

基于 RWEQ 模型修正的土地沙化敏感性评价

胡梦甜¹, 张 慧^{1,2}, 高吉喜³, 仇宽彪¹, 王延松⁴, 吕久俊⁴, 鞠昌华¹

(1.生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2.南京信息工程大学 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 3.生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094; 4.辽宁省生态环境保护科技中心, 沈阳 110161)

摘 要:中国西北部是土地沙化面积最大,发展最快,危害最为严重的地区,提高土地沙化敏感性评价结果精度对精确识别沙化敏感区、科学划定土地沙化敏感性生态保护红线、制定土地沙化防治对策具有重要意义。基于土壤风蚀修正模型对我国通用的土地沙化敏感性评价方法进行了修正,研究了土壤风蚀修正模型中的风力因子、土壤湿度 2 个因子分别代替通用土地沙化敏感性评价中的大风天数、干燥度指数 2 个因子的可行性,并采用通用土地沙化敏感性评价方法与本研究提出的修正土地沙化敏感性评价方法对我国西北部地区土地沙化敏感性进行了评价。结果表明:(1)修正土地沙化敏感性评价方法中的土壤湿度因子、风力因子分别与通用土地沙化敏感性评价方法中的干燥度指数因子、大风天数因子在空间上具有较高的一致性,但在气象站点分布较少的区域,修正土地沙化敏感性评价方法中的土壤湿度和风力因子更能准确地刻画气候干湿状况和大风情况。(2)修正土地沙化敏感性评价方法的评价结果大大提高了通用土地沙化敏感性评价方法的评价结果精度,可为中国沙化敏感性精细化评估提供科学参考。

关键词:土地沙化敏感性评价; 因子优化; 中国西北部; RWEQ 模型

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0368-05

RWEQ-Based Assessment on Sensitivity of Land Desertification

HU Mengtian¹, ZHANG Hui^{1,2}, GAO Jixi³, QIU Kuanbiao¹,
WANG Yansong⁴, LYU JiuJun⁴, JU Changhua¹

(1.Nanjing Institute of Environmental Sciences, ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2.Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3.Satellite Environment Center, ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 4.Liaoning Science and Technology Center for Ecological and Environmental Protection, Shenyang 110161, China)

Abstract:Northwestern China is the largest area of land affected by land desertification with fastest expanding, which causes a great loss to this region. It is of great significance to improve the classification accuracy of land sensitivity to desertification for the accurate identification of areas sensitivity to desertification, for the scientific delimitation of the land sensitivity to desertification ecological red lines and for formulating the control countermeasures of land desertification. In this paper, the wind erosion factor and soil moisture factor in revised wind erosion equation model were used to replace days on strong wind factor and climate dryness factor in the assessment of land sensitivity to desertification (general assessment of land sensitivity to desertification). And we assessed northwest China's land sensitivity to desertification by the revised wind erosion equation model based assessment of land sensitivity to desertification (modified assessment of land sensitivity to desertification) and general assessment of land sensitivity to desertification. The results show that: (1) the spatial distribution of soil moisture factor in modified assessment of land sensitivity to desertification is strongly coincided with that of the climate dryness factor in general assessment of land sensitivity to

收稿日期:2020-02-14

修回日期:2020-04-08

资助项目:国家重点研发计划“生态环境部事业费项目—生态保护地生态产品供给与生态安全评估”(2017YFC0506604);国家重点研发计划“生态环境部事业费项目—生态保护红线在空间规划中的应用研究”(2017YFC0506600)

第一作者:胡梦甜(1992—),女,江西吉安人,硕士,科研助理,主要从事生态系统服务功能评估方面研究。E-mail:2419547677@qq.com

通信作者:张慧(1968—),女,河南开封人,博士,研究员,主要从事生态文明建设规划、区域生态承载力和生态安全方面研究。E-mail:zhanghui@nies.org

高吉喜(1964—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,研究员,主要从事区域生态保护与修复、生态红线划定与生态安全格局研究。

E-mail: gjx@nies.org

desertification, at the same time, the spatial distribution of wind erosion factor in modified assessment of land sensitivity to desertification is strongly coincided with that of the days on strong wind factor in general assessment of land sensitivity to desertification; but in the area where meteorological stations scarcely and unevenly distribute, the soil moisture factor and wind erosion factor can more accurately describe the degree of land dryness and wind intensity; (2) compared with general assessment of land sensitivity to desertification method, the results of the modified assessment of land sensitivity to desertification method in northwest China could obtain higher spatial accuracy and more reasonable spatial distribution; the modified assessment of land sensitivity to desertification method can provide support for spatial refinement assessment on land sensitivity to desertification in the future.

Keywords: assessment of sensitivity of land to desertification; factor optimization; northwest China; RWEQ model

土地沙化敏感性是指干旱、半干旱和亚湿润干旱区土地对气候变化和人类活动等多种因素导致的土地沙化的敏感程度。据调查,我国大多数沙化土地与人类不合理的土地开垦、过度放牧、樵采、水资源利用不当等有关^[1-2]。自 20 世纪 90 年代以来,随着土地沙化的日趋严重,学界对土地沙化敏感性的研究不断增加。其中,以欧盟提出的土地沙化敏感性评估方法(MEDALUS 方法)最为著名,该方法以气候、植被、土壤和土地管理等要素作为土地沙化敏感性的评价指标,并在地中海、伊朗、巴西、非洲^[3]等地的土地沙化敏感性评价中得到广泛应用。国内沙化敏感性研究最早源于欧阳志云等^[4]提出的土地沙化敏感性评价方法(通用土地沙化敏感性评价方法),该方法也被应用到《生态功能区划技术暂行规程》和《生态保护红线划定指南》中的土地沙化敏感性评价。之后,我国学者采用该方法在国家、区域和流域尺度开展了系列研究^[5-10]。然而由于该方法中使用的大风天数和干燥度指数大都采用我国 2 400 多个气象站点的气象数据统计插值获取,气象站点空间分布不均,西北地区站点非常少,造成土地沙化敏感性评价结果往往与实际情况有较大偏差并且粗糙。因此,在空间上细化土地沙化敏感性评价结果,对精确识别沙化敏感区、科学划定土地沙化敏感性生态保护红线、制定土地沙化防治对策具有重要意义。

随着遥感信息技术以及风蚀模型的发展,土地沙化敏感性的评价因子精细化成为可能,如土壤湿度作为反映地区干湿变化的客观指标,可以用来代替干燥度^[11]。目前,土壤湿度遥感反演技术已经成熟,形成主动微波遥感法、被动微波遥感法、温度植被指数法和红外外遥感法等多种反演方法^[12]。大风天数作为土地沙化敏感性的重要指标^[13],长期以来大多采用气象站点数据空间插值而成,由于缺乏精确化数据,尤其是在我国气候差异较大的西北地区,气象站点分布少更为显著,插值结果往往出现“牛眼”现象,因而造成大风天数的

实际值与内插值出现较大的偏差且空间分布粗糙^[14]。目前已有学者意识到这一问题,尝试精细化大风天数因子,如孙滨峰等^[10]在评价新疆沙化敏感性的过程中,借鉴了土壤风蚀修正模型(Revised Wind Erosion Equation, RWEQ)中的气候因子修订了通用土地沙化敏感性评价方法的大风天数因子,因此孙滨峰等^[10]的土地沙化敏感性评价结果相对刘军会^[5]和王跃辉^[6]等的评价结果在空间上更为精细。

本研究尝试利用 RWEQ 模型中的土壤湿度和风力因子 2 个因子,对通用土地沙化敏感性评价方法中大风天数和干燥度指数因子进行优化,分析对比两种方法在土地沙化敏感性划定方面所存在的差异,以期提高土地沙化敏感性评价结果精度,提升生态空间管控水平。

1 研究区概况

本研究提取多年平均降雨量小于 600 mm 的地区作为研究区。该区位于中国的西北部,包括西藏自治区、新疆维吾尔自治区、青海省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、河北省、山西省,面积为 5.89×10^6 km²,占全国国土总面积的 61.14%。该区气候干旱、多风,地表多沙质,是沙化土地的聚集地带,虽然自然资源丰富,但水资源缺乏,人口较少,少数民族比重大,生物产量低,生态环境脆弱。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与处理

全国 1:10 万的沙漠化土地数据集来源于中国西部环境与生态科学数据中心,1990—2010 年中国西北部 862 个气象站点的日值气候数据集来自中国气象科学数据共享服务网,其中全国土壤属性数据来自中国科学院土壤研究所,NDVI 数据来自 SPOT/VEGETATION NDVI 卫星遥感产品数据,空间分辨率均为 1 km。地表温度数据采用 MOD21A2 数据产品,来自于 NASA-MODIS 网站。冬春季平均风速数据采用 world-

clim 数据合成,起沙风速阈值计算基于土壤类型和 NDVI 数据,空间分辨率为 1 km。

2.2 通用土地沙化敏感性评价方法

通用土地沙化敏感性评价方法包含干燥度指数、大风天数、土壤质地、植被覆盖 4 个因子。《生态保护红线划定指南》和《生态功能区划技术暂行规程》中土地沙化敏感性评价均采用相同的因子和方程,《生态保护红线划定指南》将各因子分为 3 级,《生态功能区划技术暂行规程》分为 5 级,为了使分级结果精细,本研究采用 5 级分级标准(表 1)进行单因子敏感性分级。在此基础上,通用土地沙化敏感性评价计算公式如下:

$$D_i = \sqrt[4]{I_i \times W_i \times K_i \times C_i}$$
 (1)

式中: D_i 为*i*评估区域的土地沙化敏感性指数; I_i , W_i , K_i , C_i 分别为*i*评估区域的干燥度指数(I),大风天数(W),土壤质地(K),植被覆盖(C)按照表 1 进行分级得到的敏感性等级值。

(1) 干燥度指数 I 。干燥度指数采用修正的谢

表 1 土地沙化敏感性指标分级标准

指标	大风天数 因子	干燥度 指数因子	风力 因子	土壤湿度 因子	土壤 质地	植被 因子	分级 赋值	分级 标准
不敏感	<1.5	<15	<0.3	≥0.65	基岩	茂密	1	1.0~2.0
轻度敏感	1.5~2	15~30	0.3~0.8	0.55~0.65	粘质	适中	3	2.1~4.0
中度敏感	2~5	30~45	0.8~1.5	0.45~0.55	砾质	较少	5	4.1~6.0
高度敏感	5~20	45~60	1.5~2.0	0.35~0.45	壤质	稀疏	7	6.1~8.0
极敏感	>20	>60	>2.0	<0.35	沙质	裸地	9	>8.0

2.3 基于 RWEQ 模型的修正土地沙化敏感性评价

RWEQ 模型是基于美国农田生态系统试验发展起来的定量土壤侵蚀量模型,具有很高的风蚀量模拟精度^[19],目前被广泛应用到不同尺度的土壤风蚀量和防风固沙量的计算^[20]。RWEQ 模型包括最大风蚀出现距离、气候因子、地表糙度因子、土壤可蚀性因子、土壤结皮因子、地形因子、植被覆盖 7 个指标,其中风力因子、土壤湿度与通用土地沙化敏感性评价方法中大风天数、干燥度指数含义相同,由于 RWEQ 模型是基于试验数据获取,同时相关参数大都可采用高精度遥感产品数据计算获取,空间上有更高的分辨率和准确性。

(1) 土壤湿度因子

$$SW = \frac{LST_{dry} - LST_i}{LST_{dry} - LST_{wet}}$$
 (4)

式中:SW 为土壤湿度因子; LST_i 为*i*评估区域的地表温度; LST_{dry} 为评估区域 NDVI 对应的最高地表温度,即干边; LST_{wet} 为评估区域 NDVI 对应的最低地表温度,即湿边。

(2) 风力因子

良尼诺夫公式^[15]计算,计算公式如下:

$$I = 0.16 \times \frac{\text{全年} \geq 10^{\circ}\text{C 积温}}{\text{全年} \geq 10^{\circ}\text{C 期间的降雨量}}$$
 (2)

式中: I 为干燥度指数。

(2) 大风天数 W 。一般选用冬春季节大于 6 m/s 大风天数^[16],通过空间插值获取研究区的大风天数分布图。

(3) 土壤质地因子 K 。土壤质地数据通过 1:100 万土壤属性数据获取,包括基岩、黏质土壤、沙质土壤、壤质土壤、砾质土壤等数据信息。

(4) 植被覆盖度 C 。植被覆盖度信息提取是在对光谱信号进行分析的基础上,通过建立植被覆盖度与归一化植被指数的转换关系,提取植被覆盖信息^[17],计算公式如下^[18]:

$$C = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$
 (3)

式中: C 为植被覆盖度;NDVI 为归一化植被指数; $NDVI_{min}$ 为纯土壤覆盖像元的最小归一化植被指数; $NDVI_{max}$ 为植被覆盖像元的最大归一化植被指数。

$$wf = u_2 - u_1$$
 (5)

$$u_1 = u_b \times e^{a \times C}$$
 (6)

$$u_b = \sqrt{60.818 \times d + 8.554 \times e^{0.74 \times SW}}$$
 (7)

式中:wf 为风力因子; u_2 为年平均风速(m/s); u_1 为阈值风速(m/s)^[21]; u_b 为裸露地表的临界侵蚀风速(m/s)^[22];a 为植被参数,为 0.975 14,C 为植被盖度,计算方法同公式(3);d 为土壤粒径(m);SW 为土壤含水量,计算方法同公式(4)。

(3) 基于 RWEQ 模型的修正土地沙化敏感性评价。采用 RWEQ 模型中风力因子代替通用土地沙化敏感性评价中大风天数,采用遥感产品数据衍生的土壤湿度分别代替干燥度指数。根据前人研究成果,风力因子基于江凌^[23]等在全国的研究结果(表 1)进行分级;土壤湿度因子基于土壤相对湿度干旱等级标准^[24](表 1)进行分级。修正土地沙化敏感性评价方法的计算公式如下:

$$D_i = \sqrt[4]{wf_i \times SW_i \times K_i \times C_i}$$
 (8)

式中: D_i 为沙漠化敏感性综合指数; wf_i , SW_i , K_i , C_i 分别为*i*评估区域风力因子、土壤湿度因子、土壤质地和植被覆盖的敏感性等级值。

3 结果与分析

3.1 因子结果对比

(1) 土壤湿度与干燥度指数比较。土壤湿度与干燥度指数在气象站点分布较多的区域, 两者在空间上有较强的一致性(附图 6)。空间上表现为大兴安岭地区、青藏高原南部地区和天山地区气候较为湿润, 以轻度敏感和不敏感为主, 塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地和哈顺戈壁到阿拉善高原地区气候较为干旱, 以高度敏感、极敏感为主。

在气象站点分布较少的区域, 土壤湿度相对干燥度指数空间分布上更为精细。如在塔克拉玛干沙漠中心地区, 气象站点较少, 只有塔中和若羌两个气象站点, 插值结果显示, 除站点周边干燥度较大外, 其余干燥度较小, 这与塔克拉玛干沙漠的实际干旱情况不符。此外, 干燥度指数因子显示呼伦贝尔、科尔沁和浑善达克地区分别为不敏感、不敏感和中度敏感地区, 而土壤湿度因子显示这 3 个地区均为高度敏感地区。通过以往的研究发现, 这 3 个地区蒸发量大降水量少, 非常干旱^[25-27]。

(2) 风力因子与大风天数比较。同样, 风力因子和大风天数因子在气象站点分布较多的区域, 两者空间上有一致性(附图 7)。空间上表现为大兴安岭、阿尔泰山、天山、昆仑山及研究区以南风力强度以不敏感和轻度敏感为主, 阴山、贺兰山和祁连山以北、天山东缘, 浑善达克及科尔沁地区风力强度以极敏感区为主。

在气象站点分布较少的区域, 采用气象站点空间插值方法得到的大风天数因子显示塔里木盆地南部、柴达木盆地位于轻度敏感和中度敏感区, 这与其他学者采用气象站点空间插值方法的结果相同^[28], 而风力因子显示这 2 个区域处于极敏感区, 这与实际风场数据更加相符。因此, 采用气象站点插值方法易遗漏气象站点密度低的大风区域。

3.2 两种土地沙化敏感性评价结果比较

修正土地沙化敏感性评价方法和通用土地沙化敏感性评价方法关于土地沙化敏感性的评价结果见表 2。修正土地沙化敏感性评价方法评估结果中, 中度敏感区面积最大, 为 $1.47 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占研究区面积的 24.93%; 极敏感区面积最小, 为 $7.08 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占研究区面积的 12.00%。其中, 土地沙漠化极敏感区主要分布在新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、甘肃省和青海省境内, 面积分别为 $3.04 \times 10^5 \text{ km}^2$, $2.02 \times 10^5 \text{ km}^2$, $1.00 \times 10^5 \text{ km}^2$, 9.69 万 km^2 , 西藏自治区、宁夏回族自治区、吉林省和山东省等地的土地沙漠化极敏感区面积较小, 均小于 1 万 km^2 。

通用土地沙化敏感性评价方法评估结果中, 高度

敏感区面积最大, 为 $1.46 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占研究区面积的 24.82%; 极敏感区面积最小, 为 $3.56 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占研究区面积的 6.03%。其中, 土地沙漠化极敏感区主要分布在新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、甘肃省和青海省境内, 面积分别为 $1.44 \times 10^5 \text{ km}^2$, 9.93 万 km^2 , 7.11 万 km^2 , 4.14 万 km^2 , 西藏自治区土地沙漠化极敏感区面积较小, 为 $1.91 \times 10^2 \text{ km}^2$ 。

表 2 修正土地沙化敏感性评价方法和通用土地沙化敏感性评价方法土地沙化敏感性评价结果

参数	修正土地沙化敏感性		通用土地沙化敏感性	
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
不敏感	1.07×10^6	18.08	6.46×10^5	10.97
轻度敏感	1.08×10^6	18.35	1.46×10^6	24.82
中度敏感	1.47×10^6	24.93	7.87×10^5	13.35
高度敏感	9.79×10^5	16.61	5.20×10^5	8.82
极敏感	7.08×10^5	12.00	3.56×10^5	6.03

从面积上看, 两种方法均显示极敏感区面积最小, 且省域极敏感区面积从大到小均为新疆维吾尔自治区、内蒙古自治区、甘肃省和青海省。但是, 修正土地沙化敏感性评价方法评估结果中中度敏感区面积最大, 而通用土地沙化敏感性评价方法评估结果中轻度敏感区面积最大, 这可能是因为通用土地沙化敏感性评价方法中有 25.97% 地区评估结果为空值。

从分布上看, 修正土地沙化敏感性评价方法和通用土地沙化敏感性评价方法都显示内蒙古北山地区、柴达木盆地、河西走廊北部、巴丹吉林沙漠北部边缘、狼山地区为土地沙漠化极敏感区, 但通用土地沙化敏感性评价方法得到的极敏感区范围较小, 没有覆盖准噶尔盆地西北部地区、塔里木盆地东部地区、柴达木盆地西部大部分地区、巴丹吉林沙漠南部地区和浑善达克西北部地区, 与实际不符(附图 8)。此外发现, 修正土地沙化敏感性评价方法显示呼伦湖西部和科尔沁沙地为高度敏感区, 部分区域为极敏感区, 这与学者在呼伦湖^[29]和科尔沁沙地的研究成果一致^[30]; 而通用土地沙化敏感性评价方法显示呼伦湖西部和科尔沁沙地均为中度和轻度敏感区, 这也与实际不符。同时, 修正土地沙化敏感性评价方法和通用土地沙化敏感性评价方法都显示陇中、陇东黄土高原以中度和轻度敏感性为主^[8], 但通用土地沙化敏感性评价结果中度和轻度敏感区呈条带状分布, 分界与降水量内插结果基本一致, 而修正土地沙化敏感性评价结果中度和轻度敏感区与土地覆被边界吻合。因此, 修正土地沙化敏感性评价方法模拟结果更准确和精细, 与实际现状更相符。

4 讨论与结论

(1) 土壤湿度与干燥度指数因子相比, 在气象站

点较多的东部地区两者有较强的空间一致性,而在气象站点较少的广大西部地区,土壤湿度能避免干燥度指数因气象站点少而低估干湿状况的情形,尤其是在塔克拉玛干沙漠中心地区。

(2) 风力因子与大风天数因子相比,在气象站点较多的东部地区两者有较强的空间一致性;而在气象站点较少的西部地区,风力因子更准确刻画了该区域的风蚀状况,尤其是在塔里木盆地南部和柴达木盆地地区。

(3) 基于土壤风蚀修正模型的修正土地沙化敏感性评价结果大大提高了通用土地沙化敏感性评价结果精度,尤其是在准噶尔盆地西北部地区边缘、塔里木盆地东部边缘地区、柴达木盆地西部大部分地区、巴丹吉林沙漠南部和浑善达克西北部地区。采用修正土地沙化敏感性评价方法的评价结果空间分布精细合理,该结果可为中国沙化敏感性空间精细化评估提供科学参考。

(4) 土地沙化敏感性在不同气候条件下,植被、土壤的沙化敏感性阈值是不同的,而文章采用统一的分级标准评价了我国西北地区的土地沙化敏感性,未考虑气候分区,如何建立不同气候区域的植被因子、土壤因子的土地沙化敏感性分级标准,是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] 屠志方,李梦先,孙涛.第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J].林业资源管理,2016(1):1-5,13.
- [2] 朱震达,陈广庭.中国土地沙质荒漠化[M].北京:科学出版社,1994.
- [3] Tavares J D P, Baptista I, Ferreira A J D, et al. Assessment and mapping the sensitive areas to desertification in an insular Sahelian mountain region Case study of the Ribeira Seca Watershed, Santiago Island, Cabo Verde [J]. Catena, 2015,128:214-223.
- [4] 欧阳志云,王效科,苗鸿.中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J].生态学报,2000,20(1):9-12.
- [5] 刘军会,高吉喜,马苏,等.中国生态环境敏感区评价[J].自然资源学报,2015,30(10):1607-1616.
- [6] 王跃辉,张林波,郭杨,等.中国六省土地沙漠化敏感性时空格局与趋势分析[J].水土保持研究,2014,21(5):132-137.
- [7] 赵明月,赵文武,靳婷,等.青海湖流域土地沙漠化敏感性评价[J].中国农学通报,2012,28(32):237-242.
- [8] 刘康,徐卫华,欧阳志云,等.基于 GIS 的甘肃省土地沙漠化敏感性评价[J].水土保持通报,2002,13(5):29-31.
- [9] 周利军,张淑花.黑龙江省西南部土地沙漠化敏感性评价[J].中国农学通报,2009,25(21):324-327.
- [10] 孙滨峰,王效科.新疆沙漠化敏感性评价研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,2015,40(7):108-112.
- [11] 赵俊芳,郭建平,徐精文,等.基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势[J].农业工程学报,2010,26(8):18-24.
- [12] 康悦,文军,张堂堂,等.卫星遥感数据评估黄土高原陆面干湿程度研究[J].地球物理学报,2014,57(8):85-95.
- [13] 周自江,王锡稳,牛若芸.近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J].应用气象学报,2002,13(2):193-200.
- [14] 郭婧,柳小妮,任正超.基于 GIS 模块的气象数据空间插值方法新改进:以甘肃省为例[J].草原与草坪,2011,31(4):41-45.
- [15] 中国科学院自然区划工作委员会.中国气候区划(初稿)[M].北京:科学出版社,1959.
- [16] 刘连友,王建华,李小雁,等.耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模测定[J].科学通报,1998,43(15):1663-1666.
- [17] Pan Y Z, Shi P J, Zhu W Q, et al. Measurement of ecological capital of Chinese terrestrial ecosystem based on remote sensing[J]. Science in China Series D,2005,48(6):786-796.
- [18] 美丽,都瓦拉,银山,等.基于植被覆盖特征的土地沙漠化敏感性评价:以乌珠穆沁草原为例[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):113-118.
- [19] 巩国丽,刘纪远,邵全琴.草地覆盖度变化对生态系统防风固沙服务的影响分析:以内蒙古典型草原区为例[J].地球信息科学学报,2014,16(3):426-434.
- [20] 申陆,田美荣,高吉喜,等.浑善达克沙漠化防治生态功能区防风固沙功能的时空变化及驱动力[J].应用生态学报,2016,27(1):73-82.
- [21] 慕青松,陈晓辉.临界侵蚀风速与植被盖度之间的关系[J].中国沙漠,2007,27(4):534-538.
- [22] 包为民.沙土含水率对起沙临界风速影响[J].中国沙漠,1996,16(3):316-319.
- [23] 江凌.中国生态系统防风固沙功能时空变化研究[D].北京:中国科学院生态环境研究中心,2015.
- [24] 国家气候中心.农业干旱监测预报指标和等级标准[EB/OL]. <https://www.ncc-cma.net/cn/>,2015.
- [25] 白美兰,郝润全,侯琼,等.内蒙古典型草原区地表干湿状况变化趋势及影响因素分析[J].中国农业气象,2011,32(2):208-213.
- [26] 王思如,雷慧闽,段利民,等.气候变化对科尔沁沙地蒸散发和植被的影响[J].水利学报,2018,48(5):535-544.
- [27] 白美兰,郝润全,邸瑞琦,等.气候变化对浑善达克沙地沙漠化影响的评估[J].气候与环境研究,2006,11(2):215-220.
- [28] 高婧.近 49 年新疆大风时空分布特征及环流背景分析[C]//中国气象学会. S5 全球典型干旱半干旱地区气候变化及其影响.北京:中国气象学会,2012.
- [29] 赵新华.呼伦湖周边地区沙化土地现状及防治对策[J].内蒙古林业调查设计,2018,41(5):7-8.
- [30] 乐涛.基于多指标的蒙东地区的潜在沙尘源区识别研究[D].南京:南京信息工程大学,2017.