

吕振涛, 李生字, 范敬龙, 等. 蒙古国植被自然恢复潜力[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 192–201.

蒙古国植被自然恢复潜力

吕振涛^{1abc,2}, 李生字^{1abc,2}, 范敬龙^{1abd,2}, 刘国军^{1abd,2},
王海峰^{1abc,2}, 孟晓于^{1abc,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 a. 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, b. 国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究
中心, c. 莫索湾沙漠研究站, d. 塔克拉玛干沙漠研究站, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 植被自然恢复能力评估是生态恢复实践的重要内容。基于蒙古国的MODIS EVI植被指数产品、气象数据及土壤数据,依据相似生境原则,构建了植被恢复潜力计算模式,计算得到蒙古国植被恢复潜力值(VRP,可代表在自然条件下区域植被能够恢复到的最佳状况)及植被恢复潜力指数(VRPI,代表植被生长现状与最大潜力之间的差距),并用蒙古国纵贯铁路沿线长期围封区的采样分析数据进行了验证。结果表明:(1)蒙古国整体上具有较高的植被恢复潜力,植被自然恢复潜力值0.6—0.9;(2)受降水、气温、土壤等自然要素组配的空间分异影响,蒙古国植被自然恢复潜力具有较大的空间差异性,其中北部及东部地区为VRP高值区和VRPI低值区,植被轻度退化,且较容易恢复;南部及西部地区为VRP中低值区和VRPI高值区,植被退化程度较重,恢复难度相对较大。

关键词: 蒙古国; 植被恢复潜力; 相似生境窗口; 地理加权回归分析; Google Earth Engine

文章编号: 1000-694X(2021)05-192-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00047

中图分类号: Q948.15

文献标志码: A

0 引言

蒙古国是中国北部重要邻国,在地理条件与生态系统类型上与中国内蒙古毗连形成蒙古高原的主体部分,不仅是中国重要的生态屏障,还是东亚生态系统的重要组成部分。蒙古国地处干旱、半干旱地区,降水少,生态环境脆弱,畜牧业是其支柱产业。而自20世纪90年代初蒙古国社会制度变革以来,牲畜量快速增长^[1-3],生态环境压力增大,又因气候变化影响,草原植被衰退,荒漠化快速发展,蒙古国成为世界受荒漠化危害最严重的国家^[4],并成为亚洲沙尘的重要策源地,造成东亚地区乃至全球生态环境恶化,对区域经济社会可持续发展造成极大威胁。

植被作为生态系统的核心,在调节气候、涵养水源、保持水土和丰富生物多样性等方面发挥着重要作用。地表植被覆盖能够有效减缓土地荒漠化发展,遏制大范围沙尘暴的发生。很多学者围绕植

被恢复、荒漠化发育过程与防治等方面开展了大量研究工作^[3]。在不同地区自然条件具有较大的地带性差异,使得生态恢复工程实施的效果不尽相同。因而,应充分考虑各区域生态恢复的天然能力,即自然恢复潜力^[5-6]。根据当地资源禀赋因地制宜地确定生态恢复措施,否则不仅成效不明显,还会浪费资源、破坏环境^[7]。植被恢复是生态修复和荒漠化治理的主要环节和首要目标,而确定植被自然恢复潜力则是生态恢复方案确定的重要前提和依据。

国内外许多学者也在尝试研究生态系统的恢复潜力及其测度方法,但目前多为理论研究和基于经验性指标的定性评估,定量测度相对较少^[8-11]。在植被恢复潜力(VRP, vegetation restoration potential)的研究中,一般根据相似生境原则定义参考生境,衡量退化生境与参考目标的距离来计算恢复潜力^[12-14],并将这种潜力定义为相似生境植被恢复潜

收稿日期:2021-01-15; 改回日期:2021-04-13

资助项目:中国科学院A类战略性科技先导专项子课题(XDA20030202);国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2017YFE0109200);中国科学院关键技术人才项目

作者简介:吕振涛(1995—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。

E-mail: lvzhentao18@mails.ucas.ac.cn

通信作者:李生字(E-mail: oasis@ms.xjb.ac.cn)

力 (SHBVRP, the similar habitat based vegetation restoration potential)^[15-16]。随着卫星和遥感技术的快速发展,高分辨率的遥感影像可以定量测度植被覆盖度、生物量、生产力等地表特征^[17-19],其中遥感植被指数(VI, vegetation index)可以有效地反映一个地区的植被覆盖度^[20],被广泛用于生态系统治理和植被生长研究^[21-22],为植被恢复潜力定量测度提供了丰富信息。高海东等^[23]利用土壤、地形、气象指标划分相似生境单元,用 SPOTVEG NDVI 数据估算植被覆盖度,用统计方法和地理空间分析技术构建 SHBVRP 模型,评价了黄土高原沟壑区植被恢复工程措施的适宜性及实施效果。Zhang 等^[24]融合“环境特征相似”和“空间位置邻近”,基于空间滑动窗口技术,构建了一种新的相似生境潜力模型。在此基础上,Xu 等^[25]进一步提出了潜力实现度概念,构建了植被恢复潜力实现度指标。该指标可有效屏蔽资源禀赋影响,有利于准确评价生态修复政策的实施效果。本文借助 Google Earth Engine(GEE)的海量数据源及其强大运算能力,进一步探究该模型在大尺度植被恢复工作中的适用性及准确性,用其计算了蒙古国全域的植被恢复潜力,分析了去除人为干扰后植被所能达到的最优生长状况,并以蒙古国纵贯铁路围封区的实测数据验证了其真实性。

研究结果可为蒙古国荒漠化草场植被恢复重点区域识别和恢复工程规划提供科学依据。

1 研究区域

蒙古国位于亚洲东北部的蒙古高原(41°32′—52°15′N、87°44′—119°56′E,图1),国土面积156.65万km²,为世界上第二大内陆国家^[26]。蒙古国地处蒙古高压中心,全年平均无云日数为257d,大部分地区夏季炎热、冬季极度寒冷,1月平均气温可低至-30℃,夏季最高气温可达40℃,多年平均气温为-2.7℃;年降水量200—300mm,集中在7—8月;除北部和西部地区的山脉(阿尔泰山和杭爱山)和南部地区的戈壁荒漠外,大部分地区景观为草原,耕地面积少,畜牧业是其主要产业。近年来,随着气候变暖、人类活动加剧,草场退化、荒漠化蔓延日益加剧,严重威胁蒙古国经济社会可持续发展。

“中蒙俄经济走廊”将中国的“丝绸之路经济带”、俄罗斯的“跨欧亚发展带”及蒙古国的“草原之路”对接,可有效促进中、蒙、俄优势互补和协同发展。其中的华北通道是由中国京津冀地区到内蒙古呼和浩特,再到蒙古国和俄罗斯,将来将建成北京—莫斯科欧亚高速运输走廊,是中国向北开放的重要通道。

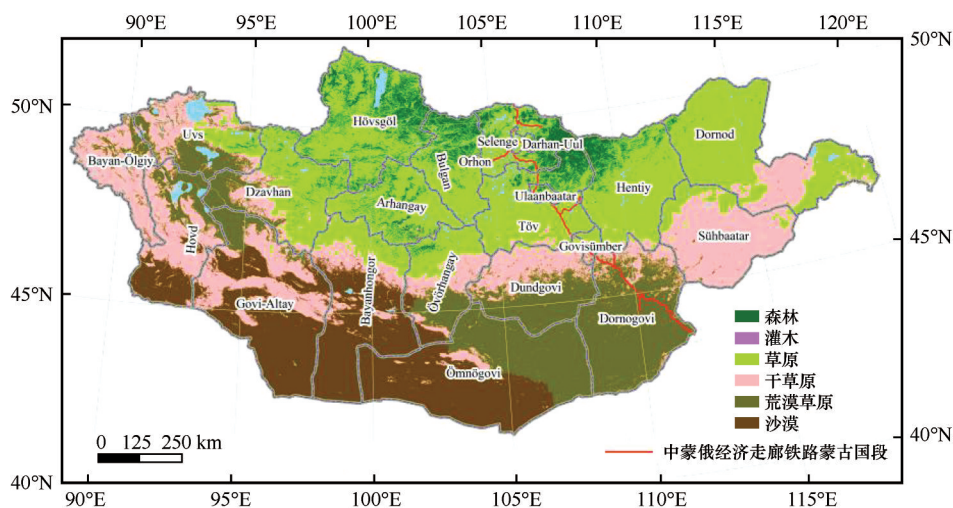


图1 蒙古国植被景观分布图

Fig.1 Vegetation distribution map

2 数据与方法

2.1 数据收集及预处理

本文研究重点是近自然条件下的植被恢复潜

力,需要VI数据定量表征植被恢复潜力。同时,以蒙古国全境为研究区域,空间尺度较大,不同生境区域的差异主要来源于气候和土壤条件。因此,本文选择了气候条件和土壤类型来划分相似生境。

2.1.1 气象数据

本文收集了蒙古国69个气象站点1961—2015年的气象数据、2015—2019年ERA5气候再分析数据以及FAO CLIMWAT2.0提供的蒙古国及其周边国家61个气象站点共7个参数(平均日最高气温(°C)、平均日最低气温(°C)、平均相对湿度(%)、平均风速(km·d⁻¹)、平均日照时数、平均太阳辐射(MJ·m⁻²·d⁻¹)、月雨量(mm)和每月有效雨量(mm))数据,使用FAO Penman-Monteith公式(1)计算参考蒸散发(ET_0):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为参考蒸散量(mm·d⁻¹); R_n 为参考作物冠层表面净辐射(MJ·m⁻²·d⁻¹); G 为土壤热通量(MJ·m⁻²·d⁻¹); T 为2 m处日平均气温(°C); U_2 为2 m处日平均风速(m·s⁻¹); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率(kPa·°C⁻¹); γ 为干湿表常数(kPa·°C⁻¹)。

在实际计算中使用蒙古国气象站点2001—2015年的观测数据(部分站点缺测数据由FAO CLIMWAT数据补充)以及2016—2019年ERA5再分析数据分别计算 ET_0 后进行空间插值并求平均。根据FAO给出的作物蒸散量-需水量计算指南,对于缺失变量的计算和处理方法如下(具体计算过程利用FAO提供的 ET_0 Calculator软件完成):

饱和水汽压差($e_s - e_a$)的计算。饱和水汽压(e_s)由 T_{\max} 和 T_{\min} 计算而来,实际水汽压(e_a)由露点温度(T_{dew})和相对湿度(RH)计算而来。

$$e_a = RH \times e_s \quad (2)$$

$$e_s = \frac{e(T_{\max}) + e(T_{\min})}{2} \quad (3)$$

$$e(T_{\max}) = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 273.3}\right) \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{4098 \times \left[0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27T}{T + 273.3}\right)\right]}{(T + 273.3)^2} \quad (5)$$

式中: e_a 为实际水汽压(kPa); e_s 为饱和水汽压(kPa); RH 为相对湿度; T_{\max} 、 T_{\min} 为最高、最低气温; Δ 为气温为 T 时的饱和水汽压斜率; T 为日平均气温。

在实际计算中,由于土壤热通量的大小相对较小,在日常计算中忽略土壤热通量(G)的影响。在FAO Penman-Monteith方程中,以0.408为转换

因子,将MJ·m⁻²·d⁻¹表示的净辐射换算为蒸发量mm·d⁻¹。

在ArcGIS10.6中用克里金插值法,将多年平均降水量(P)和参考蒸散发(ET_0)进行空间插值,并按照(2)式计算干旱指数:

$$DI = ET_0 / P \quad (6)$$

式中: DI 为干旱指数; ET_0 为年参考蒸散量(mm); P 为年降水量(mm)。

2.1.2 土壤数据

土壤数据来源于《蒙古人民共和国的土壤》^[27],土壤类型按机械成分和成土母质共划分为16个土类。

2.1.3 植被覆盖数据

在中分辨率光谱成像仪(MODIS)系列植被指数产品中,提供了不同时空分辨率的NDVI(normalized difference vegetation index,归一化植被指数)和EVI(enhanced vegetation index,增强型植被指数)数据。本文选择合成植被指数产品MOD13A1,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d。并进行空间重采样和时间合成,最终得到空间分辨率500 m、时间分辨率1个月的植被指数数据。与NDVI相比,EVI的算法及合成方法有改进^[28-29],可以更好地反映植被在空间上的异质性^[30]。为了降低异常值的影响,正常反映植被生长状况,本文使用生长季平均EVI值作为年EVI。植被覆盖度经(7)式由EVI反演得到:

$$FVC = (EVI - EVI_{\text{soil}}) / (EVI_{\text{veg}} - EVI_{\text{soil}}) \quad (7)$$

式中: FVC 为植被覆盖度; EVI 为增强型植被指数; EVI_{soil} 和 EVI_{veg} 分别为纯裸土和纯植被像元的EVI值。

2.2 研究方法

2.2.1 植被恢复潜力模型

本文主要研究目的是确定在自然条件下区域内可达到的最佳植被生长状况,模型中须剔除所有人为因素。遵循“生境越相似的区域,植被恢复潜力越接近”的原则^[23]。考虑到环境变量对植被生长影响的空间变异性和影响范围的不确定性,本文借鉴了Zhang等^[24]给出的植被恢复潜力计算公式(公式8)。

$$VRP_{ij}(V_1, V_2, \dots, V_N) = EVI_{kl}(V_1, V_2, \dots, V_N)_{(\max)} \quad (8)$$

式中: $VRP_{ij}(V_1, V_2, \dots, V_N)$ 表示 i 行 j 列处植被恢复潜力; $EVI_{kl}(V_1, V_2, \dots, V_N)$ 表示点 (i, j) 所在相似生境单元的最大EVI; V_1, V_2, \dots, V_N 代表 N 个环境变量,各环境变量值相同的区域即划为同一相似生境

单元。

在实际操作中,将干旱指数按相等间距分为 10 类,与 16 个土壤类型区域进行叠加,共形成 160 个计算分区,在每个分区内可认为生境相似。在每个计算分区内,统计 20 年平均植被覆盖度的 95% 分位数(各年平均植被覆盖度取生长季内均值)。这一步取生长季内均值是为了降低异常值的影响,而取 95% 分位数是为了降低人工景观的影响。有关相似生境单元建模的详细过程,特别考虑空间窗口下的植被恢复潜力建模,可进一步参考 Zhang 等^[24]。

2.2.2 植被恢复潜力指数

植被恢复潜力只代表该区域可能达到的最优植被生长状况,但在相同的植被恢复潜力条件下,植被恢复重点区的划分和生态恢复工程措施的制定还须考虑植被生长现状与最优生长状况的差距。为了反映这种差距,本文按照(9)式^[25]计算了植被恢复潜力指数(VRPI, Vegetation restoration potential index):

$$VRPI = \frac{VRP_{ij} - EVI_{ij}}{VRP_{ij}} \tag{9}$$

2.2.3 模型精度评价方法

在蒙古国纵贯铁路(1955 年建成)沿线选取 6 个采样区、共 32 个样点,测定样区中铁路围栏内外的植被覆盖度,以围栏内外植被盖度差值代表围封的植被恢复效果。将实际恢复效果与模型计算得到的预期恢复效果(即植被恢复潜力)做回归分析,以显著性指标 *P* 值和决定系数 *R*² 评价 VRP 及 VRPI 估算模型精度。

2.2.4 地理加权回归分析

地理加权回归模型(GWR, geographically weighted regression)运用了局部回归的思想^[31-32],支持自变量与应变量之间关联局部变化的参数估计,量化了空间异质性,能够反映被忽略的局部特性,相较于传统的回归模型更加适合地理研究。本文采用地理加权回归(GWR)模型,分析植被恢复潜力与各自然条件的关系,并以高斯函数与赤池信息准则法(AIC, akachi information criteria)来确定权重和最优带宽。

3 结果与分析

3.1 植被恢复潜力的验证

蒙古国纵贯铁路是连接中蒙俄三国最重要的

铁路干线,向南在内蒙古二连浩特市与中国铁路接轨,向北在乌兰乌德与俄罗斯西伯利亚铁路相连,是蒙古国的交通大动脉^[33-34],也是中蒙俄经济走廊的重要交通基础设施。在该铁路两侧 20—30 m 距离处设置了安全围栏,围栏内实际形成了退化草地围封恢复区。2019 年在铁路沿线的围栏内外进行了样方调查,所获得的数据可用来验证本研究方法的可行性和研究结果的客观性。

为了降低植被生长小尺度空间变异对研究结果的影响,本文对相同植被恢复潜力区域内的样点数据做均值处理,将围栏内外植被覆盖度差值分别与 VRP 及 VRPI 做拟合回归分析,拟合结果如表 1—2。根据 *R*² 和显著性 *P* 值,围栏内外植被覆盖度差值与 VRP 指数型拟合效果最好,因而选择公式(10)。

$$VR = 0.0133e^{3.6031VRP} \tag{10}$$

式中:VR 为实际恢复效果,即围栏内外植被覆盖度差值,VRP 为植被恢复潜力值。

表 1 围栏内外植被盖度差与 VRP 的拟合方程

Table 1 Fitted equation of VRP and coverage difference

拟合方程	<i>R</i> ²	<i>P</i>
<i>y</i> = 0.8416 <i>x</i> - 0.4023	0.69	0.007
<i>y</i> = 0.0133e ^{3.6031<i>x</i>}	0.770	0.09
<i>y</i> = 0.6176ln(<i>x</i>) + 0.4158	0.668	0.008
<i>y</i> = 1.5814 <i>x</i> ² - 1.5607 <i>x</i> + 0.4835	0.715	0.009

表 2 围栏内外盖度差与 VRPI 拟合方程

Table 2 Fitted equation of VRPI and coverage difference

回归方程	<i>R</i> ²	<i>P</i>
<i>y</i> = -0.7494 <i>x</i> + 0.7163	0.782	0.005
<i>y</i> = 1.6431e ^{-3.342<i>x</i>}	0.687	0.169
<i>y</i> = -0.384ln <i>x</i> + 0.0465	0.748	0.006
<i>y</i> = -0.2852 <i>x</i> ² - 0.422 <i>x</i> + 0.6319	0.785	0.006

由表 2 中 *R*² 和显著性 *P* 值可知,围栏内外植被覆盖度差值 VR 和 VRPI 之间以二次曲线拟合效果最好。同时,虽然表中第一行的一次曲线拟合的 *R*² 值也很大,但在实际植被恢复工作中发现,当 VRPI 值接近 0,即植被生长现状与预期差值非常小时,周围自然条件较其稍好的区域,植被生长状况并不会强太多,甚至有时还会稍差;当 VRPI 值接近 1,即植被生长现状很差,同时与预期相差很大时(基本没有植被生长),附近自然条件稍好的区域可能就会有稀疏的灌木或草本植物生长,两地的植被覆盖度差距

与 VRPI 差距的比值较其他区域更大。因此,选择公式(11)一个倒扣的碗形曲线,能够更好地解释其变化。即 VRPI 值越小,植被生长状况随 VRPI 变化越慢;VRPI 值越大,植被生长状况随 VRPI 变化越快。

$VR = -0.2852VRPI^2 - 0.422VRPI + 0.6319$ (11)
式中:VR 代表实际恢复效果,即围栏内外植被覆盖度差值,VRPI 为植被恢复潜力值。

为确定围栏内外盖度差 VR 与 VRP 的显著相关性是否来源于植被生长现状,对围栏外植被盖度与 VRP 也做了拟合分析。从表 3 中 R^2 和显著性 P 值可知,无论使用何种曲线进行拟合,围栏外植被盖度与 VRP 均无显著相关性。

表 3 围栏外盖度与 VRP 拟合方程
Table 3 Fitted equation of VRP and coverage outside the fence

回归方程	R^2	P
$y=0.255x + 0.0316$	0.0967	0.421
$y=0.0346e^{2.2224x}$	0.1666	0.0281
$y=0.1869\ln(x) + 0.2797$	0.0963	0.421
$y=-0.4755x^2 + 0.9665x - 0.2259$	0.0997	0.733

可见,使用本模型计算出的植被恢复潜力及恢复潜力指数均不受植被生长现状影响,可较为真实地反映生态恢复工程使植被达到的最优生长状况。

从 VR-VRP 方程中可以看出,围封恢复效果与

VRP 值呈正相关关系,说明 VRP 具有很好的真实性,反映了自然条件下的植被恢复能力,与铁路两侧围封并去除人为干扰的实际相符。实地调查也发现,经历长期围封后,虽然铁路围栏内植被有所恢复,但生长状况并没有完全达到其潜力值。这可能与长期围封引起的生态系统演替有关。从 VR-VRPI 方程可知,围封后植被恢复效果 VR 与 VRPI 呈负相关关系,表明植被生长现状与恢复潜力差距越大,植被恢复难度越大。

3.2 植被恢复潜力指数的指示意义

蒙古国植被恢复潜力指数 VRPI 分布如图 2。恢复潜力指数代表植被生长现状与恢复潜力的差距,也指示了生态系统退化的程度,即 VRPI 值越大退化程度越大。按照退化程度由强到弱,将植被恢复潜力指数分为 5 个等级:第 1 级(0.8—1)、第 2 级(0.6—0.8)、第 3 级(0.4—0.6)、第 4 级(0.2—0.4)、第 5 级(0—0.2)。在计算 VRP 时,为了降低人工景观的影响,取多年植被覆盖度的 95% 分位数代替最大值。因此,会有部分区域植被生长现状优于其 VRP 值,即其 VRPI 值为负。本文认为该区域是现阶段无需恢复区域,因此不进行研究 and 区域划分。由表 4 可知,第 1、第 2、第 3 级面积合计占比 55.81%,第 4 级和第 5 级面积合计占比 44.18%,可见蒙古国植被严重退化区域的面积很大,已超过一半国土。

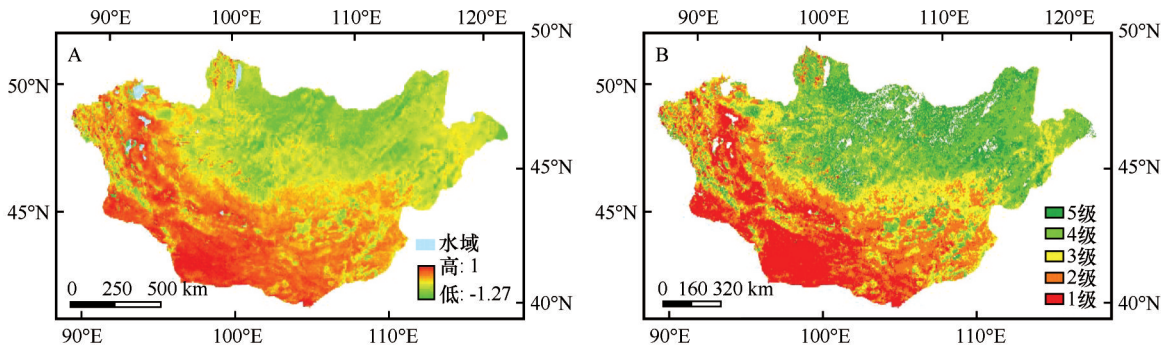


图 2 植被恢复潜力指数(A)及其分级(B)

Fig.2 Vegetation restoration potential index

根据图 2,可将蒙古国纵贯铁路沿线分为 4 个区段(涉及第 2 级到第 5 级),利用 GEE 平台获取蒙古国 Landsat 5 和 Landsat 8 影像数据(1986—2020 年),计算各年各区段的 NDVI 均值,做成折线图(图 3)。由图 3 可知,在 1986 年,4 个区段的 NDVI 均值都位于 0—0.05,各区段间差距很小;之后,NDVI 值逐年增加,各区段间 NDVI 值也逐渐拉开差距。到

2020 年,第二等级与第五等级的 NDVI 差值已达到 0.15,比 1986 年增加了两倍多,其余各等级间的差距也增大了。这也表明 VRPI 值越大,植被恢复越慢,恢复难度越大。

3.3 蒙古国植被恢复潜力的空间异质性

利用模型,在蒙古国全域得到 160 个相似生境

表 4 蒙古国植被恢复潜力指数分级统计

Table 4 Restoration potential index of Mongolia

项目	级别				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
VRPI 值	0.8—1	0.6—0.8	0.4—0.6	0.2—0.4	0—0.2
面积/km ²	27.13	38.78	35.48	45.36	34.90
占比/%	14.93	21.35	19.53	24.97	19.21

窗口,统计蒙古国近 3 年生长季植被覆盖度的平均

值;为降低异常值和人工景观的影响,在各窗口内选取 95%分位数,作为该窗口最大植被覆盖度,得到整个蒙古国植被恢复潜力分布图(图 4)。将蒙古国植被恢复潜力分为 5 级:第 1 级(0—0.2)、第 2 级(0.2—0.4)、第 3 级(0.4—0.6)、第 4 级(0.6—0.8)、第 5 级(0.8—1),其中恢复潜力大于 0.6 的区域面积占比超过 70%,说明蒙古国总体上具有较高的植被恢复潜力,只要采取适宜的生态工程措施和生态保育政策,大部分地区都能恢复到较好状况(表 5)。

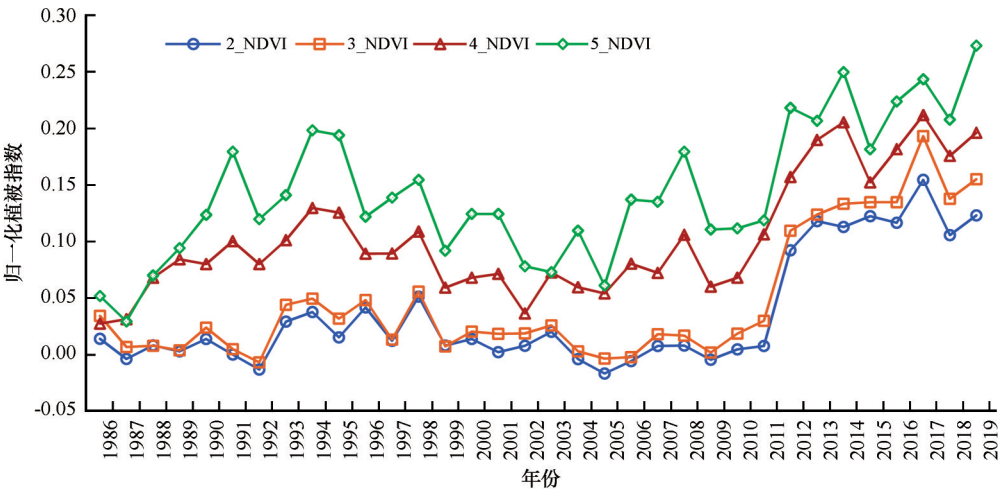


图 3 蒙古国纵贯铁路沿线不同恢复潜力指数区段归一化植被指数的多年变化情况

Fig.3 Multi-year changes of normalized difference vegetation index under different restoration potential index

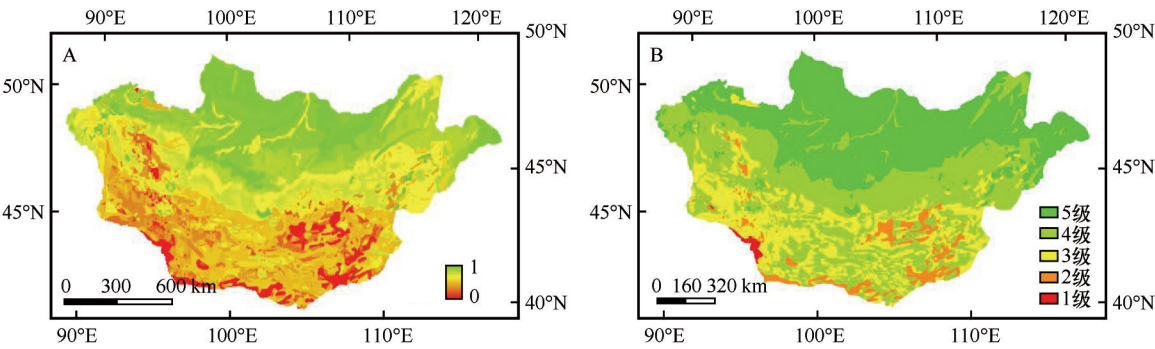


图 4 植被恢复潜力(A)及其分级(B)

Fig.4 Vegetation restoration potential

表 5 蒙古国植被恢复潜力分级统计

Table 5 Restoration potential of Mongolia

项目	级别				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
VRP 值	0—0.2	0.2—0.4	0.4—0.6	0.6—0.8	0.8—1
面积/km ²	6 538.55	95 664.78	303 958.27	633 132.69	569 791.41
占比/%	0.41	5.95	18.89	39.35	35.41

由图 4 可知,蒙古国 VRP 大致由南向北呈递减趋势,其中恢复潜力最低的区域集中分布在东南部

的戈壁地区,第 2 级大多分布于西南地区。此外,北部多条河流的河谷地带因河流频繁涨水淹没,土壤轻度盐碱化,不利于植被生长,植被恢复潜力也偏低(第 4 级);东北地区有大片区域位于小型咸水湖周边^[35],土壤盐渍化程度较重,影响植物生长,植被恢复潜力也偏低。

由图 2 可知,VRPI 总体上由西南向东北呈递减趋势,高值区主要分布在蒙古国西部及西南部区域。东北部区域 VRP 较高,植被生长现状较好,现

状与恢复潜力差距很小,因而VRPI值较低;西部区域VRP值较高,而植被生长现状很差,因而VRPI值较高;南部区域VRP值较低,但因为植被生长现状很差,植被生长状况与VRP差距较大,因而VRPI值较大。

整体上,VRP的低值区与VRPI的高值区基本重合。一般而言,恢复潜力大的地区自然条件较好,植被生长状况比较好,生物量也较大,生态系统自我修复能力也更强,VRPI值较小,在受到破坏后(如牲畜啃食后)更易恢复。恢复潜力小的地区一般自然条件较差,即使没有人为干扰,其生态环境本底状况也非常脆弱,VRPI值较高,一旦遭受人为破坏则很难恢复。

4 讨论

利用ARCGIS软件对GWR(地理加权回归)模型结果中各指标的回归系数进行可视化分析,得到各指标系数的空间分布图,进而分析各指标影响的空间差异。

从各自然因素相关系数绝对值的平均值大小来看,各因素对区域植被恢复潜力影响的空间分布情况不同。

在79.09%的范围内,土壤含水量对区域VRP的影响呈正相关,在20.91%的范围内呈负相关,负向影响主要分布在蒙古国东北部区域和北部一些河流谷地。这与上文中蒙古国东北部蒙俄边境附近大量咸水湖和河流泛滥淹没引起的土壤盐渍化有关。VRP对土壤含水量的回归系数高值区主要集中在降水量较低的蒙古国西部和南部地区,如东戈壁、南戈壁、中戈壁、巴彦洪格尔、戈壁阿尔泰等省,而降水量丰富的北部地区回归系数较小,说明土壤水分是决定干旱地区植被生长的关键要素,也是影响干旱荒漠区植被恢复潜力的关键因素。

降水与VRP在蒙古国全境范围内呈现正相关,而与潜在蒸散量则呈现负相关,两者对VRP的影响区域基本一致。降水量与VRP相关系数的高值区主要位于蒙古国气温较低的北部及东北部地区,该区域气温较低,蒸散较弱,降水的植被利用率较高,降水量对植被恢复潜力的影响更强;而南部尤其是东南部戈壁地区,夏季气温高,风速大,蒸散很强,降水的植被利用率很低,降水量对该区植被恢复潜力影响较弱。因而,降水与潜在蒸散量相关系数的高值区和低值区与降水量的高、低值区分布基本

一致。

由图5可以看出,坡度对植被恢复潜力的影响主要为负向,只在极少部分地区呈现正向影响。对比土壤含水量对植被恢复潜力影响的空间分布情况来看,可以推测出,在蒙古国南部气候干旱地区,地形影响了地表水分的再分配。因此在干旱地区,坡度越大的区域降雨后越难以截留水分,因此坡度对植被恢复潜力呈负相关,坡度越大植被恢复潜力越低;而在坡地地势平缓处则能够蓄积更多水分,使植被恢复潜力更高。而在中部和北部气候较湿润的地区,坡度对植被恢复潜力的影响则较小,但绝大部分地区依然呈现轻微的负相关。这是因为,土壤含水量的空间差异在这些区域对植被恢复潜力的影响不如在干旱地区强烈。

张晓彤等^[36]研究了蒙古国铁路沿线生态承载力的空间分布情况,发现铁路沿线生态承载力呈现自南向北逐渐增加的趋势,北部生态承载力较好,中部及南部地区相对较弱。本文的植被自然恢复潜力与生态承载力的空间分布较一致,表明本文植被自然恢复潜力可以反映客观实际,具有较好的科学性。

对于VRPI负值区的处理,一些学者选择进行归一化处理以消除异常值。但在本课题后续研究中发现,2019—2020年,蒙古国大部分区域植被覆盖度有所提高,推测是由于疫情影响了人类生产活动所导致。但在本文VRPI负值区(这些区域大部分VRP值即恢复潜力很高,但植被现状优于潜力),植被覆盖度则大多出现了降低的情况。这说明,在降低或撤除人为干扰后植被生长状况确实向着其恢复潜力发展。因此,这部分所谓“异常值”区域在今后的研究中有待进一步发掘。

5 结论

本文以蒙古国为研究区,基于相似生境理论和空间统计方法,在前人的研究基础上构建了一种适合大尺度的植被自然恢复潜力计算方法。经验证,植被恢复潜力(VRP)及植被恢复潜力指数(VRPI)能够很好地反映植被在自然状态下恢复到最优生长状况的能力,其中VRP反映了植被的自然恢复潜力,VRPI反映植被恢复的难易程度,将VRP与VRPI结合,可以识别出生态恢复工程的重点区域,从而科学确定各区域的恢复措施。植被恢复潜力和恢复潜力指数的综合分析和运用,为生态恢复工程

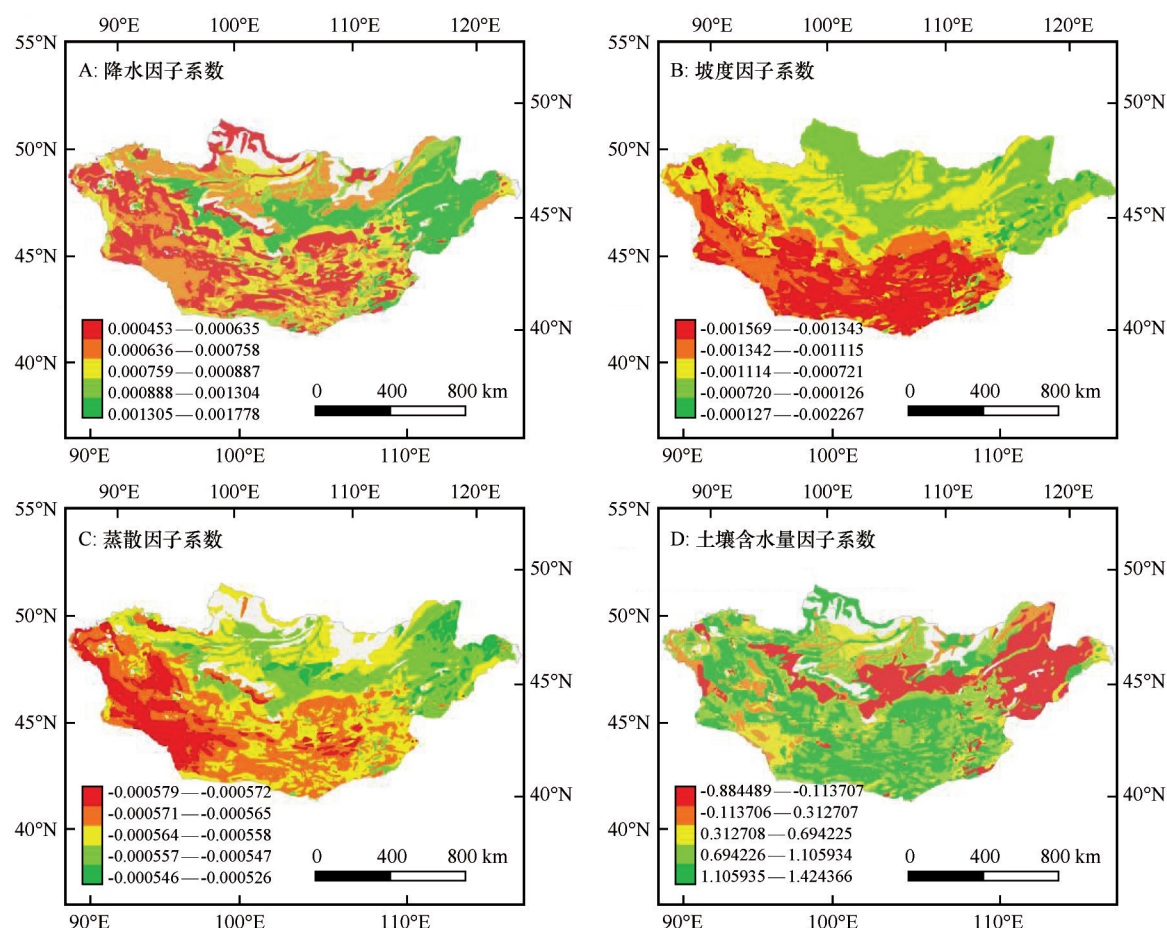


图5 地理加权回归分析结果

Fig.5 The result of GWR

的规划和设计提供了新思路和新手段。

蒙古国植被自然恢复潜力主要受土壤含水量、潜在蒸散发量、降水量的影响,植被自然恢复潜力值0.6—0.9,大部分地区具有较好的自然恢复能力;西部和南部区域为VRP低值、VRPI高值区,是蒙古国重点的植被恢复区,虽然其自然恢复后可达到的植被盖度不高,但一定程度的人为保护和改良对其影响很大,可以较好地抑制蒙古国荒漠化发展,降低沙尘释放,有效控制东亚沙尘源。

参考文献:

- [1] Hilker T, Natsagdorj E, Waring R H, et al. Satellite observed widespread decline in Mongolian grasslands largely due to overgrazing[J]. Global Change Biology, 2014, 20(2): 418–428.
- [2] John R, Chen J, Kim Y, et al. Differentiating anthropogenic modification and precipitation-driven change on vegetation productivity on the Mongolian Plateau [J]. Landscape Ecology, 2016, 31(3): 547–566.
- [3] 刘超, 刘凤伶. 全球荒漠化防治现状及发展趋势研究[J]. 城市地理, 2015(20): 58.
- [4] Meng X, Gao X, Li S, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Vegetation NDVI Changes and the Driving Forces in Mongolia during 1982–2015 [J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 603.
- [5] 陈英义, 李道亮. 北方农牧交错带沙尘源植被恢复潜力评价模型研究[J]. 农业工程学报, 2008(3): 130–134.
- [6] 唐樱殷, 谢永贵, 余刚国, 等. 黔西北喀斯特退化植被恢复潜力评价[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 528–534.
- [7] Cao S, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration [J]. Earth-Science Reviews, 2011, 104(4): 240–245.
- [8] Adger W N, Hughes T P, Folke C, et al. Social-ecological resilience to coastal disasters [J]. Science, 2005, 309(5737): 1036–1039.
- [9] Berkes F, Seixas C S. Building resilience in lagoon social-ecological systems: a local-level perspective [J]. Ecosystems, 2005, 8(8): 967–974.
- [10] Klein R J T, Smit M J, Goosen H, et al. Resilience and vulnerability: coastal dynamics or Dutch dikes? [J]. Geographical Journal, 1998, 164(3): 259–268.
- [11] Bennett E M, Cumming G S, Peterson G D. A systems model

- approach to determining resilience surrogates for case studies [J]. *Ecosystems*, 2005, 8(8): 945–957.
- [12] Laughlin D C. Applying trait-based models to achieve functional targets for theory-driven ecological restoration [J]. *Ecology Letters*, 2014, 17(7): 771–784.
- [13] Choi Y D. Theories for ecological restoration in changing environment: toward 'futuristic' restoration [J]. *Ecological Research*, 2004, 19(1): 75–81.
- [14] Jiang J, Gao D, Deangelis D L. Towards a theory of ecotone resilience: Coastal vegetation on a salinity gradient [J]. *Theoretical Population Biology*, 2012, 82(1): 29–37.
- [15] Bisson M, Fornaciai A, Coli A, et al. The vegetation resilience after fire (VRAF) index: development, implementation and an illustration from central Italy [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 312–329.
- [16] Arianoutsou M, Koukoulas S, Kazanis D. Evaluating post-fire forest resilience using GIS and multi-criteria analysis: an example from Cape Sounion National Park, Greece [J]. *Environmental Management*, 2011, 47(3): 384–397.
- [17] Wu D, Wu H, Zhao X, et al. Evaluation of spatiotemporal variations of global fractional vegetation cover based on GIMMS NDVI data from 1982 to 2011 [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 4217–4239.
- [18] Riva M J, Daliakopoulos I N, Eckert S, et al. Assessment of land degradation in Mediterranean forests and grazing lands using a landscape unit approach and the normalized difference vegetation index [J]. *Applied Geography*, 2017, 86: 8–21.
- [19] Li L, Bakelants L, Solana C, et al. Dating lava flows of tropical volcanoes by means of spatial modeling of vegetation recovery [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(4): 840–856.
- [20] Hilker T, Lyapustin A I, Hall F G, et al. On the measurability of change in Amazon vegetation from MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 233–242.
- [21] Li Y L, Bojie Fu, Alexis J, et al. Gauging policy-driven large-scale vegetation restoration programmes under a changing environment: their effectiveness and socio-economic relationships [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 911–919.
- [22] Tong X, Wang K, Yue Y, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects on long-term vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 54: 105–113.
- [23] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究 [J]. *地理学报*, 2017, 72(5): 863–874.
- [24] Zhang D, Xu X, Yao S, et al. A novel similar habitat potential model based on sliding-window technique for vegetation restoration potential mapping [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 31(6): 760–772.
- [25] Xu X, Zhang D, Zhang Y, et al. Evaluating the vegetation restoration potential achievement of ecological projects: a case study of Yan'an, China [J]. *Land Use Policy*, 2020, 90: 104290.
- [26] 陈芳, 刘虎俊, 刘淑娟, 等. 基于MODIS的蒙古国2003–2017年荒漠化动态监测 [J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(5): 167–171.
- [27] 彼斯帕洛夫. 蒙古人民共和国的土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [28] Qiu B, Zeng C, Tang Z, et al. Characterizing spatiotemporal non-stationarity in vegetation dynamics in China using MODIS EVI dataset [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(11): 9019–9035.
- [29] Dutta D, Das P K, Paul S, et al. Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time-series data (2001–2011) [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(2): 775–790.
- [30] 李红军, 郑力, 雷玉平, 等. 基于EOS/MODIS数据的NDVI与EVI比较研究 [J]. *地理科学进展*, 2007(1): 26–32.
- [31] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity [J]. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 290–298.
- [32] Bogdanov E A, Klimanova O A, Gunin P D. Natural background and anthropogenic drivers of vegetation cover changes in pasture landscape: the case of Central Mongolia [J]. *Известия Русского географического общества*, 2019, 151(3): 55–72.
- [33] 刘晓宇, 周学明. 浅析“一带一路”背景下中蒙俄经济走廊的发展 [J]. *全国流通经济*, 2020(7): 37–38.
- [34] 高莎丽. 蒙古国铁路的发展 [J]. *综合运输*, 1996(8): 36–38.
- [35] Leonid Z V. Hydrochemistry of salt lakes in southeastern transbaikalia (Russia) in the time of arid phase of climate change at the beginning of the XXI Century [Z]. *Abstract of the 12th International Conference on Salt Lake Research*, 2014: 3.
- [36] 张晓彤, 谭衢霖, 涂天琦, 等. 利用MODIS卫星数据对“草原之路”蒙古国地区进行生态承载力评价 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(9): 64–67.

Natural restoration potential of vegetation in Mongolia

Lv Zhentao^{1abc,2}, Li Shengyu^{1abc,2}, Fan Jinglong^{1abd,2}, Liu Guojun^{1abd,2},
Wang Haifeng^{1abc,2}, Meng Xiaoyu^{1abc,2}

(1. a.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology / b.National Engineering Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction / c.Mosuowan Desert Research Station / d.Taklimakan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Assessment of natural restoration capacity of vegetation is an important part of ecological restoration practice. This article, based on the MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI), meteorological data and soil data of Mongolia, build the vegetation restoration potential calculation model on the “similar habitat”, calculate the Mongolia vegetation restoration potential value (VRP, representative in the area under the condition of natural vegetation to restore to the best condition) and vegetation restoration potential index (VRPI, on behalf of the vegetation growth status and potential difference between the largest). And use the sampling analysis data from Mongolian through long-term enclosure along the railway area to verify the research findings. The results showed that : (1) There is a high vegetation restoration potential in Mongolia, and the natural vegetation restoration potential value is mostly between 0.6 and 0.9. (2) Under the influence of spatial differentiation of natural factors such as precipitation, air temperature and soil, the natural restoration potential of vegetation in Mongolia has great spatial differences. The northern and eastern regions are the regions with high VRP value and low VRPI value. Suggest that the vegetation was slightly degraded and easy to recover. In the southern and western regions, there are middle and low values of VRP and high values of VRPI. The degree of vegetation degradation is severe and the restoration is relatively difficult. The results of this study can provide scientific reference for the restoration of degraded vegetation in Mongolia according to local conditions.

Key words: Mongolia; vegetation restoration potential; similar habitat windows; GWR; GEE