

气象因子变化特征对典型地区荒漠化的影响研究

郝新忠^{1,2},石长春^{1,2*},高振梁¹,张瑞丽¹,高 荣^{1,2},张继平^{1,2},马雅莉¹,乔一娜¹

(1. 陕西省林业科学院,陕西 西安 710000;2. 陕西榆林毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站,陕西 榆林 719000)

摘要:气象因子是导致荒漠化的主要驱动力之一,了解荒漠化地区受气候变化的影响,为荒漠化的监测、预测和防治提供科学依据,研究气象因子变化特征对典型地区荒漠化的影响。以毛乌素沙地东南部榆林市西北部的沙质荒漠化土地为研究对象,并布置监测点。基于此,获得该区域的气象因子变化特征、NDVI遥感数据以及土壤变化数据。通过归一化植被指数监测植被生长状态,估计荒漠化面积,同时使用趋势分析法和Mann-Kendall法分析气象因子变化特征和荒漠化面积之间的关系。结果表明,该研究区域近10年来气象因子变化特征较为显著,降水增多、蒸发量减少、沙尘出现的天数也明显缩短,降水量与植被覆盖率和荒漠化面积的Spearman相关系数分别为0.91和-0.82,说明这些气象因子变化特征推动植被盖度呈现出增长变化趋势,有效减少荒漠化面积,说明近年荒漠化治理取得可观效果。

关键词:气象因子;变化特征;典型地区;荒漠化;植被指数;植被盖度

中图分类号:P467

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0196-07

Study on the Influence of Changing Characteristics of Meteorological Factors on Desertification in Typical Areas

HAO Xin-zhong^{1,2}, SHI Chang-chun^{1,2*}, GAO Zhen-liang¹, ZHANG Rui-li¹, GAO Rong^{1,2}, ZHANG Ji-ping^{1,2},
MA Ya-li¹, QIAO Yi-na¹

(1. Shaanxi Academy of Forestry Sciences, Xian 710000, Shaanxi, China;

2. National Positioning Observation and Research Station of Mu Us Sandy Land Ecosystem, Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: Meteorological factor is one of the main driving forces leading to desertification. In order to understand the impact of calamate factors on desertification, and to provide scientific basis for desertification monitoring, prediction and prevention, the impact of the meteorological factors on desertification in typical areas were examined. Taking the sandy land in the southeast of Mu Us Dersert, located in northwestern Yulin City as the research object, the observation points were set up, from which the relative information was obtained, such as variation characteristics of the meteorological factors, NDVI remote sensing data, and soil change data of the region. The vegetation growth status were monitored by normalized vegetation index to estimate desertification area. The relationship between meteorological factor changes and desertification area was analyzed by using trend analysis and Mann Kendall method. The results showed that the variations of meteorological factors in the study area in the past 10 years were relatively significant, manifested by the increase of precipitation, decrease of evaporation, and the significant decrease of the number of days of sand and dust storm. The Spearman correlation coefficients between precipitation and vegetation coverage, as well as desertification area, were 0.91 and -0.82, respectively, indicating that the meteorological factors promote the increase trend in vegetation coverage and effectively reduce desertification area. The results

收稿日期:2023-07-04 修回日期:2023-09-07

基金项目:国家林业和草原局荒漠化防治司项目(001)。

第一作者:郝新忠,高级工程师。研究方向:生态修复和荒漠化防治。E-mail:15109121958@163.com

*通信作者:石长春,正高级工程师。研究方向:沙漠治理、生态监测。E-mail:468058917@qq.com

demonstrated that desertification control has achieved considerable results in recent years.

Key words: meteorological factors; change characteristics; typical area; desertification; vegetation index; vegetation coverage

荒漠化是指原本有土地覆盖的干旱、半干旱地区或半干旱地区,由于气候变化、人类活动等多种因素的影响,导致土地逐渐失去植被、水源和肥力,变得贫瘠、干燥、裸露甚至沙漠化的过程。荒漠化是一种严重的土地退化现象,会对当地生态系统、环境和经济发展带来很大的影响^[1-2]。我国面积广袤,西北地区受到来自大陆气候的影响,加上海拔较高,多种地理、气候因素影响,土地荒漠化问题仍然较为严重。这种严重荒漠化也导致西北地区生态环境遭受严重破坏,制约当地经济发展,当地政府即使设法采取措施发展经济也会受到环境影响,导致当地发展举步维艰^[3-5]。

针对西北地区较为严重的荒漠化问题,有许多研究学者进行了研究分析,并且通过研究确定治理荒漠化的策略。马静利等^[6]探索气象因素与荒漠化地区的空气污染之间的关系,确定不同季节、环境、气候等因素对荒漠化地区空气污染的影响,并且制定能够缓解污染的策略,确定初步研究成果。罗晓玲等^[7]通过资料分析,确定近 60 a 来,西北地区出现沙尘暴的演变特征和该区域受到气象因子影响的情况,研究结果显示该区域的沙尘暴变化呈现逐年递减的趋势,并且确定大气环流是导致该地区发生沙尘暴的主要因素,该研究结果也为该区域未来沙尘暴治理提供方向。大多数学者近年对于荒漠化区域的研究都集中在中国北部的草原区域与西北干旱区域的绿洲,但是对于西北传统荒漠化区域的研究较少,西北地区荒漠化问题已经有几百年历史,具有较为重要的研究意义。荒漠化概念相关研究过程中,西北地区作为面积较广阔且荒漠化问题较突出的区域,是研究荒漠化内在机理最为主要的地区,对该地区展开深入研究,能够获得荒漠化主要机理问题^[8-11]。目前相关研究成果主要集中在内蒙古区域、青藏高原区域等,草地荒漠化研究成果比较充分,水资源的影响因素也分析较为充分,但是对于西北荒漠化问题还存在欠缺,不能针对具体情况制定详细治理措施^[12]。

所研究区域生态环境较为脆弱,气象因子变化多种多样,为此,研究气象因子变化特征对典型地区荒漠化的影响,获得较为有指导意义的指标数据。在研究区域布置监测点,通过遥感设备以及水分含量监测设备获取植被变化、土壤变化以及气象信息,使得研究更为准确。归一化植被指数,并结合趋势

分析法和 Mann-Kendall 法进行分析。通过了解气象因子变化特征对荒漠化的影响,为荒漠化的预防、监测和治理提供科学依据。通过对气候变化和荒漠化的关联研究,有助于制定合理的生态环境保护措施。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

所研究的典型地区是毛乌素沙地东南部榆林市西北部的沙质荒漠化土地,地理坐标为 38°N, 109°E, 海拔 900~1 200 m。该地区包含 7 个县(区),分别为定边、靖边、横山、神木、府谷、佳县和榆阳,这些县(区)又包含 99 个乡镇,该地区在植物地理学范畴中属于重要分界线,在地域层面上具有一定独特性和代表性。从榆林气象局收集该区域近 10 a 来的气象数据,综合该地区的地理地貌,确定该地区的气候特征,该地区划分为温带和暖温带半干旱大陆性季风气候,各个季节的气候特征都较为明显,白昼与夜晚的温差较大,全年中只存在较短时间的无霜期,气象数据显示,全年平均温度约为 10 °C,年降水量 400 mm。几乎每年的各个季节都会出现不同类型、不同程度的气象灾害,据统计,冰雹、霜冻、干旱等气象灾害出现频率较高,这些自然灾害对于当地环境、生态健康、荒漠化发展均造成严重影响。该地区存在不同土壤类型,风沙土 47.73 万 hm²,占土壤面积的 71.8%,黄土性土壤 12.55 万 hm²,占土壤面积的 18.9%。该区域的生态系统由多种类型组成,除荒漠以外,还存在较大面积的农田、草原等结构,以及大量适应荒漠环境的植被,特色植物包括沙柳(*Salix cheilophila*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)与苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等^[13]。

1.2 监测点布置

本研究主要探究气象因子变化特征对典型地区荒漠化的影响,所以需要布置监测点,监测该地区的气象情况、植被情况以及水分情况。使用地理信息系统技术,结合卫星,帮助确定监测点的位置。这些技术可以提供空间分布信息和辅助工具,从而更有效地布置监测点。监测点的位置应代表相应的地域单元,以确保监测结果的可靠性和代表性。为此,监测点的植被测点、土壤测点和气象测点样本分别为 8、5 个和 9 个。各测点布置情况见图 1。

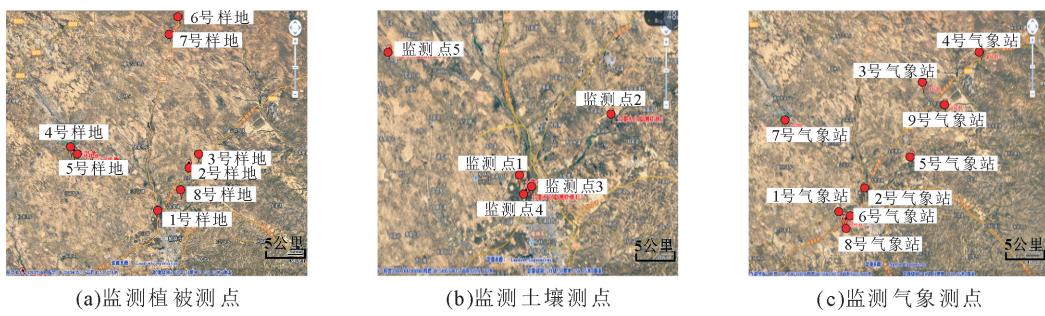


图 1 各测点布置

Fig. 1 Layout of each measuring point

通过图 1 中各个测点获得研究区域的植被变化信息、土壤变化信息以及气象信息。将该信息作为分析气象因子变化特征对典型地区荒漠化的影响的重要支撑数据。植被测点主要使用遥感设备拍摄图像,遥感设备型号为 S3 小型机载多光谱成像仪,具有 1 200 万像素,图像分辨率为 12 MegaPixel ($4\,000 \times 3\,000$ px),其光谱通道为红+绿+近红外—660/550/850 nm。收集植被的盖度、高度、生物量等情况,每年 5—9 月为数据采集时间,由于植物生长周期较长,需要长时间才能观测植被的详细变化,因此监测频次设置为 5 a/次^[14-16]。土壤监测主要获取研究区域的土壤水分、土壤覆盖等信息,监测过程中会使用遥感设备与其他水分含量监测设备,水分含量监测设备的型号为 TDR 3 000 电阻式土壤水分传感器,测量范围为 0%~100% (体积含水量),分辨率为 0.1%。因为土壤水分变化会受到植被生长影响,所以采集频次和时间与植被监测一致。气象监测需要监测有关研究区域的详细气象因子变化特征,包括平均气温与风速、水分蒸发量、降水量以及出现大风天气的日数^[17-18],该气象数据由各个气象站获得。

1.3 气象因子变化特征对荒漠化影响测算

对遥感影像进行解译,实现气象因子变化特征对荒漠化影响测算。这些特征包括植被盖度、土壤含水量、地表温度、高程等。这些特征的提取可以通过遥感指数计算。荒漠化监测的重要指标是植被覆盖指数(vegetation index, VI),该指数计算使用波段间比值运算提取植被,红外波段反射率 N_{IR} 与红光波段反射率 R_{ED} 均为重要参数。归一化植被覆盖度指数(normalized difference vegetation index, NDVI, 式中用 N_{DVI} 表示)是计算区域干旱情况、植被生长情况的关键指标,NDVI 的计算方法如式(1)所示。

$$N_{DVI} = \frac{(N_{IR} - R_{ED})}{(N_{IR} + R_{ED})} \quad (1)$$

气象因子变化特征也是影响 NDVI 的关键,气象因子变化特征对 NDVI 的影响程度如式(2)所示。

$$q = 1 - (\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 / N \sigma^2) \quad (2)$$

式中:某个气象因子变化特征对于因变量空间分布的解释力程度使用 q 表示; N 与 h 分别代表整个研究区域中的样本数量与气象因子分类; σ^2 与 N_h 分别代表整个研究区域的离散方差与监测点区域的样本数; σ_h^2 表示监测区域的离散方差; L 表示气象因子数量。

式(1)的详细原理如下:

使用遥感设备获得研究区域变化情况,遥感图像中包含多个像元,将这些像元作为混合像元,像元信息使用式(3)描述。

$$S = S_1 + S_2 \quad (3)$$

式中: S 代表研究区域整个遥感图像上的像元信息; S_1 与 S_2 分别代表土壤与植被像元信息。在全部像元中,由植被覆盖所占比例就是研究区域中的植被覆盖率;土壤的覆盖率则是全部像元“1”,减去植被面积。假如存在一个纯像元,植被或者土壤的贡献就是这个纯像元的信息。

$$S_1 = (1 - F_v) S_{soil} \quad (4)$$

$$S_2 = F_v \cdot S_{veg} \quad (5)$$

$$S = (1 - F_v) S_{soil} + F_v \cdot S_{veg} \quad (6)$$

式中: S_{veg} 与 S_{soil} 分别代表植被覆盖像元与土壤覆盖像元; F_v 用于描述植被覆盖度。

通过像元二分模型计算植被覆盖度,使用式(6)推导。假设植被和土壤 2 个部分提供一像元 NDVI 值,纯植被和纯土壤的像元 NDVI 值分别表示为 $N_{DVI\,veg}$ 和 $N_{DVI\,soil}$,受到气象因子特征变化产生的植被覆盖度计算如式(7)所示。

$$F_v = \frac{N_{DVI\,veg} - N_{DVI\,soil}}{N_{DVI\,veg} - N_{DVI\,soil}} q \quad (7)$$

通过遥感图像与实际采集相关数据,确定研究区域中植被覆盖与土壤覆盖面积,由此确定荒漠化变化面积。

1.4 气象因子变化特征显著性检验

使用趋势分析法与 Mann-Kendall 方法,确定多年来研究区域中气温、降水、蒸发量等气象因子变化特征对典型区域荒漠化的影响。趋势分析法下,各个气象因子变化特征的变化趋势如式(8)所示。

$$K_{\text{slope}} = \left[i \sum_{i=1}^n Y_i - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2 \right] / \left[\sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2 \right] \quad (8)$$

式中:使用 K_{slope} 描述各个气象因子变化特征的变化趋势斜率, i 表示各个年份; Y_i 表示第 i 年的气象因子特征(降水、蒸发量、风速等)变化。根据式(8)计算出的变化趋势斜率开展显著性检验, n 表示样本量。

使用 Mann-Kendall 方法分析气象因子突变检验,假设存在 n 个样本量的时间序列 Y , S_k 是依据该序列建立的秩序列。

$$S_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j < i} r_{ij}, r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } Y_i > Y_j \\ 0, & \text{当 } Y_i \geq Y_j \end{cases}, j = 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

式中: r_{ij} 表示时间序列起始点。

假设时间序列为随机独立状态, 使用式(10)描

述统计量。

$$U_{F_k} = \left[S_k - \frac{n(n+1)}{4} \right] / \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{72}} \quad (10)$$

式中: $k = 2, 3, \dots, n$ 。 U_{F_1} 为 0 时, U_{F_k} 属于标准正态分布, 同时依据时间序列计算获得的统计量序列。依据时间序列逆序, 重复计算过程, 设定 $U_{B_k} - U_{F_k}$, 同时绘制这一关系曲线, 如果 U_{B_k}, U_{F_k} 其中之一的值不低于 0, 说明序列呈现出上升趋势; 如果其中任意一个值 < 0 证明序列呈现下降趋势。提前设定一个显著性水平 α , 对照正态分布表, 如果 $|U_{F_k}| > U_\alpha$, 证明存在显著序列变化趋势; 如果 U_{B_k} 与 U_{F_k} 曲线相交, 交点位于临界线上, 该交点相对的时刻便是突变开始时间。

2 结果与分析

2.1 气象因子年均值分析

使用监测设备与遥感设备获得研究区域 8 个植被测点和 9 个气象因子测点的植被生长数据和关键气象因子。统计榆林沙区近 10 a 的关键气象因子和植被盖度年均值, 统计结果见表 1。

表 1 近 10 a 关键气象因子和植被盖度年均值变化

Table 1 Annual mean changes in key meteorological factors and vegetation coverage in the past 10 years

年份	降水量/mm	蒸发量/mm	平均气温/℃	平均风速/(m·s⁻¹)	8 级以上大风日数/d	浮尘日数/d	扬沙日数/d	沙尘暴日数/d
2011	445.4	1 602.9	8.7	2.5	18	0	6	3
2012	566.8	1 547.9	8.4	2.6	15	0	4	1
2013	562.5	1 706.1	10.0	2.7	5	0	5	2
2014	378.3	1 668.5	10.0	2.9	6	1	8	0
2015	451.0	1 665.5	10.0	2.8	17	1	7	0
2016	723.4	1 564.0	9.8	2.9	5	0	6	1
2017	630.0	1 580.0	9.5	2.8	3	1	4	0
2018	612.5	1 569.0	9.4	2.7	4	2	2	0
2019	592.0	1 498.0	9.8	2.6	3	1	6	0
2020	342.0	1 555.6	9.7	2.8	6	2	7	0
2021	353.2	1 499.9	9.2	2.6	3	0	3	0
年份	样地 1 植被盖度 (%)	样地 2 植被盖度 (%)	样地 3 植被盖度 (%)	样地 4 植被盖度 (%)	样地 5 植被盖度 (%)	样地 6 植被盖度 (%)	样地 7 植被盖度 (%)	样地 8 植被盖度 (%)
2011	335	800.0	1 000.0	394.6	226.7	797.8	1 085.3	
2012	1 100	1 100.0	1 300.0	352.0	290.26	712.4	887.2	
2013	1 300	1 400.0	1 400.0	252.2	207.2	888.0	1 080.3	
2014	975	740.0	485.0	137.6	146.6	887.6	655.7	340.0
2015	1 050	850.0	645.0	213.9	131.8	830.2	949.1	380.0
2016	1 120	1 230.0	1 310.0	117.9	106.8	229.3	198.4	514.0
2017	875	606.0	644.0			187.5	209.0	704.0
2018	800	780.0	620.0			203.0	194.0	825.0
2019	970	1 140.0	680.0			330.7	289.2	970.0
2020	682	1 125.3	861.3			865.6	656.1	550.8
2021	1 370	1 320.0	860.4			1 031.9	651.2	921.6

由表 1 可看出,除 2020 年和 2021 年气象因素

不太理想以外,研究区域近 5 a 的降水量明显高于

前5 a降水量、蒸发量与平均气温均有所降低,自2016年以后8级以上大风日数、浮尘日数、扬尘日数、沙尘暴日数相较于2016以前明显减少,说明近5 a来,研究区域的气象因子变化特征发生明显变化,这些变化有利于植被生长。通过这些数据可以发现,不同年份之间的蒸发量存在一定的波动和变化,2017—2019年,蒸发量相对较低,说明种植植物可以引起蒸发量的波动和变化。经过环境治理后,作物可以降低地表蒸发,为土壤中的植物留下更多水分,使该地区气象因子呈现出良性发展的趋势。通过观察这些数据,可以看出不同年份和样地之间的植被盖度存在一定的波动和变化。

为反映气象因子变化对荒漠化的影响,引入Spearman相关系数,当Spearman相关系数为正时,表明2个变量呈正相关关系。当Spearman相关系数为负时,表明两者呈负相关关系。其计算公式为

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (11)$$

式中: ρ 表示Spearman相关系数; d_i 表示每对数据观测的等级差; N 表示样本数量。

根据式(11)计算, $\rho = 0.91$,说明降水量与植被覆盖率变化呈现正相关关系,且相关性较强。降水量增加,植被覆盖率增加。

2.2 气象因子变化特征对荒漠化影响

在不同年份获取研究区域的5个土壤测点和9个气象因子测点的数据。以此得到植被覆盖面积、土壤面积以及荒漠化面积变化曲线见图2。

对降水量和荒漠化面积进行相关性分析,通过计算得到 $\rho = -0.82$,表明降水量和荒漠化面积呈负相关,降水量增加,荒漠化面积减少。结合图2可知,近10 a监测点的研究区域降水量整体增加,植

被面积逐年增加,荒漠化面积逐年降低,说明国家投入大量精力、人力,治理毛乌素沙地东南部榆林市西北部的沙质荒漠化问题,取得一定成绩。

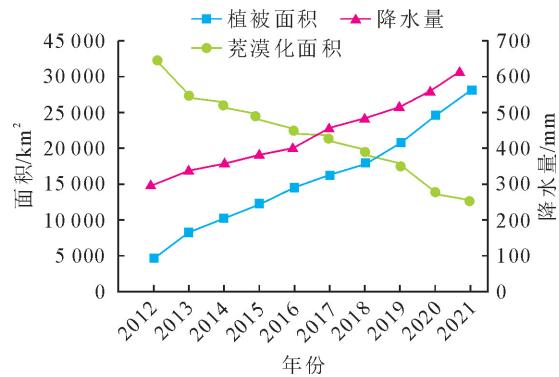


图2 不同年期气象因子及荒漠化面积变化

Fig. 2 Changes of meteorological factors and desertification area in different years

2004年研究区域的沙漠化情况与2021年研究区域遥感影像与解译统计图见图3。

由图3可知,该研究区域的监测点在治理前荒漠化较为严重,治理后植物盖度显著上升,气象因子中的年蒸发量与土地荒漠化关联最紧密。通过计算NDVI发现,近几年的气象因子变化特征发生明显变化,经过环境治理,植被留下更多水分,使该地区气象因子呈现出良性发展,蒸发量呈下降趋势,这意味着样地水分供应相对充足,有利于植物的生长。且沙尘大风天气减少,使得荒漠化面积减小。气象因子与当地植被变化、土壤含水量呈现正相关关系,典型地区的土地荒漠化问题得到良好治理,绿洲面积显著提升。这些变化不仅改善了当地的生态环境,还为可持续发展提供了良好的基础。然而,还需要进一步监测评估治理效果的持久性和可持续性,并继续采取适当的措施来保护和管理该地区的生态系统。

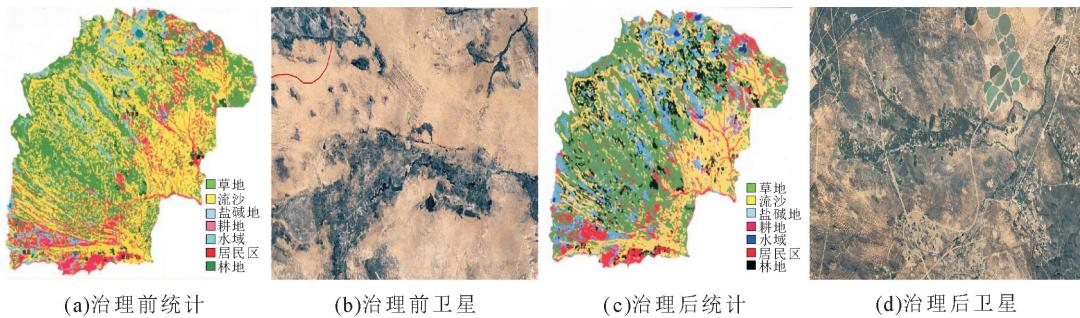


图3 遥感影像与解译统计

Fig. 3 Remote sensing images and interpretation statistical maps

3 结论与讨论

荒漠化区域的监测与治理是目前可持续发展战略中不可忽视的部分,也是高效分析荒漠化成因的

关键切入点。荒漠化的关键因素是植被破坏,而植被生长受到各种气象因子变化特征的影响,为此,研究气象因子变化特征对典型地区环境荒漠化的影响。分析气象因子年均值、植被情况年均值和气象

因子变化特征对荒漠化影响效果,以毛乌素沙地东南部榆林市西北部的沙质荒漠化土地作为研究地,布置植被测点、土壤测点和气象测点,通过计算植被覆盖指数测算气象因子变化特征对荒漠化影响,并采用趋势分析法与 Mann-Kendall 方法对气象因子变化特征进行检验。

研究区域近 5 a 的降水量呈增加趋势、蒸发量逐年减少、平均气温和风速均有所降低,8 级以上大风日数、浮尘日数、扬沙日数、沙尘暴日数逐年减少,气象因子变化特征明显,有利于植物的生长。

通过提高植物覆盖率可以有效降低地表蒸发表量,保留土壤中的水分,降低土壤的荒漠化水平,使该地区土壤呈良性发展趋势。

经过治理后的土地沙漠化水平得到明显改善,降水量整体增加,蒸发量逐渐降低,植被面积逐年增加,有效降低了沙尘大风天气的发生频率,提升了绿洲面积,为可持续发展奠定了良好基础。

由此可知,近年来研究区域降水量上升、蒸发量变少,出现大风的天数也有所减少,沙尘出现时间也缩短,这种气象因子变化特征有利于植被生长,使得植被盖度显著上升,降低土地荒漠化的扩展面积,有效抑制荒漠化发展。

参考文献:

- [1] 程小云,张琴,兰芳芳,等.河西走廊草地荒漠化动态及驱动因素[J].中国沙漠,2022,42(6):134-141.
CHENG X Y,ZHANG Q,LAN F F,*et al.* Dynamic characteristics and driving factors of grassland desertification in Hexi corridor[J]. Journal of Desert Research,2022,42(6):134-141. (in Chinese)
- [2] 师楠,马建忠,江期川,等.金沙江头塘小流域 5 种人工林种子库研究[J].森林工程,2021,37(3):44-51.
SHI N,MA J Z,JIANG Q C,*et al.* Species diversity of five plantation communities in Toutang small watershed of Jinsha River[J]. Forest Engineering,2021,37(3):44-51. (in Chinese)
- [3] 邱凤婷,过志峰,张宗科,等.大湄公河次区域植被覆盖时空变化特征及其与气象因子的关系[J].南京林业大学学报:自然科学版,2022,46(2):187-195.
QIU F T,GUO Z F,ZHANG Z K,*et al.* Spatio-temporal change characteristics of vegetation coverage and its relationship with meteorological factors in the Greater Mekong subregion[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition,2022,46(2):187-195. (in Chinese)
- [4] 张荣,毕华兴,焦振寰,等.生长季刺槐树干液流昼夜变化特征及其对气象因子的响应[J].浙江农林大学学报,2022,39(6):1238-1246.
ZHANG R,BI H X,JIAO Z H,*et al.* Diurnal and nocturnal changes in stem sap flow of *Robinia pseudoacacia* during growing season and its response to meteorological factors[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2022,39(6):1238-1246. (in Chinese)
- [5] 李江荣,高鄰,陈康,等.藏东南急尖长苞冷杉林空气负离子浓度特征及其与气象因子的关系[J].东北林业大学学报,2021,49(10):77-82,103.
LI J R,GAO T,CHEN K,*et al.* Characteristics of negative air ion concentration and its relationships with meteorological factors in *Abies georgei* var. *smithii* forest of Southeast Tibet [J]. Journal of Northeast Forestry University,2021,49(10):77-82,103. (in Chinese)
- [6] 马静利,左忠,王家洋,等.荒漠草原无林地 PM_{2.5}、PM₁₀ 时间变化特征及与气象因素的关系[J].中国环境监测,2021,37(5):67-75.
MA J L,ZUO Z,WANG J Y,*et al.* Temporal variation characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in non-woodland in desert steppe and their relationship with meteorological factors[J]. Environmental Monitoring in China,2021,37(5):67-75. (in Chinese)
- [7] 罗晓玲,李岩瑛,严志明,等.近 60 年河西走廊地区沙尘暴发生演变特征及其气象影响因子[J].水土保持研究,2021,28(5):254-260,267.
LUO X L,LI Y Y,YAN Z M,*et al.* Evolution characteristics of sandstorm and meteorological influence factors in Hexi corridor in recent 60 years[J]. Research of Soil and Water Conservation,2021,28(5):254-260,267. (in Chinese)
- [8] 乔圣超,喻朝庆,黄逍,等.“碳中和”下光伏对西北荒漠生态因子与植被分布的影响[J].草地学报,2023,31(5):1520-1529.
QIAO S C,YU C Q,HUANG X,*et al.* The impacts of centralized photovoltaic power plants on ecological drivers and vegetation development in China's Northwestern desert regions under the carbon neutrality strategy[J]. Acta Agrestia Sinica,2023,31(5):1520-1529. (in Chinese)
- [9] 张家政,闵志强,王得军,等.基于延安市不同植被类型 NDVI 对气象因子影响及空间异质性[J].西北林学院学报,2021,36(6):55-64.
ZHANG J Z,MIN Z Q,WANG D J,*et al.* Effects of NDVI on meteorological factors and spatial heterogeneity based on different vegetation types in Yan'an city[J]. Journal of Northwest Forestry University,2021,36(6):55-64. (in Chinese)
- [10] 凌成星,刘华,纪平,等.基于无人机影像 VDVI 指数的植被覆盖度估算:以陕西神木防护林工程研究区为例[J].森林工程,2021,37(2):57-66.
LING C X,LIU H,JI P,*et al.* Estimation of vegetation coverage based on VDVI index of UAV visible image-using the shelterbelt research area as an example[J]. Forest Engineering,2021,37(2):57-66. (in Chinese)
- [11] 秦豪君,杨晓军,马莉,等.2000-2020 年中国西北地区区域性沙尘暴特征及成因[J].中国沙漠,2022,42(6):53-64.
QIN H J,YANG X J,MA L,*et al.* Characteristics and causes of regional sandstorms in Northwest of China from 2000 to 2020[J]. Journal of Desert Research,2022,42(6):53-64. (in Chinese)
- [12] 王秀英,周秉荣,苏淑兰,等.青藏高原高寒草甸和荒漠碳交换特征及其气象影响机制[J].生态学报,2023,43(3):1194-1208.
WANG X Y,ZHOU B R,SU S L,*et al.* Carbon exchange characteristics and meteorological influence mechanism of al-

- pine meadow and desert in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1194-1208. (in Chinese)
- [13] 程文举,席海洋,司建华,等.内陆河流域浅山区土壤水热时空动态及其对气象因子的响应[J].高原气象,2022,41(6):1435-1445.
- CHENG W J, XI H Y, SI J H, et al. Temporal and spatial dynamic change of soil water-heat and its response to meteorological factors in an inland river basin in low coteau area[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(6): 1435-1445. (in Chinese)
- [14] 崔梦瑞,白林燕,冯建中,等.京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究[J].环境科学学报,2021,41(2):373-385.
- CUI M R, BAI L Y, FENG J Z, et al. Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(2): 373-385. (in Chinese)
- [15] 杨中杰,包永红,王立中.基于遥感图像的复杂种植区施肥均匀性监测[J].计算机仿真,2022,39(11):244-247,370.
- YANG Z J, BAO Y H, WANG L Z. Monitoring of fertilization uniformity in complex planting areas based on remote sensing images[J]. *Computer Simulation*, 2022, 39 (11): 244-247, 370. (in Chinese)
- [16] 韩新生,许浩,刘广全,等.不同时间尺度山杏树干液流密度对环境因子的响应[J].西北林学院学报,2023,38(3):31-39.
- HAN X S, XU H, LIU G Q, et al. Responses of the tree trunk sap flow density of *Armeniaca sibirica* to environmental factors in different time scales[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(3): 31-39. (in Chinese)
- [17] 黄悦,李思恩.气象因素对民勤地区参考作物腾发量变化的贡献分析[J].中国农业大学学报,2021,26(5):118-128.
- HUANG Y, LI S E. Contribution analysis of meteorological factors on the variation of reference crop evapotranspiration in Minqin area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(5): 118-128. (in Chinese)
- [18] 冯万富,申明海,单燕祥,等.河南鸡公山林区PM_{2.5}污染与气象因子全年时尺度相关性分析[J].西北林学院学报,2022,37(3):37-44.
- FENG W F, SHEN M H, SHAN Y X, et al. Correlation analysis between PM_{2.5} pollution and meteorological factors in Jigong mountain forest area of Henan Province[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022, 37(3): 37-44. (in Chinese)

(上接第 195 页)

- [10] 程钢,王敬宇,杨杰,等.基于改进 α -shape 算法的三维点云树冠体积计算方法[J].农业机械学报,2021,52(5):175-183.
- CEHNG G, WANG J Y, YANG J, et al. Calculation method of 3D point cloud canopy volume based on improved α -shape algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 175-183. (in Chinese)
- [11] 林松,田林亚,毕继鑫,等.三维激光扫描数据的单木树冠体积精确计算[J].测绘科学,2020,45(8):115-122.
- LIN S, TIAN L Y, BI J X, et al. Accurate calculation of single-tree crown volume based on 3D laser scanning data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45 (8): 115-122. (in Chinese)
- [12] FRANCESCHI E, MOSER-REISCHL A, RAHMAN M A, et al. Crown shapes of urban trees-their dependences on tree species, tree age and local environment, and effects on ecosystem services[J]. *Forestry*, 2022, 13(5): 748.
- [13] 刘凯,夏苗,杨晓梅.一种平面点集的高效凸包算法[J].工程科学与技术,2017,49(5):109-116.
- LIU K, XIA M, YANG X M. An effective 2D convex hull algorithm[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49 (5): 109-116. (in Chinese)
- [14] 刘斌,王涛.一种高效的平面点集凸包递归算法[J].自动化学报,2012,38(8):1375-1379.
- LIU B, WANG T. An efficient convex hull algorithm for planar point set based on recursive method[J]. *Acta Automatica Sinica* 2012, 38(8):1375-1379. (in Chinese)
- [15] 吴文周,李利番,王结臣.平面点集凸包 Graham 算法的改进[J].测绘科学,2010,35(6):123-125.
- WU W Z, LI L F, WANG J C. An improved Graham algorithm for determining the convex hull of planar set[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35 (6): 123-125. (in Chinese)
- [16] 王凯,支煜,陈浩,等.一种基于 Graham 扫描算法的空间点云结构化算法研究[J].现代电子技术,2018,41(14):139-142.
- WANG K, ZHI Y, CHEN H, et al. Research on space point cloud structuring algorithm based on Graham scanning algorithm[J]. *Modern Electronics Technique*, 2018, 41(14): 139-142. (in Chinese)
- [17] CHENG L, WU Y, CHEN S, et al. A symmetry-based method for lidar point registration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(1):285-299.