

高娜,胡光印,董治宝.共和盆地沙地空间分布格局变化特征[J].中国沙漠,2025,45(1):204-214.

共和盆地沙地空间分布格局变化特征

高娜,胡光印,董治宝

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 沙地空间分布格局是沙物质经流水作用汇聚后,受到风力长期侵蚀、搬运、堆积的结果。为了采用量化的方式度量沙地空间分布格局并分析其变化特征,本研究选取青藏高原东北部的共和盆地作为研究区,基于1980—2020年土地利用数据,采用地理重心模型,并提出了迁移度模型,计算沙地重心和迁移度,分析了共和盆地的沙地空间分布格局变化特征。结果表明:共和盆地的沙地迁移距离自西北向东南递减,其中沙珠玉河流域最大,为43.43 km;沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域组成的区域次之,为39.93 km;沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域与龙羊峡东侧流域组成的区域略小,为31.88 km;龙羊峡东侧流域最小,为5.74 km。整个盆地沙地迁移方向主要为东南向($99.46^{\circ}\sim 126.80^{\circ}$)。迁移度在盆地内呈现出西北向东南递减的趋势,沙珠玉河流域为0.83,沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域组成的区域为0.61,沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域与龙羊峡东侧流域组成的区域为0.30,龙羊峡东侧流域为0.15。共和盆地沙地空间分布格局随时间的变化趋势不明显,沙地空间分布格局作为区域环境因素长期作用的结果具有一定的稳定性。

关键词: 空间分布格局; 迁移度; 地理重心; 沙地; 共和盆地

文章编号: 1000-694X(2025)01-204-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00154

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

空间格局分析是地理学研究的主题,许多学者开展了关于各种地理要素空间分布格局的相关研究。人类活动的空间分布格局,如人口流动^[1-3]、土地利用^[4-5]、文化资源和遗产^[6-8]等;自然要素的空间分布格局,如气候^[9]、物种^[10-11]、土壤^[12-14]、风沙^[15-16]等;社会经济活动的空间分布格局,如石油资源流动^[17]、区域经济^[18]等。空间分布格局分析为揭示地理要素之间的联系、组织方式、相互作用以及驱动因素提供支撑,能够加强空间过程的可解释性和预测性^[19]。

沙地/沙漠作为地球环境系统的主要组成部分,对气候变化十分敏感^[20],其地表环境会随气候变化发生改变,而沙地/沙漠的空间格局、风沙活动强度等变化对区域的辐射平衡和气候具有重要意义^[21-22],因此,沙地/沙漠的空间格局研究可为揭示区域环境变化提供参考。此前已有许多学者开展

了关于沙地/沙漠空间格局及其变化的研究,徐春霞^[15]分析了共和盆地末次盛冰期以来的特征时段的沙地空间格局演变过程,重建了特征时段的沙地边界,并探讨了不同时段沙地面积变化;周亚利等^[23]研究并确定了末次盛冰期和全新世大暖期浑善达克沙地边界的变化;冯晗等^[16]分析了末次盛冰期和全新世大暖期中国季风区西北缘沙漠空间格局,初步确定了腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠等在末次盛冰期和全新世大暖期的空间范围。但是,目前关于沙地空间分布格局的表征方法多局限于其分布位置、面积及其边界位置变化的定性描述^[15-16, 23-25],缺乏对区域性沙地空间分布格局的量化表达。因此,本文将着眼于共和盆地的沙地空间分布格局及其变化特征分析,采用量化的表达方式,从沙物质被侵蚀、搬运、堆积的过程角度分析沙地空间分布格局的形成和变化特征。

共和盆地位于青藏高原东北部,是青藏高原

收稿日期:2024-09-29; 改回日期:2024-11-07

资助项目:国家自然科学基金项目(42071004);陕西省2021年自然科学基金基础研究计划(定向委托)项目(2021JCW-17);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0403)

作者简介:高娜(2000—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事风沙地表过程研究。E-mail: gaona_mail@163.com

通信作者:胡光印(E-mail: guangyinhu@snnu.edu.cn)

风沙集中分布的区域^[26]。20世纪80年代,由于龙羊峡水库的建立,共和盆地的沙地开始受到广泛关注^[27]。共和盆地作为一个完整、封闭的地貌单元,四周群山环绕,内部沙地广泛分布,且沙源较为明确^[28],非常适合作为研究区域性风沙活动的区域。因此,本文选取共和盆地作为研究区,提取各个年份、各个流域的沙地分布范围,分析共和盆地沙地空间分布格局及其变化特征,以期对共和盆地的风沙环境形成过程研究和沙漠化治理提供参考。

1 研究区概况

共和盆地是位于青藏高原东北部的一个新生代断陷盆地(35°20′07″—37°04′27″N、98°41′47″—101°28′43″E,图1),总面积19 580.26 km²,地处昆仑、祁连山和秦岭三大山系的交会处^[11,29]。盆地呈东宽西窄的葫芦形,沿西北—东南方向延伸,四面环山,地势西北高东南低,平均海拔3 346.96 m^[27]。中新世至中更新世早期为共和盆地沉陷阶段,盆地内部被曲流充分发育的河流泛滥平原相和浅湖相的交替堆积,形成一套巨厚的河湖相地层^[29]。此地层与典型的湖相沉积地层不同,具有四周山地的粗碎屑沉积(残坡积、重力堆积和冲洪积等成因)遭到剥

蚀后,经流水作用在盆地中心汇聚进而相变为河湖相细粒沉积的特征^[30]。中更新世晚期以来盆地随着构造抬升向干旱方向发展,巨厚的河湖相地层成为风沙活动丰富的物质来源,并且在盆地盛行风和开阔地形的影响下,大量沙物质不断地被风吹扬携带到盆地中东部堆积^[28]。因此,盆地内部广泛发育风沙地貌,塘格木、沙珠玉的英德尔海以西为风蚀地貌区,塔拉滩、木格滩等为风积地貌区^[31]。盆地地表以固定、半固定沙丘为主,集中分布于沙珠玉河谷、塔拉滩和木格滩,沙丘类型有新月形沙丘(链)、格状沙丘、复合型链状沙丘、沙山、沙垄、抛物线沙丘等^[32-33]。

共和盆地受到东亚夏季风和中纬度西风带的共同控制^[34],气候属于高寒干旱半干旱大陆性气候,平均年降水量324.7 mm,年平均气温4~6℃,太阳辐射强烈,光照充足,四季分明,昼夜温差大,气候以干旱、寒冷、多风为主要特点^[35]。主风为西北风,年平均风速1.7~2.7 m·s⁻¹,冬、春季是共和盆地的风季,平均风速大于夏、秋季,平均年大风日数36.4 d^[31,35-36]。共和盆地水系复杂,有以沙珠玉河为主的内流河水系,黄河及其支流组成的外流水系,以及季节性流水。盆地内有水库数座,其中龙羊峡水库为黄河上游最大的首级多年性调节水库,它的

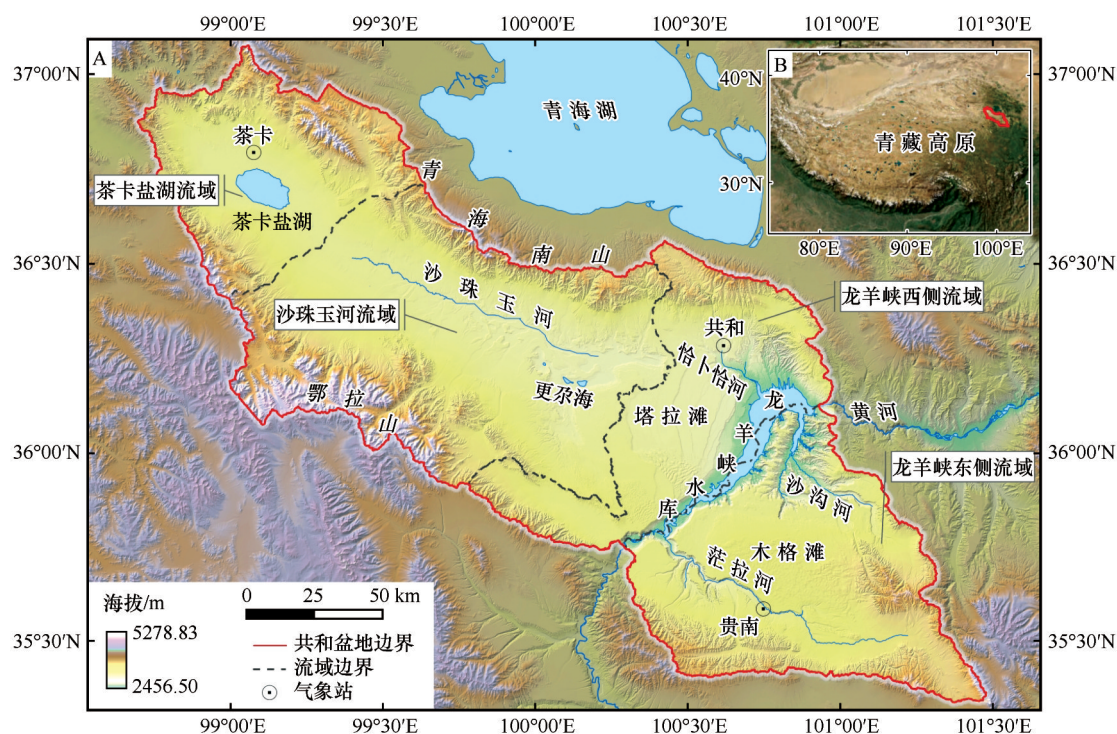


图1 研究区范围

Fig.1 Scope of the study area

修建(1976年开始)对共和盆地的生态环境具有深远意义^[37]。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及处理

本研究使用的数据包括土地利用数据、数字高程模型、遥感影像等,具体规格和来源见表1。数据均统一投影为 Krasovsky_1940 坐标系进行后续处理。

本研究以共和盆地 1980—2020 年土地利用数据为基础进行分析。研究区土地利用类型包含低、中、高覆盖度草地,以及沙地、旱地、盐碱地、水库坑塘、戈壁、农村居民点、河渠、城镇用地、湖泊等 22 种。研究主要提取其中编码为 61(指地表为沙覆盖,植被覆盖度在 5% 以下的土地,包括沙漠,不包括水系中的沙漠)的沙地进行研究,根据遥感影像,并结合实地调查,对研究区局部地区不合理的范围进行删改得到用以本次研究的各年份沙地数据(图 2)。

表 1 数据类型及来源

Table 1 Data types and sources

数据类型	数据格式	分辨率	数据来源
土地利用	栅格	30 m×30 m	http://www.resdc.cn
Copernicus 数字高程模型	栅格	30 m×30 m	https://panda.copernicus.eu
Landsat 遥感影像	栅格	30 m×30 m	https://earthexplorer.usgs.gov

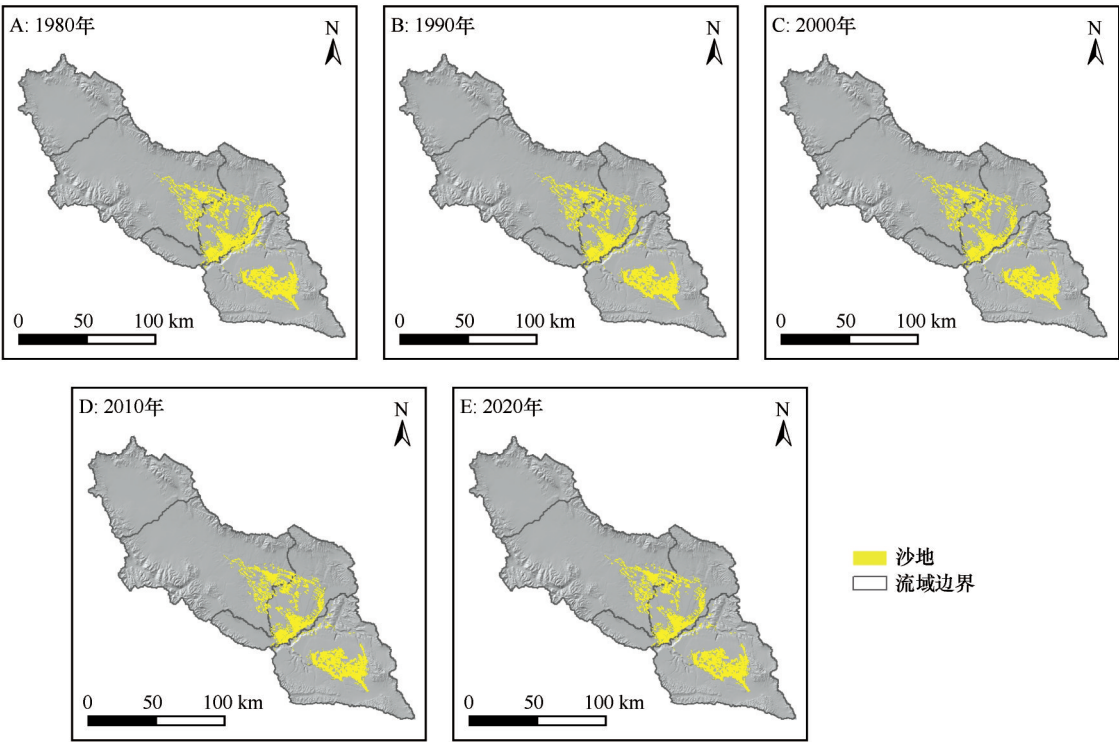


图 2 1980—2020 年共和盆地沙地分布范围

Fig.2 Distribution of sandy land in Gonghe Basin from 1980 to 2020

2.2 研究方法

2.2.1 流域提取

流域提取以 Copernicus DEM 数据为基础,利用 ArcGIS 10.8 的水文分析功能,以汇流累积量作为河网提取的阈值,再基于河网生成流域单元。在此基

础上,根据水文特征、遥感影像、实际地形调整不恰当的流域边界范围,将共和盆地划分为 4 个流域:茶卡盐湖流域、沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域和龙羊峡东侧流域(图 1)。

水系的搬运作用为风沙地貌的发育、形成提供物质基础,以流域单元为基础研究沙地空间分

布格局,能够更为全面地从源-汇系统的角度明确风沙活动的过程。将各个流域联系起来共同作为一个区域,可以反映出风沙的侵蚀、搬运、堆积全过程。

共和盆地可以分为内流区和外流区,茶卡盐湖流域作为独立的内流区不参与共和盆地的风沙活动过程^[38],沙珠玉河流域为盆地中部的内流区,龙羊峡东、西两侧流域构成盆地的外流区。沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域在地表由于风力作用在风沙流、风沙沉积、沙丘移动过程中产生紧密的物质联系。黄河自南向北穿过共和盆地,并在龙羊峡两岸形成约400 m的高差,将塔拉滩沙地与木格滩沙地分隔开,因此木格滩沙地较为独立,在沙地重心的计算中应成为独立的流域单元。

2.2.2 地理重心模型

地理重心模型最早应用于人口地理学的研究中^[39],后来相关学者将其引进到耕地、土地破碎度、土地利用、沙漠化的研究中^[40-43]。本文将地理重心模型应用于沙地空间分布格局变化的研究中,量化区域性的沙地空间分布特征。利用ArcGIS10.8的Mean Center模块进行计算:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ii} x_{ii}}{\sum_{i=1}^n w_{ii}} \quad (1)$$

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ii} y_{ii}}{\sum_{i=1}^n w_{ii}} \quad (2)$$

式中: X_t 、 Y_t 分别是第 t 年沙地重心的经、纬度; w_{ii} 是第 t 年沙地斑块的面积; x_{ii} 、 y_{ii} 分别为第 t 年沙地斑块的几何中心经、纬度; n 为沙地斑块的

数量。

2.2.3 迁移度模型

为了表征共和盆地沙物质通过流水作用汇聚后,再经风力侵蚀、搬运、堆积形成的沙地空间分布格局,本文提出“迁移度模型”。

区域重心与沙地重心之间的距离,定义为“迁移距离(d)”;沙地重心相对于区域重心所在的方位角,定义为“迁移方向(θ)”;迁移距离与从区域重心沿迁移方向至区域边界交点间距离(r)的比值,即为“迁移度(M)”。“迁移度模型”旨在度量特定区域内,沙物质先由流水侵蚀和搬运汇聚至区域中心沉积(用区域重心指代该中心),随后在风力作用下,沙物质被侵蚀、搬运至远离区域中心的下风向堆积,形成的沙地空间分布格局。“迁移距离”反映风力作用的强度,“迁移方向”反映风力作用的方向,“迁移度”反映区域内沙地的空间分布格局:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan 2(x_2 - x_1, y_2 - y_1) \quad (4)$$

$$\theta_{deg} = (\theta \times \pi / 180 + 360) \bmod 360 \quad (5)$$

$$M = \frac{d}{r} \quad (6)$$

式中: x_1 、 y_1 为区域重心的经、纬度; x_2 、 y_2 为沙地重心的经、纬度; d 为迁移距离,即区域重心到沙地重心的直线距离; θ 为弧度制方位角; θ_{deg} 为角度制方位角; M 为迁移度; r 是区域重心沿迁移方向至区域边界交点间距离。

迁移度概念模型见图3。 $M=0$ 时,沙物质不存在迁移过程,就地堆积,沙地重心与区域重心重合; $0 < M \leq 1$ 时,沙物质在区域内完成被侵蚀、搬运、堆积的全过程,沙地重心在区域内; $M > 1$ 时,沙物质跨区域传输后堆积,沙地重心在区域外。

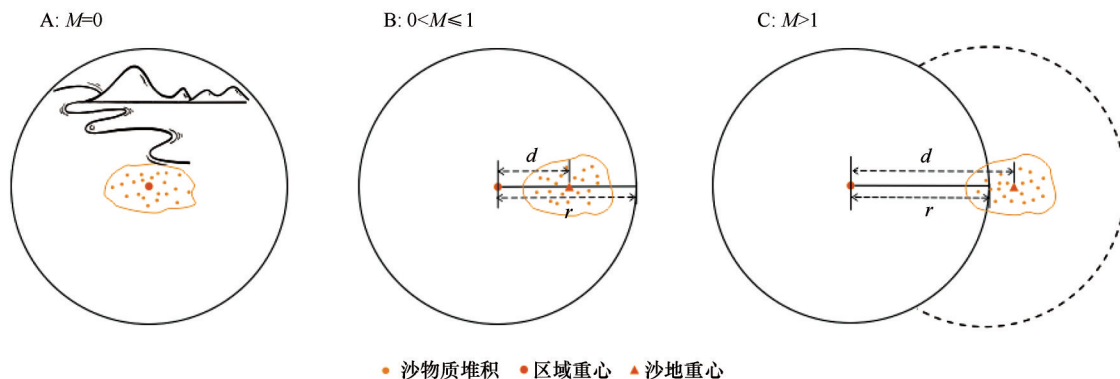


图3 迁移度概念模型示意图

Fig.3 Conceptual model diagram of Migration Intensity

3 结果

3.1 沙地迁移距离

共和盆地沙地重心在 $35^{\circ}54'12.440''$ — $35^{\circ}55'05.621''$ N、 $100^{\circ}34'38.335''$ — $100^{\circ}35'15.544''$ E,

位于龙羊峡水库西岸边缘,各个年份迁移距离变化较小,平均值为 53.14 km(图 4A,表 2)。

沙珠玉河流域沙地重心在 $36^{\circ}10'54.671''$ — $36^{\circ}10'57.503''$ N、 $100^{\circ}12'34.797''$ — $100^{\circ}12'42.548''$ E,位于更尕海附近,迁移距离变化不明显,1980—2020年迁移距离平均值为 43.43 km(图 4B,表 2)。

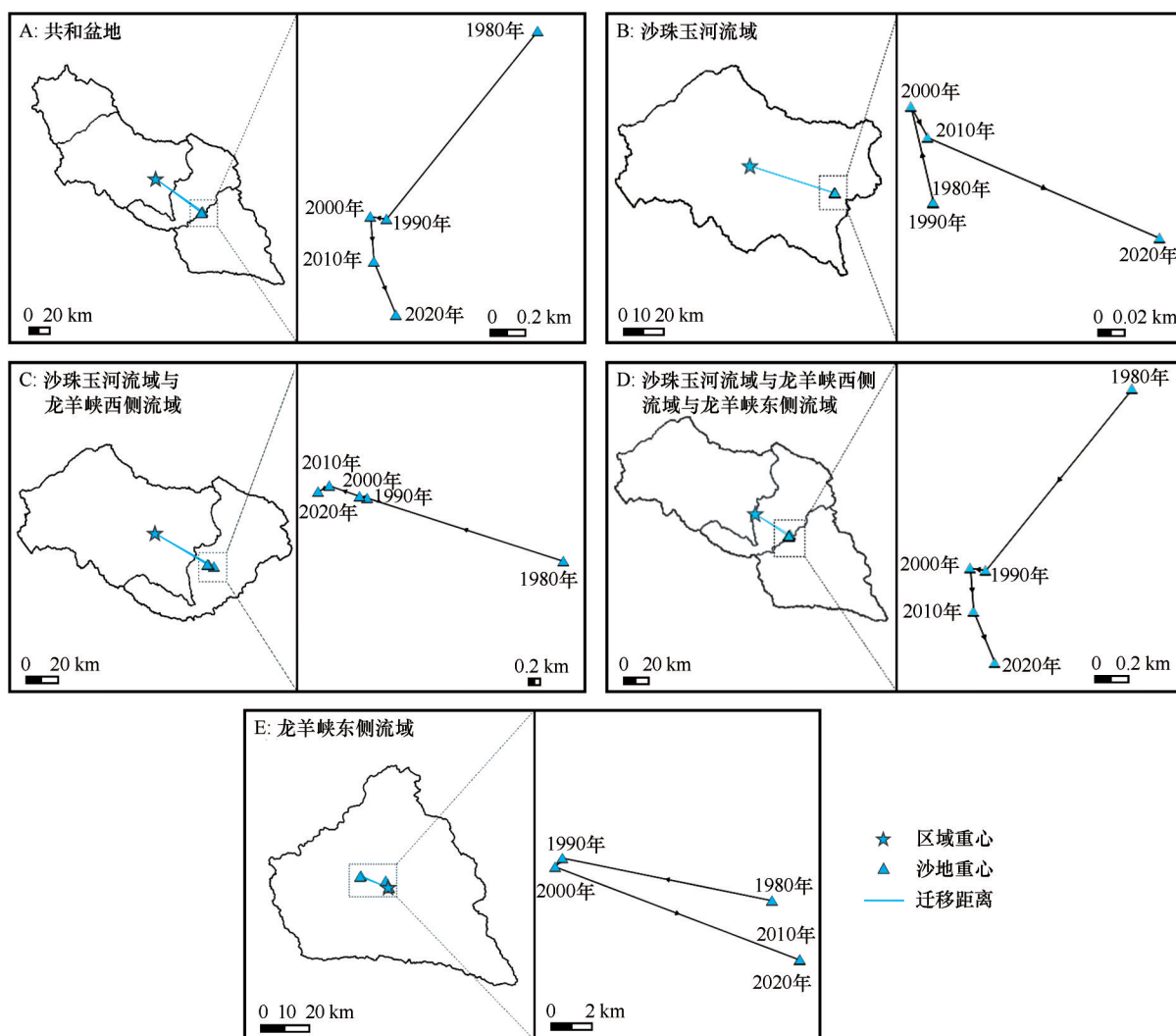


图4 1980—2020年共和盆地各区域沙地重心分布及其变化

Fig.4 Distribution and changes of sandy land barycenters in Gonghe Basin from 1980 to 2020

沙珠玉河流域和龙羊峡西侧流域组成的区域沙地重心在 $36^{\circ}03'16''$ — $36^{\circ}03'50''$ N、 $100^{\circ}22'32''$ — $100^{\circ}25'20''$ E,位于二塔拉阶地面上,迁移距离在此40年间略有下降,1980年为 42.92 km,2020年为 38.80 km,平均值为 39.93 km(图 4C,表 2)。

沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域和龙羊峡东侧流域组成的区域沙地重心与共和盆地的沙地重心相同,但由于区域范围较小(排除茶卡盐湖流域),迁移距离明显小于共和盆地的迁移距离,且

各个年份变化较小,迁移距离平均值 31.88 km(图 4D,表 2)。

龙羊峡东侧流域沙地重心在 $35^{\circ}40'47''$ — $35^{\circ}43'11''$ N、 $100^{\circ}43'29''$ — $100^{\circ}51'46''$ E,位于木格滩中部,迁移距离明显小于其他区域,且年际变化较明显,1980年为 3.03 km;1990年增加为 12.39 km;2000年为 12.56 km;2010年下降至 0.34 km;2020年为 0.35 km;1980—2020年迁移距离的平均值为 5.74 km(图 4E,表 2)。

表 2 1980—2020 年各区域沙地重心和沙地重心迁移
Table 2 Sandy land barycenters and migration data from 1980 to 2020

区域	年份	沙地重心		迁移距离 /km	迁移方向 /(°)	迁移度	时段	沙地重心移动	
		经度(E)	纬度(N)					距离/km	角度/(°)
A	1980	100°35′15.544″	35°55′05.621″	53.13	124.86	0.41	\	\	\
	1990	100°34′42.110″	35°54′29.922″	53.05	126.36	0.38	1980—1990	1.39	218.84
	2000	100°34′38.335″	35°54′30.232″	52.97	126.41	0.38	1990—2000	0.09	278.53
	2010	100°34′39.637″	35°54′22.017″	53.14	126.62	0.38	2000—2010	0.26	175.62
	2020	100°34′45.359″	35°54′12.440″	53.42	126.80	0.38	2010—2020	0.33	157.44
	平均值	\	\	53.14	126.21	0.39	1980—2020	1.83	206.56
B	1980	100°12′35.614″	36°10′55.253″	43.41	107.87	0.83	\	\	\
	1990	100°12′35.617″	36°10′55.250″	43.41	107.87	0.83	1980—1990	0.00	141.59
	2000	100°12′34.797″	36°10′57.503″	43.37	107.79	0.82	1990—2000	0.07	346.89
	2010	100°12′35.358″	36°10′56.791″	43.39	107.81	0.83	2000—2010	0.03	151.22
	2020	100°12′42.548″	36°10′54.671″	43.58	107.83	0.83	2010—2020	0.19	113.44
	平均值	\	\	43.43	107.83	0.83	1980—2020	0.17	98.90
C	1980	100°25′20.430″	36°03′16.092″	42.92	119.56	0.65	\	\	\
	1990	100°23′05.287″	36°03′44.740″	39.56	120.58	0.60	1980—1990	3.44	287.81
	2000	100°23′00.077″	36°03′45.477″	39.44	120.63	0.60	1990—2000	0.13	282.90
	2010	100°22′39.249″	36°03′50.351″	38.91	120.79	0.59	2000—2010	0.53	289.15
	2020	100°22′31.685″	36°03′46.971″	38.80	121.06	0.59	2010—2020	0.21	243.25
	平均值	\	\	39.93	120.52	0.61	1980—2020	4.26	285.82
D	1980	100°35′15.544″	35°55′05.621″	31.94	120.72	0.32	\	\	\
	1990	100°34′42.110″	35°54′29.922″	31.77	123.20	0.29	1980—1990	1.39	218.84
	2000	100°34′38.335″	35°54′30.232″	31.69	123.27	0.29	1990—2000	0.09	278.53
	2010	100°34′39.637″	35°54′22.017″	31.85	123.64	0.29	2000—2010	0.26	175.62
	2020	100°34′45.359″	35°54′12.440″	32.12	123.97	0.29	2010—2020	0.33	157.44
	平均值	\	\	31.88	122.96	0.30	1980—2020	1.83	206.56
E	1980	100°50′44.911″	35°42′18.233″	3.03	340.10	0.08	\	\	\
	1990	100°43′43.003″	35°43′10.946″	12.39	293.52	0.31	1980—1990	10.54	281.46
	2000	100°43′29.202″	35°42′56.722″	12.56	291.06	0.32	1990—2000	0.56	219.81
	2010	100°51′44.998″	35°40′47.043″	0.34	102.14	0.01	2000—2010	12.90	110.82
	2020	100°51′45.530″	35°40′47.499″	0.35	99.46	0.01	2010—2020	0.02	44.94
	平均值	\	\	5.74	225.26	0.15	1980—2020	3.22	154.67

注：A 是共和盆地；B 是沙珠玉河流域；C 是沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域；D 是沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域与龙羊峡东侧流域；E 是龙羊峡东侧流域。

综上,共和盆地沙地迁移距离随区域范围自西向东扩张呈现出自西北向东南减小的趋势,并且除龙羊峡东侧流域外,随时间的变化趋势不明显。

3.2 沙地迁移方向

共和盆地的沙地迁移角度略微增加,总体是向东南方向迁移(124.86°~126.80°),1980—1990 年增

加较为明显(1980年 124.86° ,1990年 126.36°),其余年份增加小于 1° ,40年来迁移方向平均值为 126.21° (图4A,表2)。

沙珠玉河流域沙地迁移方向为东南向(107.79° ~ 107.87°),迁移角度在研究时段内几乎没有变化,平均值为 107.83° (图4B,表2)。

沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域组成的区域沙地迁移方向为东南向(119.56° ~ 121.06°),1980年为 119.56° ,2020年增加为 121.06° ,1980—2020年平均值为 120.52° (图4C,表2)。

沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域和龙羊峡东侧流域组成的区域沙地迁移方向为东南向(120.72° ~ 123.97°),1980—1990年迁移角度小幅度增加(1980年 120.72° ,1990年 123.20°),之后几乎不变,1980—2020年平均值为 122.96° (图4D,表2)。

龙羊峡东侧流域沙地迁移角度变化较大,总体上1980、1990、2000年迁移方向为西北向(291.06° ~ 340.10°),2010、2020年为东南向(99.46° ~ 102.14°),40年间迁移角度平均值为 225.26° (图4E,表2)。

综上,除1980、1990、2000年龙羊峡东侧流域的沙地迁移方向为西北方向外,共和盆地其余各年份、各区域的沙地迁移方向均为东南向(99.46° ~ 126.80°)。

3.3 沙地迁移度

由表2可以看出,共和盆地的沙地迁移度年际变化不大,1980年为0.41,其余年份均为0.38,1980—2020年平均值为0.39。

沙珠玉河流域的迁移度在研究时段内几乎没有变化,2000年为0.82,其余年份均为0.83,在几个区域中最大,平均值为0.83,最接近于1,表明其沙地迁移程度最大。

沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域组成的区域,沙地迁移度有略微减小的趋势,其中1980年为0.65,1990年减小至0.60,平均值为0.61。

沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域和龙羊峡东侧流域共同组成的区域沙地迁移度略小于共和盆地整体的迁移度,1980年为0.32,其余年份为0.29,1980—2020年平均值为0.30。

龙羊峡东侧流域的沙地迁移度在几个区域中最小,但年际差异较大,其中1980年为0.08,1990年为0.31,2000年为0.32,2010年和2020年均均为0.01,1980—2020年的平均值为0.15。

综上,共和盆地的迁移度随时间的变化趋势不明显,但空间差异较大,随区域范围向东扩张呈现出自西向东递减的趋势。

4 讨论

4.1 共和盆地沙地迁移的空间差异

共和盆地的沙地迁移距离最大,区域重心计算时茶卡盐湖流域的参与使区域重心向西偏移,导致沙地迁移距离数值偏大,因而,本文以沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域与龙羊峡东侧流域组成的区域代表共和盆地的沙地空间分布格局特征。除此以外,沙珠玉河流域的沙地迁移距离最大,沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域组成的区域次之,沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域和龙羊峡东侧流域组成的区域略小,龙羊峡东侧流域最小。风力作为沙地迁移的主要驱动力,其强度与沙地迁移距离紧密相关。共和盆地平均风速、最大风速、起沙风出现的频率以及起沙风平均风速都具有明显的空间分异特征(表3),表现出自盆地西北部向东南部递减的规律^[31,44]。沙丘移动速度作为风速大小最直观的响应,其在盆地内部也表现为自西北向东南减小的特点,沙珠玉河流域的更尕海—塘格木一带沙丘移动速度为 $7.89 \pm 0.04 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,龙羊峡西侧流域的龙羊峡水库西岸为 $2.2 \pm 0.04 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[34]。

表3 共和盆地各气象站风速^[31]

Table 3 Wind speed data from meteorological stations in Gonghe Basin^[31]

气象站	平均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	起沙风		
			平均风速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率 /%	主风向 /($^{\circ}$)
茶卡	3.1	24	9.4	16.0	270.0
共和	1.7	22	8.1	5.3	270.0
贵南	1.8	19	7.2	2.5	292.5

共和盆地各个区域的沙地迁移方向主要为东南向(99.46° ~ 126.80° ,图4,表2),与盆地的延伸方向(西北—东南,图5A)^[27]、盛行风向(WNW)^[27]、合成输沙方向(104° ~ 131° ,图5B)^[28,34]、沙丘移动方向(主要是东南、东)一致^[34]。在西风带和东亚夏季风的共同作用下,虽然盆地盛行风向为西北风^[27],但自西北部向东南部,盆地内东南风的出现频率逐渐升高^[31]。据前人研究,盆地的方向变率自西北向东

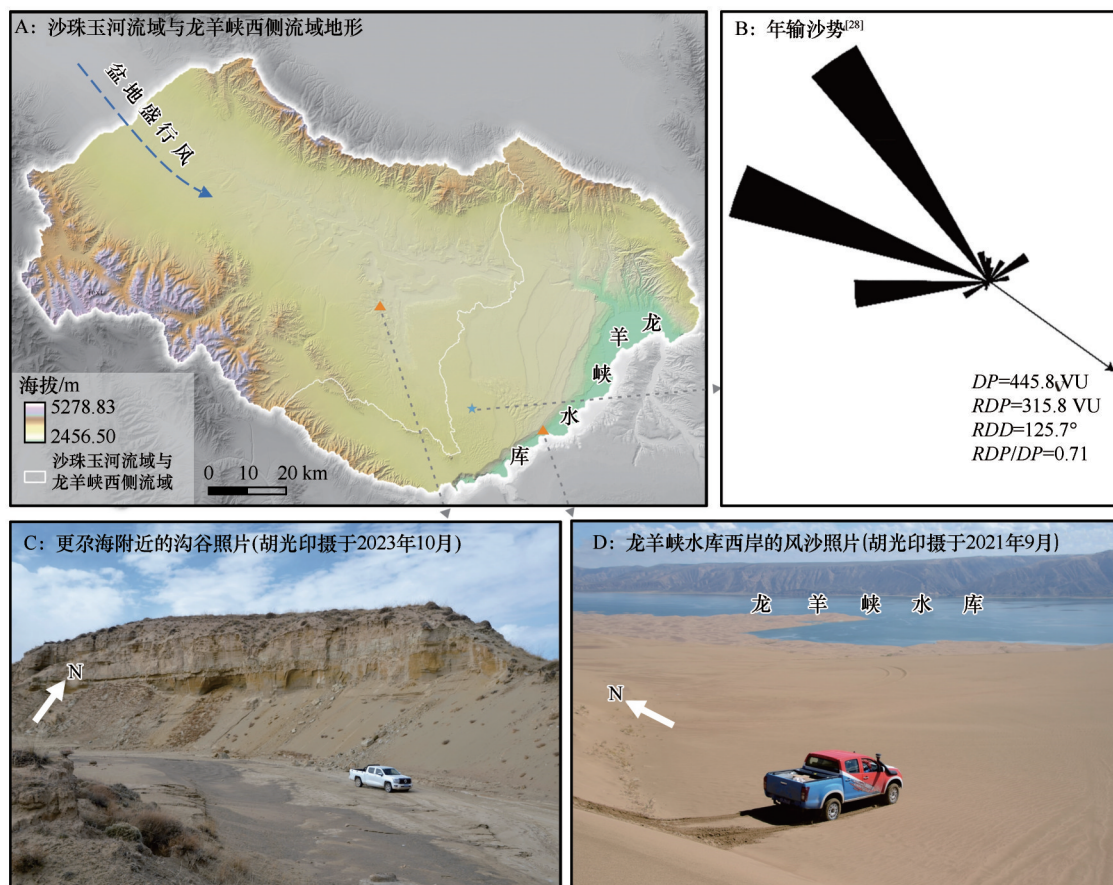


图5 沙珠玉河流域-龙羊峡西侧流域风沙活动联系

Fig.5 Aeolian-sand relation between the Shazhuyu River Basin & the Western Longyangxia Basin

南降低(茶卡站 0.96、共和站 0.91、贵南站 0.70)^[31,34], 且龙羊峡东侧流域沙地重心移动较明显(图 4, 表 2), 说明在局部复杂风况影响下龙羊峡东侧流域沙地迁移方向受到较大影响, 可能是 1980—2000 年龙羊峡东侧流域沙地迁移方向为西北向的原因, 而沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域沙地迁移方向较为持续稳定。

整体上, 共和盆地的迁移度随区域向东扩张而自西北向东南递减, 沙地迁移程度逐渐减小, 反映沙地空间分布格局为盆地西北部区域沙地分布更靠近下风向的流域边缘地区, 东南部地区的龙羊峡东侧流域沙地主要分布在流域的中部。沙珠玉河流域作为盆地风沙活动的物源区, 是沙物质的净输出区(图 5C), 来自上风向的沙物质在塔拉滩的阶地面上堆积形成沙地(图 5A、D), 与下风向地形平坦、开阔的龙羊峡西侧流域产生广泛的物质联系(合成输沙势 315.8 VU, 图 5B)^[45]。同时由于龙羊峡东、西两岸存在巨大高差(约 400 m), 龙羊峡西侧流域的沙物质迁移方式主要表现为风沙入库^[46], 而难以抵

达对岸的龙羊峡东侧流域, 因而二者之间物质联系较少。

4.2 共和盆地沙地空间分布格局的稳定性

沙地/沙漠的形成需要丰富的沙源以及风动力条件, 风动力条件受到大气环流的控制^[47], 而沙物质来源则是地质历史时期物质沉积的结果^[48]。在短时间尺度上, 风动力条件是相对稳定的, 并且沙地空间分布格局与风况特征具有很好的一致性。共和盆地的沙源来自于两部分: 一部分是来自柴达木盆地的外部沙源, 但由于山地的阻挡作用, 此部分沙源十分有限^[36]; 另一部分是来自盆地内部的沙源, 是共和盆地沙地形成的最主要物源, 第四纪沉积的巨厚河湖相地层是共和盆地风沙活动的主要物质基础^[28], 该地层受流水作用侵蚀、破碎, 后经风力作用吹蚀、搬运到下风向平坦的阶地面上堆积。因此, 从沙地形成的源-汇系统角度来说, 短时间尺度上, 其“源”和“汇”都是相对稳定的^[49]。

沙源可利用性作为影响沙源供给的重要因素,

与下垫面条件密切相关。共和盆地(特别是沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域)下垫面平坦,而植被作为影响沙源供给的重要因素不容忽视。植被在固定沙丘中发挥着重要作用,能够通过阻挡风沙流来影响沙源供给,有效降低输沙率^[50-51]。室内试验和野外实测结果证明,植被盖度达到0.15时能够减少99%的输沙率^[50]。近年来随着盆地的沙漠化治理,盆地生态环境向好^[52],植被盖度0.15~0.45^[53]。Shao等^[36]使用Gillette等^[54]提出的系数C评估了共和盆地的沙源供给程度(越接近于0受到的限制越大,小于3.2即沙源供给受到限制),共和盆地的C值为0.146,表明近年来共和盆地的沙源供给确实受到了限制,进而说明共和盆地的沙地空间分布格局趋于稳定。

总体而言,区域沙地空间分布格局作为区域环境条件长期作用的结果,在短时间尺度上,随时时间不具有明显的变化趋势。人类活动作为不可忽视的影响因素,虽然会对沙地空间分布格局产生一定的扰动,例如,龙羊峡水库的修建淹没大面积的沙地而影响局部地区的沙地空间分布^[55],但整体上,共和盆地的各个区域沙地迁移距离、迁移方向及迁移度均有波动,沙地的空间分布格局相对稳定。

本研究针对1980—2020年共和盆地的沙地空间分布格局变化特征进行了分析,并提出了迁移度概念模型,迁移度模型很好地指示了共和盆地沙地的空间分布格局及其驱动因素的强度,但迁移度概念模型还未能体现地形起伏等其他因素对风沙物质传输的影响,后续研究中力争考虑区域内部环境因子更加合理的表达方法。

5 结论

共和盆地的沙地迁移距离自西北向东南随着区域范围向东南扩张而递减,其中沙珠玉河流域最大,为43.43 km;沙珠玉河流域与龙羊峡西侧流域组成的区域次之,为39.93 km;沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域与龙羊峡东侧流域组成的区域略小,为31.88 km;龙羊峡东侧流域最小,为5.74 km。沙地迁移方向除龙羊峡东侧流域的个别年份为西北方向以外,其余区域的各个年份迁移方向均为东南向(99.46°~126.80°)。迁移度在盆地内也随着区域范围自西北向东南扩张而呈现出西北向东南递减的趋势,沙珠玉河流域为0.83,沙珠玉河流域与龙羊峡

西侧流域组成的区域为0.61,沙珠玉河流域、龙羊峡西侧流域与龙羊峡东侧流域组成的区域为0.30,龙羊峡东侧流域为0.15。

沙地空间分布格局是区域环境条件长期作用的结果,1980—2020年,在整个盆地范围内,沙地迁移距离、迁移方向和迁移度随时间的变化趋势都不明显,表明沙地空间分布格局具有一定的稳定性。

参考文献:

- [1] 杨强,李丽,王运动,等.1935—2010年中国人口分布空间格局及其演变特征[J].地理研究,2016,35(8):1547-1560.
- [2] 刘涛,齐元静,曹广忠.中国流动人口空间格局演变机制及城镇化效应:基于2000和2010年人口普查分县数据的分析[J].地理学报,2015,70(4):567-581.
- [3] Qiao L, Li Y, Liu Y, et al. The spatio-temporal change of China's net floating population at county scale from 2000 to 2010[J].Asia Pacific Viewpoint,2016,57(3):365-378.
- [4] 王思远,张增祥,周全斌,等.近10年中国土地利用格局及其演变[J].地理学报,2002,57(5):523-530.
- [5] 刘纪远,刘明亮,庄大方,等.中国近期土地利用变化的空间格局分析[J].中国科学(D辑:地球科学),2002(12):1031-1040,1058-1060.
- [6] 朱弘,洪凌涛,任典挺,等.浙江省三门县古树资源特征和空间分布格局分析[J].林业与环境科学,2024,40(4):27-34.
- [7] 刘大均,胡静,陈君子,等.中国传统村落的空间分布格局研究[J].中国人口·资源与环境,2014,24(4):157-162.
- [8] Chen W, Yang L, Wu J, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of traditional villages in the Yangtze River Basin: a Geodetector model[J].Heritage Science, 2023, 11(1):111.
- [9] Linderson M. Spatial distribution of meso-scale precipitation in scania, southern sweden [J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 2003, 85(2): 183-196.
- [10] Condit R, Ashton P S, Baker P, et al. Spatial patterns in the distribution of tropical tree species[J].Science, 2000, 288(5470): 1414-1418.
- [11] 闫海冰,韩有志,杨秀清,等.华北山地典型天然次生林群落的树种空间分布格局及其关联性[J].生态学报,2010,30(9): 2311-2321.
- [12] 禹朴家,徐海量,乔木,等.玛纳斯河流域土壤类型空间分布格局分析[J].土壤学报,2010,47(6):1050-1059.
- [13] Behera S K, Shukla A K. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of India [J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(1): 71-79.
- [14] Zhu L, Zhang L, Wang J, et al. Combining finite mixture distribution, receptor model, and geostatistical simulation to evaluate heavy metals pollution in soils: source and spatial pattern [J].

- Land Degradation & Development, 2021, 32(6): 2105–2115.
- [15] 徐春霞. 末次盛冰期以来共和盆地沙地特征时段空间格局演变研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2022.
- [16] 冯哈, 鹿化煜, 弋双文, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期中国季风区西北缘沙漠空间格局重建初探[J]. 第四纪研究, 2013, 33(2): 252–259.
- [17] 赵媛, 杨足膺, 郝丽莎, 等. 中国石油资源流动源-汇系统空间格局特征[J]. 地理学报, 2012, 67(4): 455–466.
- [18] 靳诚, 陆玉麒. 基于县域单元的江苏省经济空间格局演化[J]. 地理学报, 2009, 64(6): 713–724.
- [19] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970, 46: 234–240.
- [20] 董光荣. 中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [21] 徐志伟, 鹿化煜. 毛乌素沙地风沙环境变化研究的理论和新认识[J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2203–2223.
- [22] Abell J T, Pullen A, Lebo Z J, et al. A wind-albedo-wind feedback driven by landscape evolution [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 96.
- [23] 周亚利, 鹿化煜, 张小艳, 等. 末次盛冰期和全新世大暖期浑善达克沙地边界的变化[J]. 第四纪研究, 2013, 33(2): 228–242.
- [24] Wang Z. Long-term dynamics of sandy vegetation and land in North China[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(19): 4803.
- [25] Dong X, Chen Z, Wu M, et al. Long time series of remote sensing to monitor the transformation research of Kubeqi Desert in China[J]. *Earth Science Informatics*, 2020, 13(3): 795–809.
- [26] 董治宝. 青藏高原风沙地貌图集[M]. 西安: 西安地图出版社, 2017.
- [27] 董光荣, 高尚玉, 金炯, 等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [28] 徐叔鹰, 徐德馥, 石生仁. 青海共和盆地的风沙堆积[J]. 中国沙漠, 1982, 2(3): 5–12.
- [29] 徐叔鹰, 徐德馥, 石生仁. 共和盆地地貌发育与环境演化探讨[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1984(1): 146–157.
- [30] 赵希涛, 杨艳, 贾丽云, 等. 论晚期共和古湖时代、演化过程及其与地壳运动和黄河发育的关系[J]. 地球学报, 2021, 42(4): 451–471.
- [31] 陈宗颜, 董治宝, 汪青春. 青海共和盆地风况及风沙地貌[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 492–499.
- [32] 高尚玉, 王贵勇, 哈斯, 等. 末次冰期以来中国季风区西北边缘沙漠演化研究[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 66–71.
- [33] 刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 等. 全新世共和盆地沙地时空演化及其驱动机制[J]. 中国沙漠, 2014, 34(4): 982–991.
- [34] Dörwald L, Lehmkuhl F, Walk J, et al. Dune movement under climatic changes on the north-eastern Tibetan Plateau as recorded by long-term satellite observation versus ERA-5 reanalysis [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2023, 48(13): 2613–2629.
- [35] 闫蓉, 安光辉. 共和盆地近60年来气候变化特征分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(1): 117–120.
- [36] Shao M, Luo W, Che X, et al. UAV-SfM-based field quantification of barchan dune celerity and morphodynamics in Gonghe Basin [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2024, 49(8): 2380–2404.
- [37] 曾永年, 冯兆东, 曹广超. 基于GIS的黄河上游龙羊峡库区生态环境遥感监测研究[J]. 山地学报, 2003(2): 140–148.
- [38] 王吉玉, 张兴鲁. 青海省共和盆地的第四纪地层[J]. 地质论评, 1979(2): 15–20.
- [39] 王劲峰. 区域社会-经济空间结构与行为分析的重心方法及实验研究[J]. 遥感信息, 1993(2): 11–14.
- [40] 高志强, 刘纪远, 庄大方. 我国耕地面积重心及耕地生态背景质量的动态变化[J]. 自然资源学报, 1998(1): 92–96.
- [41] Riao D, Zhu X, Tong Z, et al. Study on land use/cover change and ecosystem services in Harbin, China [J]. *Sustainability*, 2020, 12(15): 6076.
- [42] Janus J. Measuring land fragmentation considering the shape of transportation network: a method to increase the accuracy of modeling the spatial structure of agriculture with case study in Poland [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 148: 259–271.
- [43] Xie J, Lu Z, Xiao S, et al. The latest desertification process and its driving force in Alxa League from 2000 to 2020 [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(19): 4867.
- [44] 陈宗颜, 董治宝, 鄂崇毅, 等. 1971–2015年共和盆地风况特征及变化趋势[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 224–230.
- [45] Luo W, Wang Z, Shao M, et al. Historical evolution and controls on mega-blowouts in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2019, 329: 17–31.
- [46] 高宏智, 邹桂香. 龙羊峡水库周围风沙流的观测、计算及对库区的影响[J]. 干旱区资源与环境, 1989(1): 59–69.
- [47] Kocurek G, Lancaster N. Aeolian system sediment state: theory and Mojave Desert Kelso dune field example [J]. *Sedimentology*, 1999, 46(3): 505–515.
- [48] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [49] Jiang Q, Li Z, Hao Q. Modern sand supply of the Tengger Desert and temporal variations in sand provenance driven by northern Hemisphere glaciation [J]. *Catena*, 2022, 214: 106278.
- [50] Lancaster N, Baas A. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(1): 69–82.
- [51] Kuriyama Y, Mochizuki N, Nakashima T. Influence of vegetation on aeolian sand transport rate from a backshore to a fore-dune at Hasaki, Japan [J]. *Sedimentology*, 2005, 52(5): 1123–1132.
- [52] 苏万峰, 汉光昭, 叶得力, 等. 共和盆地生态环境遥感评价及驱动力分析[J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 74–84.
- [53] 邵梅, 罗万银, 车雪华, 等. 基于COSI-Corr技术的龙羊峡库区1987–2019年风沙输移特征及潜在入库量估算[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 249–261.

- [54] Gillette D A, Chen W. Particle production and aeolian transport from a "supply-limited" source area in the Chihuahuan desert, New Mexico, United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D6): 5267–5278.
- [55] 胡光印, 董治宝, 杨林海, 等. 共和盆地土地利用/覆盖变化 (LUCC) 及其驱动因素 [J/OL]. *地球环境学报*, 1–20 [2024–11–04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1482.X.20240701.1550.002.html>.

Change characteristics of spatial distribution pattern of sandy land in Gonghe Basin

Gao Na, Hu Guangyin, Dong Zhibao

(*School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China*)

Abstract: The spatial distribution pattern of sandy land is the result of long-term erosion, transport and accumulation by wind after the sediment sinks by the action of running water. To quantitatively assess the spatial distribution pattern of sandy land and analyze its change characteristics, we selected Gonghe Basin, located in the north-eastern Tibetan Plateau, as the study area. Utilizing landuse data from 1980 to 2020, this study adopted the geographical barycenter model and introduced the Migration Intensity Model to calculate the barycenter and migration intensity of sandy land, enabling an analysis of change characteristics of spatial distribution pattern of sandy land in the Gonghe Basin. The main conclusions are as follows: The migration distance of sandy land in the Gonghe Basin decreases from northwest to southeast. The Shazhuyu River Basin has the greatest distance at 43.43 km, followed by the combined area of the Shazhuyu River Basin and the western Longyangxia Basin at 39.93 km. The area including the Shazhuyu River Basin, western, and eastern Longyangxia Basin has a smaller distance of 31.88 km, with the smallest distance of 5.74 km in the eastern Longyangxia Basin. The predominant migration direction of sandy land throughout the basin is toward the southeast (99.46° – 126.80°). The migration intensity in the basin decreases from northwest to southeast, with values of 0.83 in the Shazhuyu River Basin, 0.61 in the combined Shazhuyu River and western Longyangxia basins, 0.30 in the Shazhuyu River, western and eastern Longyangxia basins, and 0.15 in the eastern Longyangxia basin. The analysis reveals that the spatial distribution pattern of sandy land in the Gonghe Basin exhibits limited temporal variation, indicating a relative stability shaped by the long-term influence of regional environmental factors.

Key words: spatial distribution pattern; migration intensity; geographical barycenter; sandy land; Gonghe Basin