

基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价

殷 贺¹, 李正国^{1,2}, 王仰麟¹, 蔡 福³

(1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871;

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

3. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016)

摘要:荒漠化是中国北方干旱、半干旱地区面临的主要生态环境问题。从植被特征着手, 关注其年际动态变化特征, 已经成为国内外荒漠化评价的发展趋势。选取遥感反演的高时间分辨率的植被降水利用率作为评价指标, 利用时间序列分析方法, 评价了内蒙古自治区1999-2009年的荒漠化发展态势, 并对荒漠化逆转问题进行了初步讨论。结果表明: 内蒙古自治区11年来生态环境总体趋于改善, 荒漠化发展态势并不明显。其中, 鄂尔多斯高原的东部至大青山南麓、大兴安岭及燕山北部余脉是内蒙古自治区生态环境改善最为明显的地区, 反映出该区的植被保护政策发挥了积极的作用; 荒漠化土地空间分异特征表明, 降水因子和植被恢复有着密切的联系, 300 mm以上降水量的地区, 其植被恢复能力要明显大于降水稀少的地区; 干旱、极干旱地区的荒漠界限极不稳定, 对荒漠化是否逆转的判断必须在特定的时间尺度, 结合当年的气候条件进行综合分析。

关键词:荒漠化评价; 植被动态; 植被降水利用率; 荒漠化逆转; 内蒙古

1 引言

荒漠化是发生在干旱、半干旱、半湿润地区的土地退化现象, 是一种连续的、动态发展的土地退化过程^[1]。我国是世界上受荒漠化危害最严重的国家之一。据估算, 荒漠化给我国每年造成的直接经济损失达540亿元, 而间接经济损失是直接经济损失的2~8倍, 甚至达到10倍以上^[2]。荒漠化给我国造成的生态环境问题主要表现在以下4个方面: ①破坏生态环境, 威胁人类生存; ②破坏土地资源, 降低农牧业生产能力; ③破坏交通、水利等国家基础设施; ④降低物种多样性, 对生物多样性构成显著威胁等^[3]。因此, 从区域尺度着手, 开展荒漠化评价, 对于维护我国区域生态安全、保障社会经济发展具有关键的作用。

作为土地重要的构成因素, 植被既是土地资源质量的代表, 又是其综合特征的反映, 并可指示出土地演替的方向^[4]。在区域尺度内, 监测植被信息的年际变化特征不仅能够清楚地反映荒漠化的发展态势^[5], 而且更具有现时性和可操作性, 能够迅速快捷地对土地生产能力进行有效表征^[6-7]。因此, 植被是区域尺度荒漠化评价的研究主体, 是生物类型区生态环境质量的综合表征, 综合分析植被结构和功能时间序列的动态特征, 对于研究干旱区、半干旱区荒漠化发生、发展过程具有重要的理论和现实意义。

内蒙古自治区位于我国北部边疆 (37°24'~53°23'N, 97°12'~126°04'E), 全区的总面积为

收稿日期: 2010-10-19; 修订日期: 2011-02-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2010CB951502); 国家自然科学基金重点项目 (40930101); 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD20B07) [Foundation: National Basic Research Program of China (973 Program), No.2010CB951502; Key Program of National Natural Science Foundation of China, No.40930101; National Key Technologies R & D Program of China, No.2006BAD20B07]

作者简介: 殷贺 (1985-), 男, 山东微山人, 理学硕士, 主要从事土地利用及景观生态学方面的研究。

E-mail: hyinhe@gmail.com

通讯作者: 李正国, E-mail: lzg.123@263.net

118.3 万 km^2 , 居全国第 3 位。内蒙古草原是全球典型的中纬度半干旱温带草原生态类型, 位于 IGBP 全球变化研究典型陆地样带中国东北陆地样带之内, 是全球变化最为敏感的区域之一。然而, 近几十年来, 由于受气候变化与人为活动的影响, 内蒙古自治区已成为我国荒漠化土地面积最多的省区之一, 达 62.2 万 km^2 ^[8], 导致草原退化、土地沙化以及旱灾和沙尘暴频发等生态环境问题日趋严重。因此, 本文通过采用时间序列分析法, 评价内蒙古自治区近 11 年荒漠化发生态势及空间分异特征, 并针对荒漠化逆转问题进行讨论, 以期为内蒙古自治区荒漠化防治提供科学依据。

2 研究方法与分析

2.1 指标选取

荒漠化作为一种土地退化过程, 其实质是土地生产力下降。遵循区域主导性、数据可得性和科学有效性等原则, 本文选取植被降水利用率作为荒漠化评价的指标。植被降水利用率 (Rain Use Efficiency, RUE) 是植被初级生产力与降水的比值, 是基于植被水分利用效率提出的一个概念。RUE 值的下降说明植被将水分 (以及营养物质) 转换为生物量能力的下降, 这种植被的退化过程可能是由多种因素造成的, 如植被的丧失、可利用土壤养分的下降或者是表土的硬化导致地表径流的增加^[9]。

RUE 用作荒漠化评价的理论基础是, 干旱区、半干旱区的植被净初级第一生产力主要受降水因子的影响。干旱区、半干旱区的降水量以及土壤有效湿度和植被的生产能力具有很高的相关性^[10]。只有当降水总量超过一定程度后, 其它因子 (例如, 土壤养分或者是光合辐射) 才会对植被净初级第一生产力产生重要影响。因此, 降水可以看作是潜在生产力的替代因子, 这是 RUE 能够反映荒漠化实际状况的一个重要前提^[11]。国内外相关研究成果已经证实, RUE 能够综合反映区域尺度土地生产能力的变异状况, 从而有效地表征荒漠化发展态势^[12-13]。因此, 选取以栅格作为数据单元的 RUE 更能体现区域尺度荒漠化的空间差异性, 使得不同景观类型, 不同退化程度土地的动态功能变化比较成为可能; 其次, 选取遥感反演的 RUE 可以准确、快捷地对区域荒漠化发展态势进行有效评价; 第三, RUE 更侧重于植被的真实生产能力, 其变化程度充分反映了植被功能的强弱大小, 进而对荒漠化的实际发生情况作出有效判断^[14]。

2.2 数据来源

本文数据来源主要包括: ① 以 TM/ETM 卫星影像为主要数据源解译的 2000 年 1:100 万全国土地利用图^[15]; ② 植被特征遥感反演选用的数据是比利时佛莱芒技术研究所 (VITO) 提供的从 1998 年 4 月至 2009 年 12 月的逐旬 SPOT/VGT NDVI 影像, 共计 423 幅 (<http://free.vgt.vito.be/>); ③ 数字高程模型 (DEM) 采用美国地质调查局 (USGS) 提供的 GTOPO30 DEM, 空间分辨率为 1 km; ④ 气象数据为中国国家气象局提供的 1999-2009 年全国气象站点逐月平均降水数据集 (<http://cdc.cma.gov.cn/>), 选取内蒙古及周边省份、自治区共计 123 个气象站点。

2.3 数据处理

2.3.1 NDVI 时间序列重构 由于受传感器以及大气因素的影响, 原始 NDVI 时间序列会出现一些奇异值, 可能是极大值或极小值, 表现为 NDVI 时间序列的突降或针尖状突峰。奇异值的出现会影响到时间序列的精度。因此, 需要对 NDVI 时间序列进行预处理, 消除奇异值对 NDVI 曲线的影响。本文采用基于最小二乘法的不对称高斯函数 (A-G 滤波) 作为 NDVI 平滑函数, 该滤波是建立在植物的生长季是具有周期特征的前提下^[16], 与其它拟合函数 (例如, Savitzky-Golay 滤波) 相比, A-G 滤波具有更多灵活性, 使得重建的 NDVI 曲线能够更好的描述 NDVI 时序数据中复杂的和微小的变化^[17]。A-G 滤波的函数表达式为:

$$g(t; x_1, x_2, \dots, x_5) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{t - t_1}{x_2}\right)^{x_3}\right] & \text{if } t > x_1 \\ \exp\left[-\left(\frac{t_1 - t}{x_4}\right)^{x_5}\right] & \text{if } t < x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_1 为高斯函数分段的拐点,决定了独立时间变量 t 需要分段计算的最大值或最小值; x_2 和 x_3 分别为右段高斯函数的基部宽度和陡峭度; x_4 和 x_5 为左段高斯函数的基部宽度和陡峭度。

2.3.2 RUE反演 为简便计算并避免植被净初级生产力模拟所产生的误差,本文采用月累计NDVI值替代该月净初级生产力^[10]。气象数据的获取多数通过气象观测站点的实际测量值获得,但由于气象站点在空间呈点状分布,因此要获取整个区域在面上的气象要素分布情况则只能通过已知站点进行插值来实现。本文采用区域薄盘光滑样条函数,对内蒙古自治区及其周边区域共计123个站点的1999-2009年逐月降水数据进行空间插值。

区域薄盘光滑样条法是对薄盘光滑样条模型的扩展,除普通的样条自变量外允许引入线性协变量子模型,如温度与海拔、降水与海岸线之间的相关关系。其理论统计模型为:

$$z_i = f(x_i + b^T y_i + e_i) \quad (i = 1, \dots, N) \quad (2)$$

式中: z_i 为空间 i 点的因变量; x_i 为 d 维样条独立变量; f 为需要估算的关于 x_i 的未知光滑函数; y_i 为 p 维独立协变量; b 为 y_i 的 p 维系数; e_i 为具有期望值为0且方差为 $w_i\sigma^2$ 的自变量随机误差,其中 w_i 为作为权重的已知局部相对变异系数, σ^2 为误差方差,在所有数据点上为常数。函数 f 和系数 b 可通过(3)式的最小化确定,即最小二乘法估计确定:

$$\sum_{i=1}^N \left[\frac{Z_i - f(x_i) - b^T y_i}{w_i} \right]^2 + \rho J_m(f) \quad (3)$$

式中: $J_m(f)$ 为函数 $f(x_i)$ 的粗糙度测度函数; m 为样条次数,也叫粗糙次数; ρ 为正的光滑参数,在数据保真度与曲面的粗糙度之间起平衡作用,本文采用广义交叉验证(GCV)的最小化来确定。

1999-2009年逐月植被净初级第一生产力除以当月降水量,计算得出内蒙古自治区1999-2009年逐月RUE,计算公式为:

$$RUE = NPP/P \quad (4)$$

式中: RUE 为月植被降水利用效率; NPP 为月累计NDVI值; P 为年降水量。

2.3.3 时间序列分析 在水文学和气象学中,Mann-Kendall检验(MK检验)是比较常用的时间序列趋势检验方法之一^[18]。MK检验不需要样本遵从一定的分布,能够将少数异常值剔除,适用于非正态分布的数据。

Seasonal Kendall检验(SK检验)是MK检验应用在具有周期性变化时间序列的一种特殊情况^[19],其目的在于确定数据集 $X = (X_1, \dots, X_{12})$ 和 $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{in})$ 的随机变化程度,其中 X 为任意栅格 n 年所有月份数据。SK检验也可以理解为MK检验对每个月份时间序列检验的集合,更适宜应用于具有周期性变化的时间序列趋势检测中^[20]。

为了进一步定量计算时间序列变化趋势的量级,本文计算了1999-2009年132幅逐月RUE影像的Sen氏斜率(Sen's Slope)。与基于最小二乘法拟合的线性趋势相比,Sen氏斜率能够避免时间序列数据缺失以及数据分布形态对分析结果的影响,并且能够剔除异常值对时间序列的干扰。因此,在时间序列的趋势分析中具有更优越的表现。Sen氏斜率的计算公式为:

$$Q = \text{median} \frac{(X_j - X_i)}{j - i} \quad 1 < i < j < n \quad (5)$$

式中： Q 为Sen氏斜率； X_j 和 X_i 分为 j 时刻和 i 时刻的序列值。
如果时间序列长度 n 为奇数值，则会有 $N = n(n - 1)/2$ 个 Q_i ，最终的 Q 由 N 来决定：

$$Q = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]} & N \text{ 是奇数} \\ (Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]})/2 & N \text{ 是偶数} \end{cases} \tag{6}$$

通过对Sen氏斜率的SK检验，可以计算出置信区间内的斜率值范围：

$$M_1 = \frac{N' - C_\alpha}{2}$$
$$M_2 = \frac{N' + C_\alpha}{2} \tag{7}$$

式中： $C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \cdot \sqrt{\text{var}(S)}$ ； M_1 和 M_2 分别为在 α 置信度下通过检验的最小和最大斜率值； N' 为 Q_i 的长度； $Z_{1-\alpha/2}$ 为在 α 置信度下的统计值。

3 研究结果

3.1 荒漠化土地空间分布格局

SK 检验结果表明，内蒙古自治区大部分地区 RUE 的线性变化趋势并不显著（图 1）。在置信度水平 0.01~0.1 区间上具有显著变化趋势地区在空间格局上分布比较零散，多散布在置信度水平小于 0.01 变化比较显著的地区周围。而在置信度水平 0.01 以下具有明显变化趋势的地区分布则相对集中，主要分布在以下几个地区：鄂尔多斯高原东部至大青山南麓地区，尤其是伊金霍洛旗和准格尔旗，此区的 RUE 总体上是增长的，可见其生态环境明显改善；大兴安岭地区也有较为集中的显著变化区域，其空间分布格局沿山脉走向呈现东北—西南分布；西辽河平原、燕山北部的努鲁儿虎山西麓以及七老图山地区的 RUE 有比较显著的变化趋势；河套平原至狼山南麓的地区。此外，在内蒙古自治区西部沙漠和戈壁地区也有零星的显著变化地区。

从 RUE 的 Sen 氏斜率空间分布来看，在研究时段内内蒙古自治区 RUE 具有显著变化的

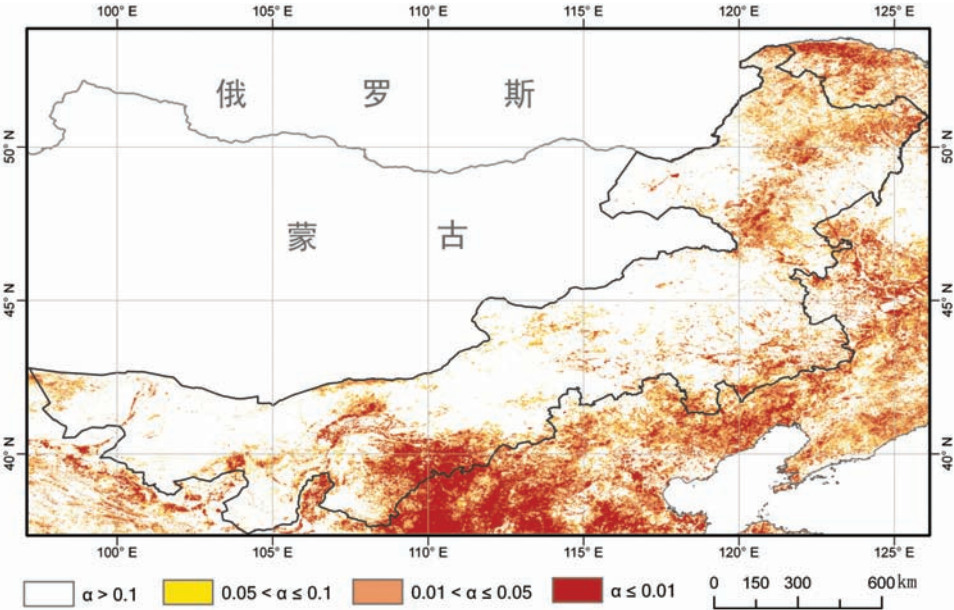


图 1 1999-2009 年内蒙古自治区 RUE 的 SK 检验空间分布

Fig. 1 Spatial pattern of seasonal Kendall test in Inner Mongolia during 1999-2009

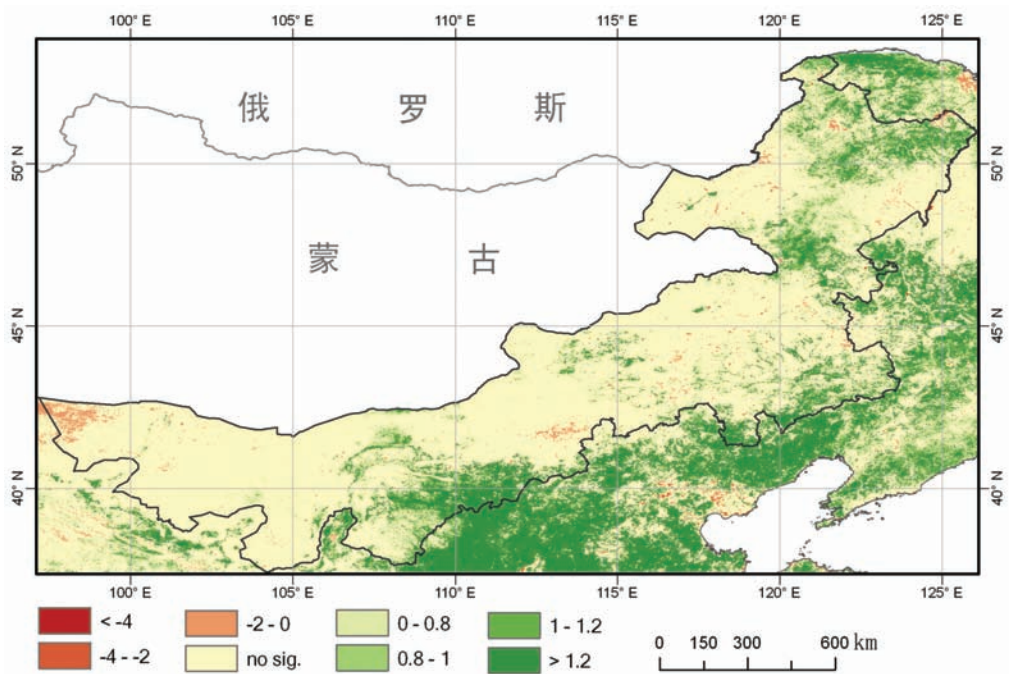
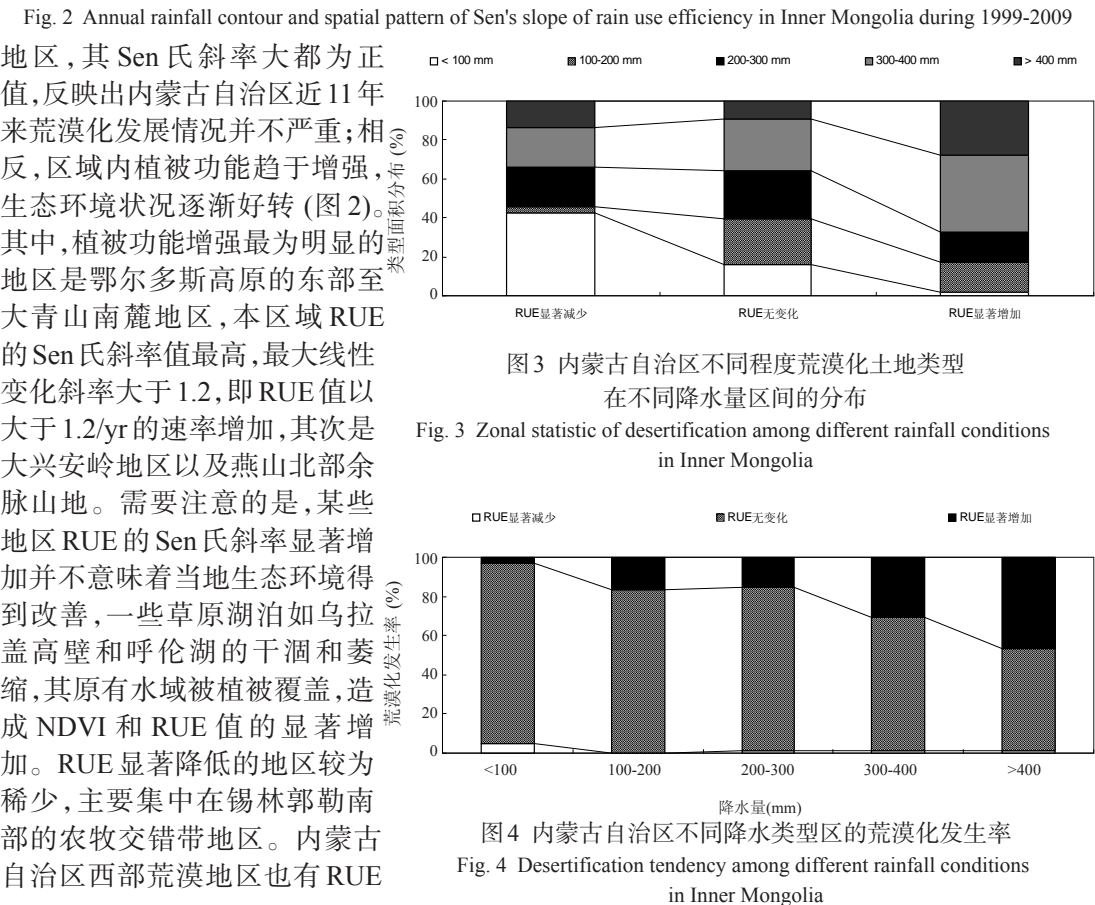


图2 1999-2009年多年平均降水等值线及内蒙古自治区RUE的Sen氏斜率空间分布



显著的地区,但此区域的降水极为稀少(年均 50 mm 以下),其景观类型以荒漠为主,植被覆盖率低,年际降水变异系数较大,其 RUE 值极不稳定。

3.2 荒漠化空间分异特征

从 RUE 变化所属的降水量区间来看,荒漠化发生区域主要分布在年降水量在 100 mm 的地区,占到了荒漠化发生区域总面积的 42.4% (图 3)。RUE 变化趋势为正值,即植被功能趋于增强的区域主要分布在降水条件相对较好的半干旱和半湿润区。其中,降水量在 400~500 mm 之间的 RUE 显著增加的土地占其全部面积的 40%;降水量大于 500 mm 的 RUE 显著增加的土地占其总面积的 27.5%。这反映出降水条件较好的地区,其植被的恢复能力也越强。

从不同降水条件地区的荒漠化易发性来看,年降水量在 100 mm 的地区最易发生荒漠化,其荒漠化土地面积占其总面积的 4.8%;其余降水区间较不易发生荒漠化,荒漠化面积占其自身总面积比例均在 1.5% 以下 (图 4)。植被功能增强最显著的地区则是在降水量大于 500 mm 的地区,植被功能明显增强的区域占其总面积比例约为 46.9%;其次是 400~500 mm 降水区间,所占比例为 30.9%。这同样反映出降水越充沛的地区,植被功能恢复能力也最强。

4 荒漠化逆转的讨论

所谓荒漠化逆转,是指干旱区、半干旱区和半湿润区已经退化成荒漠化的土地重新恢复其生产能力的过程,在地表景观上表现为无植被或少植被覆盖的荒漠重新恢复为较高覆盖的植被。目前,针对荒漠化逆转问题还尚存争议,一些学者认为,荒漠化本身是一种不可逆的发展过程,土地生产力的丧失是一个不可修复的过程,如果将产生荒漠化的关键因子,如干旱或过度放牧去除以后,荒漠化土地是无法恢复到原始状态的。然而,大多数的学者认为荒漠化过程可以逆转,干旱区、半干旱区的植被具有较强的修复能力,在降水增加或人为活动减少的情况下,荒漠化土地有可能减少^[21-22]。本文认为,在区域尺度上,荒漠化过程是可以逆转的;在局地尺度上,土壤结构或微地域环境的破坏可能会导致土地生产能力的永久丧失,荒漠化过程无法逆转。

为了更加真实反映干旱区、半干旱区,尤其是一些沙漠和戈壁边缘地带的荒漠化发展状况,本文通过分析区域植被萌芽事件的发生来监测沙漠的界线,以期进一步加深对极干旱地区荒漠化逆转的进一步认识。所选的区域包括内蒙古自治区的鄂尔多斯市、巴彦淖尔市、乌海市和阿拉善盟。这四个盟市是内蒙古自治区荒漠的主要分布区域,戈壁和沙漠面积广阔,主要分布我国第三大沙漠——巴丹吉林沙漠以及腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠等大片荒漠,是典型的温带荒漠向荒漠草原的过渡地带。当地的年降水在 50~200 mm,自东向西急剧减少,年际变异较大。

本文对植被萌芽事件的判定是基于以下假设条件:如果像元全年的 $NDVI_{max} < 0.116$,则此像元所代表的景观类型为非植被覆盖区;如果全年的 $NDVI_{max} > 0.260$,则此像元为植被覆盖区;由于 NDVI 较受土壤背景的影响,因此将 $NDVI_{max}$ 在 0.116 和 0.260 的像元划为待分区。如果像元同时满足以下两个条件,则将其划分为植被覆盖区。条件 1: NDVI 的最大值出现在 6-9 月之间,即在降水最为丰沛的几个月份之内;条件 2: 4-10 月 NDVI 的标准偏差 > 0.190 ^[5, 23]。

在提取 11 年植被分布区域的基础上,通过叠加分析,获取植被萌芽事件的发生概率图 (图 5)。结果表明,干旱区、半干旱区的沙漠界线具有很强的变化性。总体来看,从荒漠的中心地区到稀疏草地和灌丛,然后逐渐过渡到植被相对茂密的荒漠草原和典型草原,植被生长过的次数也逐渐增加。在广阔分布的沙漠和戈壁的中心地带基本没有监测到有植被的分

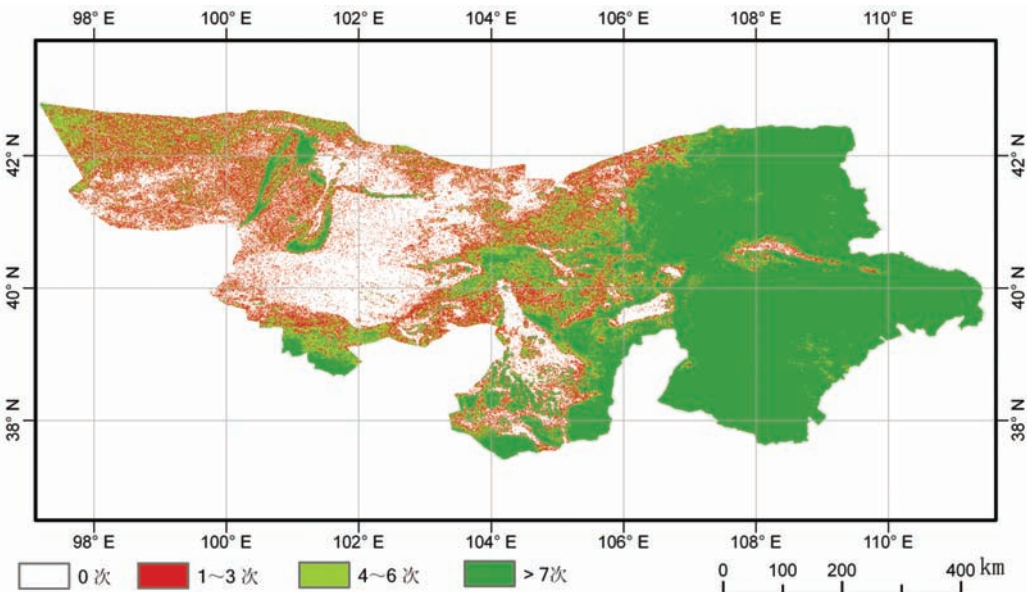


图5 1999-2009年内蒙古自治区西部地区植被生长事件概率

Fig. 5 Frequency of detectable onset of green-up events in Inner Mongolia during 1999-2009

布,而在荒漠中的一些绿洲地区(例如,额济纳绿洲),11年内具有植被生长事件的年数较多,大于7次;在荒漠的边缘地区,植被的生长次数明显增多,基本是1~3次;鄂尔多斯市和巴彦淖尔市的植被萌芽事件概率最高,除了库布齐沙漠和毛乌素沙地的部分地区,大部分地区的植被生长次数大于7次。

这个地区沙漠界线的多变性的一个主要原因是,干旱区、半干旱区的气象因子,尤其是年降雨量的变异性比较大的缘故。在丰水年份时,植被生长茂盛,荒漠边缘的稀疏草地和灌丛生长状况较好,荒漠界线向荒漠的中心方向移动;而在年降雨量较低时,荒漠界线则向草原方向移动。因此,干旱区、半干旱区的植被,尤其是稀疏草地和灌丛在湿润的年份面积会有所增加,产生荒漠化逆转的假象;而在干旱的年份植被则会衰退,会误导人们对荒漠化真实发展程度的判断。由此可见,对荒漠化是否逆转的问题的讨论必须在特定的时间尺度,结合当年的气候条件进行分析。

5 结论

荒漠化是一种渐进发展的土地退化过程,从时间轴向的动态变化来看可以将其认为是一种生态演变过程,从其演变的方向可以将其看为一种严重的生态环境后果。本文在综合国内外相关研究的基础上,从相对变化的视角出发,以评价的起始年作为评价基准,选取植被降水利用率作为评价指标,通过时间序列分析法,对内蒙古自治区这一重要生态环境脆弱区进行了荒漠化评价,并针对荒漠化逆转问题进行了初步探讨,以期揭示区域荒漠化发展的时空动态变化特征。研究结果表明:

(1) 在1999-2009年期间,内蒙古自治区荒漠化发展趋势并不明显;相反,区域内植被功能显著增强,生态环境状况趋于好转,尤其是在鄂尔多斯高原的东部至大青山南麓,大兴安岭及燕山北部余脉。这一地区的植被类型以林地和草地为主,表明中国实施的“三北防护林”、“退耕还林还草”自然生态环境保护工程近10年来在生态环境改善方面发挥了积极的作用。

(2) 从荒漠化土地空间分异特征表明,降水越充沛的地区,植被功能恢复能力也最强。多年平均降水量大于 300 mm 的地区,其植被恢复能力要明显大于降水稀少的地区。

(3) 干旱、极干旱地区的荒漠界限极不稳定,气候因子是影响荒漠边界波动范围的关键因子之一。因此,对荒漠化是否逆转的判断必须在特定的时空尺度,结合当年的气候条件与人类活动进行综合分析。

参考文献 (References)

- [1] Ci Longjun. Understanding on the term of "Desertification". Chinese Science and Technology Terms Journal, 2000, 2(4): 11-13. [慈龙骏. 对“荒漠化”一词的认识和体会. 科技术语研究, 2000, 2(4): 11-13.]
- [2] Zhang Weimin, Yang Taiyun, Qu Jianjun et al. The extension and hazard of desertification disaster in China. Journal of Natural Disasters, 1994, 3(3): 23-30. [张伟民, 杨泰运, 屈建军 等. 我国沙漠化灾害的发展及其危害. 自然灾害学报, 1994, 3(3): 23-30.]
- [3] Dong Guorong, Wu Bo, Ci Longjun et al. Present situation, cause and control way of desertification in China. Journal of Desert Research, 1999, 19(4): 318-332. [董光荣, 吴波, 慈龙骏 等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策. 中国沙漠, 1999, 19(4): 318-332.]
- [4] Sarkar S, Kafatos M. Interannual variability of vegetation over the Indian sub-continent and its relation to the different meteorological parameters. Remote Sensing of Environment, 2004, 90: 268-280.
- [5] Huang S, Siegert F. Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in north china based on spot vegetation imagery. Journal of Arid Environments, 2006, 67: 308-327.
- [6] Sellers P J, Heiser M D, Hall F G et al. The impact of using area-averaged land surface properties - topography, vegetation condition, soil wetness - in calculations of intermediate scale (approximately 10 km super) surface-atmosphere heat and moisture fluxes. Journal of Hydrology, 1997, 190: 269-301.
- [7] Rosenqvist A, Shimada M, Chapman B et al. The global rain forest mapping project-a review. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6): 1375-1387.
- [8] Chen Baorui, Xin Xiaoping, Zhu Yuxia et al. Change and analysis of annual desertification and climate factors in Inner Mongolia using MODIS data. Remote Sensing, 2007, (6): 39-44. [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. 遥感信息, 2007, (6): 39-44.]
- [9] Snyman H A, Fouché H J. Production and water-use efficiency of semi-arid grasslands of South Africa as affected by veld condition and rainfall. Water South Africa, 1991, 17: 263-268.
- [10] Prince S D, Wessels K J, Tucker C J et al. Desertification in the Sahel: A reinterpretation of a reinterpretation. Global Change Biology, 2007, 13: 1308-1313.
- [11] Veron S R, Paruelo J M, Oesterheld M. Assessing desertification. Journal of Arid Environments, 2006, 66(4): 751-763.
- [12] Symeonakis E, Drake N. Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25: 573-592.
- [13] Helldén U, Tottrup C. Regional desertification: A global synthesis. Global and Planetary Change, 2008, 64(3/4): 169-176.
- [14] Prince S D, De Colstoun E B, Kravitz L L. Evidence from rain-use efficiencies does not indicate extensive Sahelian desertification. Global Change Biology, 1998, 4: 359-374.
- [15] Liu Jiyan, Zhang Z X, Zhuang D F et al. A study on the spatial-temporal dynamics changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s. Geographical Research, 2003, 22(1): 1-12. [刘纪远, 张增祥, 庄大方 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. 地理研究, 2003, 22(1): 1-12.]
- [16] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40: 1824-1832.
- [17] Hird J N, McDermid G J. Noise reduction of NDVI time series: An empirical comparison of selected techniques. Remote Sensing of Environment, 2009, 113: 248-258.
- [18] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, 2002, 259: 254-271.
- [19] Yu Y S, Zou S M, Whittemore D. Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. Journal of Hydrology, 1993, 150: 61-80.
- [20] Kahya E, Kalayci S. Trend analysis of streamflow in Turkey. Journal of Hydrology, 2004, 289: 128-144.
- [21] Zhang Hong, Ci Longjun, Sun Baoping. A preliminary reflection on several theoretical problems of desertification. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(5): 446-450. [张宏, 慈龙骏, 孙保平. 对荒漠化几个理论问题的初步探讨. 地理科学, 1999, 19(5): 446-450.]

- [22] Wu Bo. Current status, dynamics and causes of desertification in China. *Forest Research*, 2001, 14(2): 195-202. [吴波. 我国荒漠化现状、动态与成因. *林业科学研究*, 2001, 14(2): 195-202.]
- [23] Weiss E, Marsh S E, Pfirman E S. Application of NOAA-AVHRR NDVI time-series data to assess changes in Saudi Arabia's rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22: 1005-1027.

Assessment of Desertification Using Time Series Analysis of Hyper-temporal Vegetation Indicator in Inner Mongolia

YIN He¹, LI Zhengguo^{1,2}, WANG Yanglin¹, CAI Fu³

(1. *College of Urban & Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *Key Laboratory of Resources Remote Sensing & Digital Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;*

3. *Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016, China)*

Abstract: Desertification is one of the serious threats to the environment in arid and semi-arid northern China. In order to understand inter-annual vegetation dynamics, vegetation indicators have been widely used in desertification assessment. In this study, rain use efficiency (RUE) derived from hyper-temporal remote sensing images has been used for desertification assessment. Based on time-series analysis, this study focused on how the desertification developed in Inner Mongolia and how the desertification reversed in the extremely arid environment. Results showed that during the past 11 years, there was no significant desertification development in Inner Mongolia. Parts of area showed a significant increase trend of RUE, especially in the eastern part of Ordos Plateau and southern Daqing Mountain, as well as the region from the Greater Hinggan Mountains to northern Yanshan Mountains. It is indicated that the ecological conditions in these areas have tended to be much better than before. The reason may be that the vegetation protection policies adopted in northern China have exerted a positive effect on the local environment. The results also showed that there was a significant relationship between rainfall and vegetation restoration, areas with more precipitation tend to be more easily restored, especially in the areas with more 300 mm precipitation. In addition, the research on desertification reversion showed that the desert edge region in western Inner Mongolia have changed intensively, and desertification reverse assessment needs to be further examined.

Key words: desertification assessment; vegetation dynamics; rain use efficiency; desertification reversion; Inner Mongolia