

毛乌素沙地降水和气温变化特征及其与植被因子的关系

高建伦^{1,2}, 王晶晶², 任永庆³, 魏孝荣^{2,4}, 谢佰承⁵

(1.陕西省榆林市气象局, 陕西 榆林 710014; 2.西北农林科技大学
资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.陕西省水利厅 河湖运行处, 西安 710004; 4.中国科学院 水利部
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118)

摘要:为了研究毛乌素沙地土地利用/覆被变化(LUCC)对气候变化的影响,采用观测资料减去再分析法(OMR)和土地利用转移矩阵等方法,分析毛乌素沙地沙漠化逆转期前后(1980—1999年和2000—2016年)两个时期LUCC对气候变化的影响,讨论该时期LUCC引起区域气候效应的驱动机制。结果表明:(1)沙漠化逆转后期与前期相比,气温和降水变化特征存在差异。沙地和非沙地气候变化无明显差异,下垫面物质组成对气候变化影响不显著;(2)降水量变化主要受到地面蒸散发的影响。气温变化是LUCC引起蒸散发、反射率、净辐射量等变化的综合效应,LUCC对气温的影响更明显;(3)相比平均气温,最高气温和最低气温对于LUCC的响应更敏感。因此,植被恢复显著改变了毛乌素沙地降水和温度的变化特征,而且这种变化与下垫面物质组成无关。

关键词:降水量; 气温; LUCC; 气候效应

中图分类号:Q948.11

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0200-06

Changes of Precipitation and Temperature and Their Relationships to Vegetation in the Mu Us Desert

GAO Jianlun^{1,2}, WANG Jingjing², REN Yongqing³, WEI Xiaorong^{2,4}, XIE Baicheng⁵

(1.Yulin Meteorological Office of Shaanxi Province, Yulin, Shaanxi 710014, China; 2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.River and Lake Management Office, Shaanxi Provincial Department of Water Resources, Xi'an 710004, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.Meteorological Disaster Prevention and Mitigation Key Laboratory of Hunan Province, Changsha 410118, China)

Abstract: In order to study the effect of land use/vegetation cover change (LUCC) on climate change in the Mu Us Desert, we used observation minus reanalysis (OMR) and matrix of dynamic change of land use to analyze the impact of LUCC on climate change before and after desertification reversal in Mu Us Desert and assessed how LUCC drove regional climate change in the study region. The results showed significant differences in precipitation and temperature changes before and after desertification reversal. However, the changes in precipitation and temperature were similar between sandy and loess sites, indicating that the underlying surface situation had not significantly influenced the response of precipitation and temperature. Change in precipitation was mainly regulated by evapotranspiration. The LUCC resulted in the changes in evapotranspiration, reflectivity, net radiation, etc., ultimately led to change in temperature. The result showed that effect of LUCC on temperature was greater than the effect on precipitation. Compared with the average temperature, the maximum and minimum temperature were more sensitive in responding to LUCC. These results suggested that the changes of precipitation and temperature were mainly caused by vegetation restoration regardless of substance composition of underlying surface.

Keywords: precipitation; temperature; LUCC; climate effect

人类活动导致的土地利用/覆被变化(LUCC)已经成为大气环境系统变化的重要驱动因子。LUCC通过地表覆盖的改变影响蒸散发、地表反射率以及潜热通量等因素,导致大气与地表之间的能量交换、热量平衡和水文过程发生变化,从而对区域和全球气候环境系统产生影响^[1-3]。LUCC与区域气候变化关系的研究也因此成为目前研究人类活动与全球气候变化之间相互作用的热点,受到不同领域研究者的关注^[4]。

目前关于 LUCC 对气候变化驱动的研究主要集中在东北、华南、华北地区,而对于沙地/沙漠区域研究的较少^[5-6]。毛乌素沙地位于我国黄土高原与鄂尔多斯高原交界区域,也是我国北方农牧交错带的重要组成区域,生态环境极其脆弱^[7]。过去 40 a 来,受大规模植被恢复措施的影响,毛乌素沙地 LUCC 发生明显改变,沙漠化得到遏制,20 世纪 90 年代末沙漠化进程出现逆转^[8-10],该区也因此成为研究沙地 LUCC 与气候变化关系的理想平台。

早期的研究表明,毛乌素沙地温度呈显著升高的趋势,平均升高速率为 $0.054^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ^[11-12],降水变化不显著^[13-14]。目前研究者已经分析了毛乌素沙地气象要素、植被覆盖度动态变化及其对气候变化响应^[15-17],但较少有研究关注这一地区土地利用/覆被变化引起的气候效应。而且前期的气候要素分析以整体年序列为主,未考虑 LUCC 导致沙漠化逆转前后时期气象要素的差异,而对这方面的认识是辨析该区气候变化驱动因子的基础。

本研究选取毛乌素沙地周边 9 个气象站点 1980—2016 年不同时间尺度的降水和温度数据,借助 1999 年退耕还林政策的实施所造成的地表植被大幅变化,分析该区 LUCC 和气候条件的关系,同时区分这种关系在沙地和非沙地的差异,以期从土地利用/覆被变化角度揭示毛乌素沙地气候变化的驱动机制,为深入认识沙区气候变化提供科学依据。

1 研究区概况和数据方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地位于 $36^{\circ}48' - 40^{\circ}12' \text{N}$, $106^{\circ}11' - 110^{\circ}56' \text{E}$,总面积约 9.5 万 km^2 ,年平均气温为 $6.0 \sim 8.5^{\circ}\text{C}$ 。该区属于温带半干旱大陆性季风气候,降水主要集中在 7—9 月份,年均降水量 250~400 mm。毛乌素沙地是中国四大沙地之一,处于北方农牧交错带中段,生态环境极度脆弱。由于自然气候变化和不合理的土地利用,该区流沙不断扩大,加速毛乌素荒漠化进程。20 世纪 70 年代,该区域进行植物治沙研究,实施防沙治沙措施。尤其 1999 年以后,实行退耕

还林(草),通过人为治理和保护,毛乌素沙地植被覆盖度显著增加^[18]。

1.2 气象要素变化趋势分析

本文选择毛乌素沙地及周边的 9 个气象站点 1980—2016 年的年均降水和气温数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),其中缺失数据采用缺失日期所对应的前后两年同一时期数据的平均值进行插补。根据土地利用变化特征,将气象数据分为退耕前后两个时期(1980—1999 年和 2000—2016 年)进行分析。本文采用 Mann-Kendall 非参数检验法对气象数据时间序列的变化趋势进行显著性检验,Thiel-Sen 斜率估计法计算气象数据在时间序列的变化率 β 。

1.3 观测资料减去再分析法(OMR)

观测资料减去再分析法(OMR)是由 Kalnay 等^[19]提出,主要利用美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析资料在同化时没有使用地面观测数据的特点,导致再分析资料对土地利用和植被覆盖度的变化不敏感。因此,观测资料减去再分析资料的差值能够反映 LUCC 变化对气象数据的影响。该方法已经广泛运用于 LUCC 对区域气候影响的研究^[20-21]。本文利用观测资料减去再分析(OMR)方法研究 LUCC 对气温的影响,OMR 气温是指气象站点气温减去再分析资料地面 2 m 气温。本研究选择时间序列为 1980—2016 年的再分析资料地面 2 m 气温数据,该数据来源于 NCEP 气候预报系统,分辨率为 0.2° (<https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.0/>)。

1.4 土地利用转移矩阵和 NDVI 变化率

土地利用类型转移矩阵可以定量表征某一时期土地利用类型之间的转变情况^[22]。本研究基于 ArcGIS 软件,对 1980—2000 年和 2000—2015 年土地利用类型数据分别进行矢量交叉分析(Intersect),获取 1980—2000 年和 2000—2015 年的土地利用转变情况。1980 年、2000 年、2015 年的 30 m 栅格的土地利用数据,根据不同时期 Landsat TM 和 ETM+ 影像目视解译获取。

归一化植被指数(NDVI)能够表征区域植被覆盖的状况。NDVI 作为植被覆盖度指标被运用于植被变化的研究。NDVI 数据分别来源于 AVHRR (1981—1985 年)、Landsat 5 (1986—1999 年)、MODIS/Terra 传感器(2000—2016 年)。NDVI 的变化率代表植被覆盖度随时间的变化趋势,其公式为:

$$s = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中: s 为 NDVI 的变化率; n 为时间跨度; i 为时间排列序号; $NDVI_i$ 为第 i 年的 NDVI。当 $s > 0$ 时, NDVI 随时间呈增加趋势, 反之, 为减少趋势。

2 结果与分析

2.1 降水和温度变化

通过分析毛乌素沙地及周边气象站点年降水量变化趋势发现, 退耕还林草措施显著改变了毛乌素沙地降水和温度的变化趋势, 但是这种影响与下垫面物质组成(沙地和非沙地)无关(表 1)。1980—1999 年, 除盐池站外, 8 个气象站点的年降水量变化均不显著, 该时段沙地与非沙地的年降水量变化无明显差异。2000—2016 年, 榆林、神木、盐池和横山站的年降水量呈显著增加趋势, 其余站点增加不显著。而且, 2000—2016 年降水量年增幅大于 1980—1999 年, 沙地和非沙地的年降水量变化无明显差别(表 1), 表明植被恢复显著促进了该区降水量的增加, 而且这种促进作用在神木、榆林、盐池和横山显著大于其他站点。

表 1 毛乌素沙地及周边降水和温度变化趋势

年份	指标	沙地				非沙地				
		鄂托克旗	东胜	盐池	定边	陶乐	榆林	神木	靖边	横山
1980—1999	降水量/(mm·a ⁻¹)	-1.349	3.895	6.587*	3.981	3.258	-3.376	-0.899	0.923	-3.325
	平均气温/(℃·a ⁻¹)	0.091***	0.113***	0.083***	0.093***	0.091***	0.098***	0.119***	0.097***	0.087***
	最高气温/(℃·a ⁻¹)	0.078***	0.101***	0.089***	0.078**	0.077***	0.114***	0.121***	0.106***	0.112***
	最低气温/(℃·a ⁻¹)	0.127***	0.116***	0.093***	0.096***	0.121***	0.077***	0.125***	0.088***	0.056***
2000—2016	降水量/(mm·a ⁻¹)	0.175	9.677	7.283*	5.800	0.300	7.488*	13.463***	0.758	5.777*
	平均气温/(℃·a ⁻¹)	-0.026	0.044*	0.019	0.038	0.018	0.021	-0.050**	0.032	0.004
	最高气温/(℃·a ⁻¹)	0.022	0.020	0.012	0.023	0.041*	-0.063*	-0.067***	0.029	0.018
	最低气温/(℃·a ⁻¹)	-0.098***	0.062**	0.104	0.055*	-0.010	0.079**	-0.046**	0.071*	0.004

注: *, **, *** 分别表示数据通过 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

2.2 降水和温度变化的驱动因子

1980—2016 年毛乌素沙地 OMR 平均气温、最高和最低气温分别与该区平均气温、最高和最低气温之间呈显著正相关(图 1)。OMR 气温指标与该区气温指标标准化回归系数分别为 0.639(最低气温), 0.623(最高气温), 0.504(平均气温), 表明毛乌素沙地 LUCC 对气温的影响程度为最低气温 > 最高气温 > 平均气温。因此, LUCC 对毛乌素沙地的气温变化具有重要的驱动作用, 而且最高和最低气温对于 LUCC 的响应相比平均气温敏感。

毛乌素沙地降水量与蒸散发之间呈极显著正相关关系($R^2 = 0.35$, $n = 333$, $p < 0.001$)。2000—2016 年毛乌素气温的降低以及植被恢复导致蒸散发增强, 大气中水汽含量增加, 进一步增加该区的降水量。因此, 植被恢复对蒸散发的正效应是该区降水量

1980—1999 年, 毛乌素沙地及周边地区的平均气温、最高和最低气温均显著升高(表 1), 3 个气温指标在 9 个气象站点之间的增长速率分别介于 0.083~0.119, 0.077~0.114, 0.077~0.127℃/a。2000—2016 年, 仅有 2 个气象站(东胜和神木)的平均气温变化显著, 3 个气象站(陶乐、榆林和神木)的最高气温变化显著, 6 个气象站(鄂托克旗、东胜、榆林、神木、定边、靖边)的最低气温变化显著, 其余气象站的其他气温指标变化均不显著。毛乌素沙地及周边气象站点的最高气温和最低气温的变化不一致, 而且沙地与非沙地之间无明显差异。

毛乌素沙地及周边 2000—2016 年的平均气温和最高气温增加速率小于 1980—1999 年, 而且鄂托克旗和神木的平均气温以及榆林和神木的最高气温呈现降低趋势(表 1)。除盐池和榆林站外, 其他站点 2000—2016 年的最低气温变化幅度均小于 1980—1999 年, 而且鄂托克旗、神木和陶乐呈现下降趋势(表 1)。这些结果表明, 毛乌素沙地的植被恢复显著抑制了该区气温的升高。

增加的主要因素。

2.3 毛乌素沙地土地利用和覆被变化

毛乌素沙地土地利用变化特征在 1980—1999 年、2000—2015 年期间显著不同。1980—1999 年期间, 土地利用变化方式主要为草地和未利用地(其他)转变为耕地, 沙地转变为草地。其中, 耕地和低覆盖度草地分别增加 561.8, 1 575.1 km², 中、高覆盖度草地分别减少 554.1, 757.8 km²(表 2)。2000—2015 年期间, 主要为耕地转变为林地和草地, 未利用地(其他和沙地)和水体转变为草地。耕地、未利用地、水体面积分别减少 481.1, 1 131.5, 169.9 km², 高覆盖度草地减少 2 974.9 km², 林地和建设用地分别增加 392.9, 845.3 km², 中、低覆盖度草地分别增加 2 465.4, 1 053.8 km²(表 3)。

植被恢复显著增加了毛乌素沙地及周边地区

NDVI 值。1981—1999 年、2000—2016 年期间 NDVI 平均值分别为 0.108, 0.161。此外, 植被恢复前 (1980—1999 年), NDVI 随时间变化趋势不显著, 然而, 植被恢复后 (2000—2016 年), NDVI 随时间呈显著增加趋势 (图 2A)。

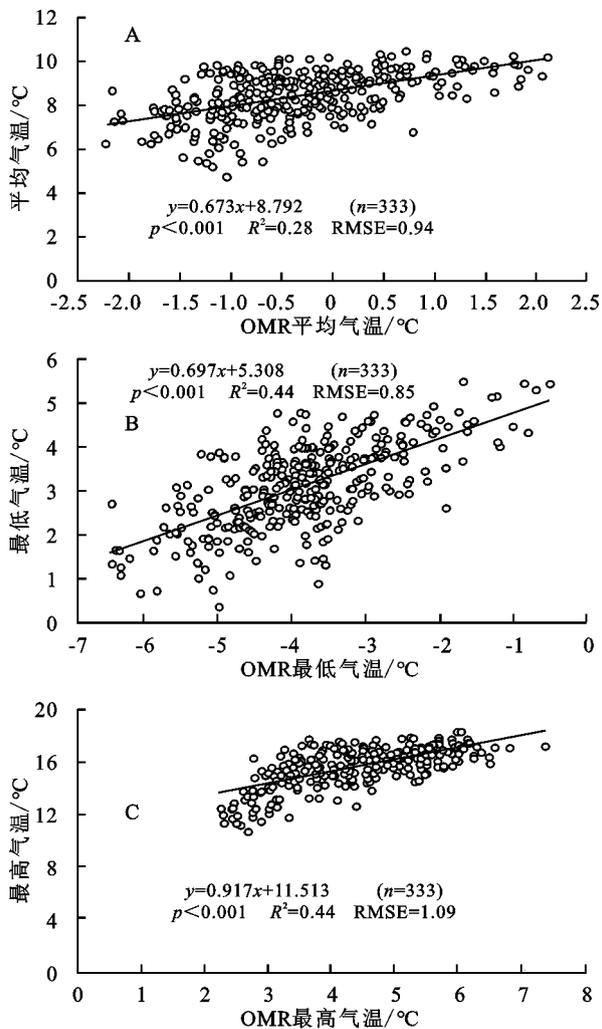


图 1 观测资料减去再分析 (OMR) 气温与气温的关系

3 讨论

本研究中, 1980—2016 年气候变化与 LUCC 呈阶段性变化特征。1980—1999 年毛乌素沙地及周边气象站的降水量无显著变化, 然而, 2000—2016 年榆林、神木、盐池、横山的年降水量变化趋势显著增加。该时期降水量显著增加的气象站位于毛乌素沙地 NDVI 年增长速度较高的区域。2000—2016 年土地利用方式以林、草植被增加为主, 林草引起潜热通量增加, 感热通量减少, 地表温度降低^[16]。同时, 植被覆盖度的增加引起土壤湿度增加^[17]。气温和植被的共同作用增强了区域蒸散发, 使得大气中的水汽含量增加, 造成 2000—2016 年降水量增加。全球陆面数据同化系统 (GLDAS) 获取的该区蒸散发数据也表明, 与 1980—1999 年相比, 2000—2016 年该区各气象站的蒸散发显著增强 (图 2B)。

土地利用和覆被变化引起地表生物物理属性改变, 导致地表热量平衡和地气间能量交换的改变, 从而引起气温变化。毛乌素沙地 LUCC 主要变化为: 1980—2000 年以草地和沙地转为耕地, 高、中覆盖度草地转为低覆盖度草地为主; 2000—2015 年以耕地转为林、草地和沙地转变为草地为主, 植被覆盖度明显增加。耕地转为林、草地, 反射率增加, 地面净辐射减少, 温度降低^[23]。与林地和草地比, 沙地潜热通量低, 感热通量高^[24]。沙地转变为草地和林地后, 地表温度和区域气温降低^[25-26], 与之相反, 沙地扩张则会增加区域温度^[27]。因此, 该区 2000—2016 年气温增长低于 1980—1999 年, 并且退耕后 66.67% 的气象站点气温随时间的变化不显著。全球陆面数据同化系统 (GLDAS) 获取的该区反照率数据也表明, 该区 2000—2016 年各气象站点的平均反照率显著高于 1980—1999 年 (图 2C)。

表 2 毛乌素沙地及周边 1980—2000 年土地利用转移矩阵

年份	土地利用类型	2000 年									总计
		耕地	林地	水域	建设用地	草地			未利用地		
						高覆盖度	中覆盖度	低覆盖度	沙地	其他	
1980	耕地	13975.4	8.3	10.4	19.5	5.5	41.5	44.9	42.1	3.9	14151.5
	林地	25.0	2402.8	0.2	0.6	4.4	28.1	10.8	25.5	24.7	2522.1
	水域	44.4	4.0	1245.3	1.4	15.2	23.4	7.3	3.4	68.8	1413.2
	建设用地	0.5	0.0	0.0	506.5	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	507.3
	高覆盖度	26.9	22.4	12.4	4.5	9507.9	539.0	274.6	93.0	71.1	10551.8
草地	中覆盖度	273.9	48.1	24.6	3.4	86.7	23450.7	925.0	184.2	60.9	25057.5
	低覆盖度	260.4	32.7	18.7	12.5	106.6	254.6	16239.1	413.2	59.5	17397.4
未利用地	沙地	78.7	46.2	0.6	2.9	50.0	90.0	1333.9	16996.1	11.6	18610.0
	其他	28.2	3.2	18.0	0.9	17.6	76.0	136.7	8.3	2726.6	3015.5
	总计	14713.2	2567.7	1330.2	552.2	9794.0	24503.4	18972.4	17765.8	3027.1	93226.2

km²

表 3 毛乌素沙地及周边 2000—2015 年土地利用转移矩阵

km²

年份	土地利用类型	2015 年									总计
		耕地	林地	水域	建设用地	草地			未利用地		
						高覆盖度	中覆盖度	低覆盖度	沙地	其他	
2000	耕地	12814.8	313.7	38.9	195.0	337.4	710.4	241.9	16.6	44.7	14713.4
	林地	65.5	2162.8	6.6	26.7	102.9	101.0	51.2	25.1	25.9	2567.7
	水域	51.0	4.9	969.9	37.3	23.0	41.4	139.9	9.7	53.1	1330.2
	建设用地	48.2	7.6	2.6	443.2	9.8	12.8	20.7	4.7	2.6	552.2
	高覆盖度	151.2	66.2	17.1	48.2	5704.6	3402.0	252.4	130.9	21.4	9794.0
	中覆盖度	267.1	217.1	20.8	213.8	169.3	21149.3	2007.7	367.6	90.7	24503.4
	低覆盖度	646.2	94.1	18.8	254.1	265.8	920.3	15971.3	546.8	255.0	18972.4
	沙地	128.6	83.1	21.9	139.6	137.5	481.1	963.5	15703.8	106.7	17765.8
	其他	59.3	11.2	63.7	39.5	68.7	150.4	377.5	79.1	2177.7	3027.1
	总计	14232.0	2960.7	1160.2	1397.4	6819.1	26968.7	20026.1	16884.3	2777.9	93226.2

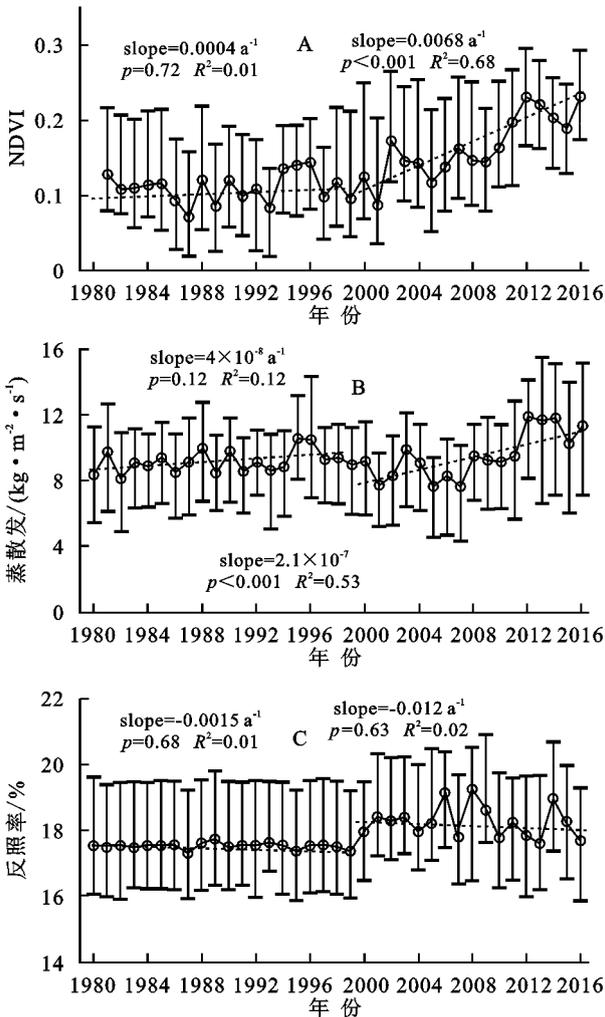


图 2 毛乌素沙地归一化植被指数 (NDVI)、气象站蒸散发和反照率变化

本研究虽然分析了毛乌素沙地主要气候因子与植被恢复之间的关系,但是尚未详细区分不同土地利用方式对气候影响的内在机制,因此,未来研究需加强沙地与林、草、建设用地相互转变对气候变化影响的生物地球物理机制研究。

4 结论

(1) 1980—1999 年,毛乌素沙地及周边降水量变化不显著,升温明显;2000—2016 年,该区域降水量呈逐渐增加趋势,升温趋势变缓。

(2) 该区降水和温度变化及其对退耕措施的响应在沙地与非沙地差异较小,因此,大的空间尺度上,气象模型构建可以忽略下垫面物质的差异。

(3) 该区温度变化是地表覆盖、反射率、净辐射量等变化的综合效应,最高和最低气温对退耕的响应比平均气温的响应更敏感。退耕后降水增加是植被覆盖度增加和地表温度降低所造成的水文小循环过程加剧造成的。

参考文献:

- [1] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. Science, 1997, 277: 494-499.
- [2] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309: 570-574.
- [3] 华文剑,陈海山,李兴.中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J].地球科学进展, 2014, 9(29): 1025-1036.
- [4] Pielke Sr R A. Atmospheric science. Land use and climate change[J]. Science, 2005, 310: 1625-1626.
- [5] Zhang X Z, Tang Q H, Zheng J Y, et al. Warming/cooling effects of cropland greenness changes during 1982—2006 in the North China Plain [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(2). DOI: 10.1088/1748-9326/8/2/02403.
- [6] Dong S Y, Yan X D, Xiong Z. Varying responses in mean surface air temperature from land use/cover change in different seasons over Northern China [J]. Acta Ecologica Sinca, 2013, 33(3): 167-171.
- [7] 李旭亮,杨礼筱,田伟,等.中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述[J].应用生态学报, 2018, 29(10):

- 3487-3495.
- [8] 李晓凤.毛乌素沙地沙漠化逆转过程及成因分析[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [9] 韩雪莹,杨光,秦富仓,等.毛乌素沙地近 30 年沙漠化土地时空动态演变格局[J].水土保持研究,2019,26(5):144-157.
- [10] Zhang M M, Wu X Q. The rebound effects of recent vegetation restoration projects in Mu Us Sandy land of China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106228.
- [11] 朱芳莹.中国北方四大沙地近 30 年时空变化及气候影响[D].南京:南京大学,2015.
- [12] 胡永宁,王林和,张国胜,等.毛乌素沙地 1969—2009 毛主要气候因子时间序列小波分析[J].中国沙漠,2013,33(2):390-395.
- [13] 刘宇峰,杜忠潮,原志华,等.近 60 a 毛乌素沙地东缘主要气候要素的多时间尺度变化特征[J].干旱区资源与环境,2016,30(9):121-127.
- [14] Li Y R, Cao Z, Long H L, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017,142(2):697-715.
- [15] 郭紫晨,刘树林,康文平,等.2000—2015 年毛乌素沙区植被覆盖度变化趋势[J].中国沙漠,2018,38(5):1099-1107.
- [16] Liang P, Yang X P. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors[J]. *Catena*, 2016,145:321-333.
- [17] 王立新,刘华民,杨劼,等.毛乌素沙地气候变化及其对植被覆盖的影响[J].自然资源学报,2010,25(12):2030-2039.
- [18] Dai Z G. Intensive agropastoralism; dryland degradation, the Grain-to-Green Program and islands of sustainability in the Mu Us Sandy Land of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010,138(3/4):249-256.
- [19] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. *Nature*, 2003,423:528-531.
- [20] 金凯.中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [21] Nayak S, Mandal M. Impact of land use and land cover changes on temperature trends over India[J]. *Land Use Policy*, 2019,89. DOI:10.1016/j.landusepol.2019.104238.
- [22] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.
- [23] 刘纪远,邵全琴,延晓东,等.土地利用变化影响气候变化的生物地球物理机制[J].中国自然杂志,2014,36(5):356-363.
- [24] 秦大河.气候系统变化与人类活动[M].北京:气象出版社,2003.
- [25] 姜蓝齐.黑龙江省近百年 LUCC 对区域气温变化的影响及机制研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017.
- [26] Shen X J, Liu B H, Lu X G. Effects of land use/land cover on diurnal temperate range in the temperate grassland region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,575:1211-1218.
- [27] 邵璞,曾晓东.土地利用和土地覆盖变化对气候系统影响的研究进展[J].气候与环境研究,2012,17(1):103-111.

(上接第 199 页)

- [16] 刘孟竹,王彦芳,裴宏伟.退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J].中国沙漠,2021,41(1):174-182.
- [17] 欧阳志云,王桥,郑华,等.全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查评估[J].中国科学院院刊,2014,29(4):462-466.
- [18] 王彦芳,裴宏伟.1980—2015 年河北坝上地区生态环境状况评价与对策研究[J].生态经济,2018,34(1):186-190,236.
- [19] 王强,康慕谊,邢开雄.基于水资源约束的张家口坝上生态经济发展研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2011,47(6):618-624.
- [20] 胡曾曾.首都水源涵养区和生态环境支撑区的生态补偿量化研究[D].北京:首都经济贸易大学,2018.
- [21] 刘晓,张学霞,徐新良,等.河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响[J].北京林业大学学报,2019,41(8):94-104.
- [22] 汪言在,董一帆,苏正安.基于土地利用与植被恢复情景的土壤侵蚀演变特征[J].自然资源学报,2020,35(6):1369-1380.
- [23] 刘孟竹,王彦芳,裴宏伟.基于土地利用变化的河北省坝上地区景观生态风险评价[J].水土保持通报,2020,40(4):303-311.
- [24] 吴瑞,刘桂环,文一惠.基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化[J].环境科学研究,2017,30(3):406-414.
- [25] 李瑾璞,夏少霞,于秀波,等.基于 InVEST 模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(7):854-861.
- [26] 吴一帆,张璇,李冲,等.生态修复措施对流域生态系统服务功能的提升:以潮河流域为例[J].生态学报,2020,40(15):5168-5178.
- [27] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China [J]. *Journal of Hydrology*, 2006,328(3):548-558.