好的生产能力,东部的呼伦贝尔草原、科尔沁草原次之,西部阿拉善盟地区为 RUE_{mer} 值较低的地区,部分地区不具备生产能力; RUE_{exr} 值与 RUE_{mer} 值的分布大致相同,其差异在于呼伦贝尔草原、科尔沁草原属于较高地区,具备较好的恢复弹力,而中部地区属于较低区域,恢复弹力较差。

沙漠化作为土地退化的一种形式,其发展程度可以通过土地生产力的评价结果来反演。根据李春娥等^[16-17]的研究,对研究区的土地生产力进行等级划分,并通过土地生产力的

从内蒙古风蚀区 2001—2018 年相对降水利用率的回归斜率及生长季月平均降水量的空间分布(图 3)可看出,研究区内 RUE_r 的回归斜率具有明显的空间差异性,大致表现为由东部向西部逐渐递增,其值在 $-0.15 \sim 0.26$,平均为 -0.01 ,表现为微弱的下降趋势,说明植被有退化现象,沙漠化形势在日趋加重,需予以重视。从 RUE_r 时空趋势来看,全区内大部分地区 RUE_r 呈增加趋势,面积为 62.02 万 km^2 ,占全区面积的 62.98%,集中分布在内蒙古中西部地区;该地区植被类型主要为温带草原及温带荒漠,大陆性气候显著,冬季严寒,夏季炎热,气温日较差及年较差较大,日照充足,阿拉善高原的西部地区日照时间更可达 3 400 h 以上,多风沙天气,降水稀少,地表径流不发育,因此降水是影响该地区沙漠化的主导因素。此外,还有 37.02% 的地区 RUE_r 呈下降趋势,面积为 36.46 万 km^2 ,主要分布在东部大兴安岭周围地区以及中部的河套平原地区,前者植被类型主要为温带草原,季风性气候显著,降水较中西部地区明显增多,后者为经济发展迅速的

评价结果来划分出不同等级的沙漠化程度(图 5):①当 RUE_{mer} 和 RUE_{exr} 均小于 0 时,表明该区域既没有生产能力,又不具备恢复弹力,属于重度沙漠化地区。该类土地面积为 1.72 万 km^2 ,占全区面积的 1.75%,主要集中在内蒙古西北部与蒙古国接壤的戈壁地带,该地区长期处于低植被覆盖状态,生态环境恶劣。②当 $RUE_{mer} < 0$ 且 $0 < RUE_{exr} < 1$ 或 $0 < RUE_{mer} < 1$ 且 $RUE_{exr} < 0$ 时,表明该区域没有生产能力但具备一定的恢复弹力,或仅有一定的生产能力却不具备恢复弹力,属于中度沙漠化地区。该类土地面积为 3.03 万 km^2 ,占全区面积的 3.08%,主要分布在包头市南部、鄂尔多斯市东部以及呼和浩特市西部等地区。③当 RUE_{mer} 和 RUE_{exr} 均在 0~1 时,表明该区域的生产能力和恢复弹力均处于正常水平,属于轻度沙漠化地区。该类土地面积为 87.74 万 km^2 ,占全区面积的 89.09%,由于 RUE_r 计算中大部分像元都是在潜

在降水利用率最值之间,因此该结果与预想的结果基本一致,但也因为各地的气温、降水、地形等自然条件的不同,这类地区表现为不同的植被类型,中东部地区主要表现为温带草原,主要有呼伦贝尔草原、科尔沁草原、锡林郭勒草原、乌兰察布草原等,西部地区主要表现为温带荒漠,主要有巴丹

吉林沙漠、库布齐沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地等。④当 $RUE_{mer}>1$ 或 $RUE_{exr}>1$ 时,表示该区域具备较好的生产能力或恢复弹力,属于非沙漠化地区。该类土地面积为 5.99 万 km^2 ,占全区面积的 6.08%,零星分布于研究区。

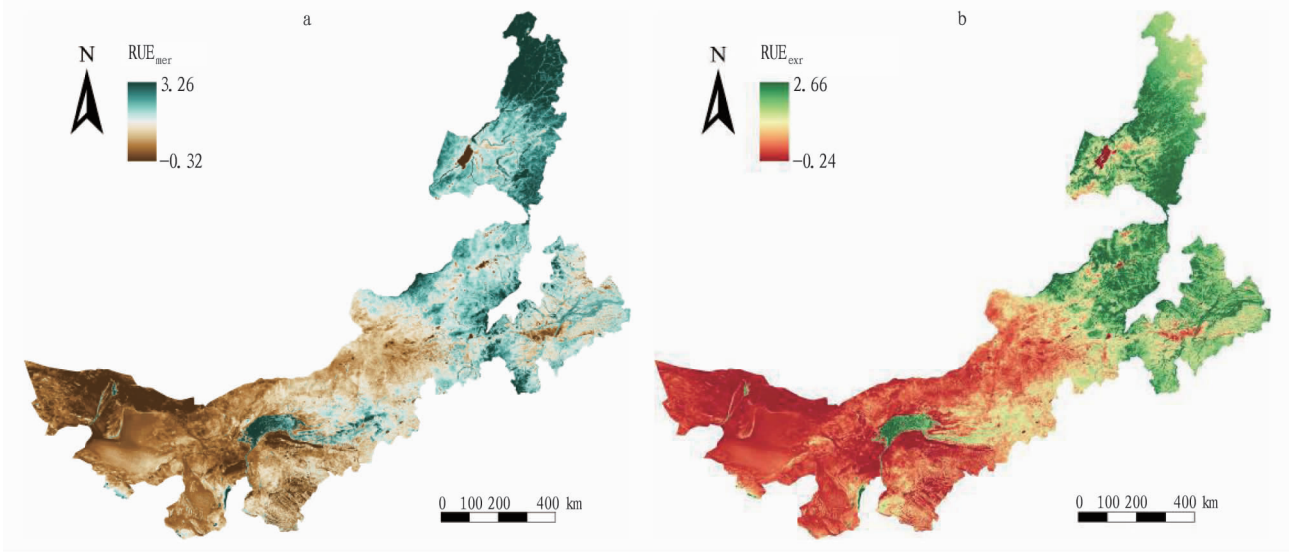


图 4 2001—2018 年内蒙古风蚀区 RUE_{mer} (a) 和 RUE_{exr} (b) 空间分布

Fig.4 The spatial distribution of RUE_{mer} (a) and RUE_{exr} (b) in the wind erosion area of Inner Mongolia from 2001 to 2018

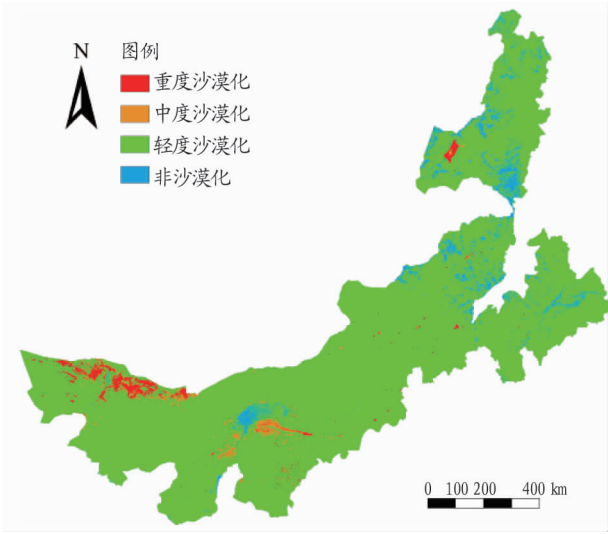


图 5 2001—2018 年内蒙古风蚀区沙漠化程度空间分布

Fig.5 Spatial pattern of desertification degree in wind erosion area of Inner Mongolia from 2001 to 2018

2.3 内蒙古风蚀区沙漠化稳定性分析 为进一步研究内蒙古风蚀区内沙漠化的演变情况,分析其稳定程度,该研究逐像元计算了研究区内 RUE_t 的变异系数 CV,并进行等级划分,结果表明,研究区内 RUE_t 的变异程度较大(图 6)。

非常稳定地区面积为 1.94 万 km^2 ,占全区面积的 1.97%,其分布与重度沙漠化地区大致相同,主要为内蒙古西部植被覆盖度极低、不具备生产能力的戈壁地区。

稳定地区和脆弱地区面积分别为 9.97 万、25.99 万 km^2 ,分别占全区面积的 10.13%、26.39%,两者交错分布于内蒙古

风蚀区的东部地区,该地区主要植被类型为温带草原,锡林郭勒草原、乌兰察布草原等分布于此,植被覆盖度相对较高,加之近年来退耕还草的落实与普及,该地区沙漠化形势有了一定的控制。

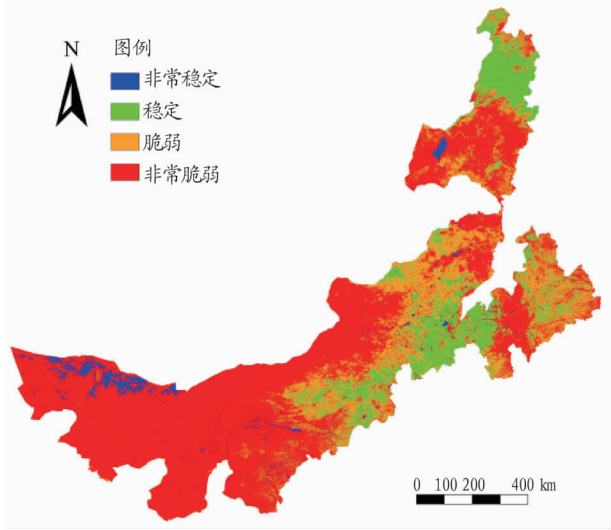


图 6 2001—2018 年内蒙古风蚀区沙漠化稳定性等级分布

Fig.6 Desertification stability grade distribution in wind erosion area of Inner Mongolia from 2001 to 2018

非常脆弱地区占据研究区大部分地区,再次表明研究区内土地沙漠化形势严峻,这类地区面积为 60.58 万 km^2 ,占全区面积的 61.51%,主要分布在中西部温带荒漠区,主要有巴丹吉林沙漠、库布齐沙漠、乌兰布和沙漠、毛乌素沙地等,该地区植被覆盖较低,沙漠化形势严峻,但 RUE_t 有增加趋势。

此外,还有少数分布在东部的呼伦贝尔沙地和科尔沁沙地,该地区虽然植被覆盖较高,但 RUE_r 有下降趋势,需要引起重视,及时采取措施。

整体而言,内蒙古风蚀区 18 年间有 87.91% 的地区 RUE_r 变化较大,表现为脆弱到非常脆弱,仅有 12.09% 的地区表现为稳定到非常稳定。

3 结论

该研究通过计算内蒙古风蚀区 2001—2018 年生长季 4—10 月的相对降水利用率,分析其时间变化、空间分布及变异系数,综合评价了 18 年间内蒙古风蚀区的沙漠化演变情况,得出以下结论:

(1) 整体上内蒙古风蚀区沙漠化呈现出微弱的加重趋势,其空间分布上具有地域差异性,中西部地区 RUE_r 的斜率为正,植被呈恢复状态,降水为影响沙漠化的主导因素;东部地区斜率为负,植被出现退化现象,人类活动为影响沙漠化的主导因素。

(2) 从沙漠化程度空间分布来看,研究区内 89.09% 的地区为轻度沙漠化,重度沙漠化地区集中在内蒙古西北部,中度沙漠化和非沙漠化地区在研究区内零星分布。

(3) 18 年间内蒙古风蚀区的沙漠化变异程度较大,87.91% 的地区表现为脆弱到非常脆弱,仅有 12.09% 的地区表现为稳定到非常稳定。

参考文献

- [1] 郭端霞,管晓丹,张艳婷.我国荒漠化主要研究进展[J].干旱气象,2015,33(3):505-513.
- [2] 孙浩然,赵志根.基于 SPOT NDVI 数据的内蒙古地区土地退化监测研

究[J].黑龙江工程学院学报,2019,33(3):30-34.

- [3] 要永在.内蒙古荒漠化驱动力及水土保持研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(2):13-17,87.
- [4] 李亚云,杨秀春,朱晓华,等.遥感技术在中国土地荒漠化监测中的应用进展[J].地理科学进展,2009,28(1):55-62.
- [5] 陈宝瑞,辛晓平,朱玉霞,等.内蒙古荒漠化年际动态变化及与气候因子分析[J].遥感信息,2007,22(6):39-44,104.
- [6] 朱玉霞,覃志豪,徐斌.基于 MODIS 数据的草原荒漠化年际动态变化研究:以内蒙古自治区为例[J].中国草地学报,2007,29(4):2-8.
- [7] 李云鹏,那日苏,乌日娜,等.内蒙古草原荒漠化遥感监测分析[J].中国草地学报,2011,33(3):79-86.
- [8] 殷贺,李正国,王仰麟,等.基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价[J].地理学报,2011,66(5):653-661.
- [9] 殷贺,李正国,王仰麟.荒漠化评价研究进展[J].植物生态学报,2011,35(3):345-352.
- [10] LAUENROTH W K, BURKE I C, PARUELO J M. Patterns of production and precipitation-use efficiency of winter wheat and native grasslands in the central great plains of the United States[J]. Ecosystems, 2000, 3(4): 344-351.
- [11] PARUELO J M, LAUENROTH W K, BURKE I C, et al. Grassland precipitation-use efficiency varies across a resource gradient[J]. Ecosystems, 1999, 2(1):64-68.
- [12] VARNAMKHAHI A S, MILCHUNAS D G, LAUENROTH W K, et al. Production and rain use efficiency in short-grass steppe: Grazing history, defoliation and water resource[J]. Journal of vegetation science, 1995, 6(6):787-796.
- [13] 孙艳玲,郭鹏,延晓冬,等.内蒙古植被覆盖变化及其与气候、人类活动的关系[J].自然资源学报,2010,25(3):407-414.
- [14] 姬盼盼,高敏华,付晓红,等.中国西北半干旱区净初级生产力驱动因子空间计算分析[J].生态学报,2019,39(24):9023-9032.
- [15] 林志东,武国胜.基于 MODIS 的大田县均溪谷地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征[J].亚热带资源与环境学报,2015,10(1):27-33.
- [16] 李春娥.新疆土地荒漠化时空变化特征分析[J].测绘科学,2018,43(9):33-39.
- [17] 王红岩.基于 NPP 和植被降水利用效率土地退化遥感评价与监测技术研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013:82-85.

(上接第 71 页)

自然农法创始人福冈正信将秸秆还田视为一场革命,连续数十年全量覆盖还田,实现了免用化肥农药的自然栽培^[7]。

21 世纪以来,我国各地借鉴日本自然农法经验的具体事例还有很多。以上所举为江苏省扬州市农业科学研究院对日本自然农法中免耕栽培和秸秆覆盖技术的借鉴与实践。从实施效果来看,自然农法起到了培肥地力、节本增收的重要作用。但是也同时发现相关技术在实际应用和推广过程中存在的问题,主要表现为稻田杂草问题和病虫害防治问题^[13]。为了解决相关问题,我国相关农业科研院所已进一步借鉴日本自然农法中“以草制草(利用三叶草防治杂草),以虫制虫(利用天敌防治害虫)”的相关措施并展开了一系列的农学试验。事实上除江苏省外,山东、浙江、江西、海南等省份也都相继建立起了自然农法示范基地,积极开展从稻田到果园的自然农法试验活动^[15]。相比日本,国内相关研究活动仍处于初级阶段,在未来较长一段时期内仍需向日本等发达国家学习、借鉴自然农法的先进经验,通过大量试验研究哪些技术需要经过本土化改造,而哪些措施可以直接引入并服务于我国当前的生态农业建设。

参考文献

- [1] 米来速水.世界自然农法[M].黄细喜,顾克礼,译.北京:中国环境科学

出版社,1990:64.

- [2] 竹熊宜孝.来自土地的医疗[M].东京:柏木社,1980:5-10.
- [3] 日本农山渔村文化协会专务理事坂本尚先生访问农业遗产室纪要[J].中国农史,1987(4):134.
- [4] 自然农法国际研究开发中心.自然农法的稻作[M].东京:农文社,1990:23.
- [5] 简嘉颖.日本自然农法和有机农业的流派与发展[EB/OL].(2017-12-11)[2020-04-20].https://www.sohu.com/a/209839189_684253.
- [6] 福冈正信.自然农法:绿色哲学的理论与实践[M].哈尔滨:黑龙江人民出版社,1987:103.
- [7] 顾克礼.自然农法[M].北京:中国环境出版社,2016:74-75,90.
- [8] 農林水産省.環境保全型農業をめぐる事情[EB/OL].(2016-10-05)[2020-04-20].http://www.env.go.jp/council/09water/y0917-03/mat02.pdf.
- [9] 李瑾,王植,陆安祥,等.“食”与“绿”——日本自然农法的做法与启示[J].安徽农业科学,2018,46(10):223-226.
- [10] 汪明,顾克礼.论中国特色自然农法——汪明论文书信集[M].北京:中国环境科学出版社,2002:90.
- [11] 马健,韩星焕.日本协同推进环境保全型农业的举措及对我国的启示[J].西北农林科技大学学报(社会科学版),2017,17(4):99-105.
- [12] 郭勋斌,顾克礼,季宏,等.低碳节水稻作“麦(油)套稻”高产稳产技术研究与实践[J].科技创新导报,2013(36):12-13.
- [13] 许斯珩.低碳稻作技术的生态经济评价及扩散研究:以江苏省超高茬麦田套稻技术为例[D].扬州:扬州大学,2015:15,25.
- [14] 任继勤.秸秆生物质能利用对节能减排的贡献潜力研究[J].北京交通大学学报(社会科学版),2018,17(4):79-87.
- [15] 周春祥,刘桂英.自然农法对发展中国现代农业的借鉴意义[J].安徽农业科学,2008,36(33):14801-14803.