

# 黄河乌兰布和沙漠段沿岸沙丘形态及其运移特征

郭建英<sup>1</sup>, 董智<sup>2</sup>, 李锦荣<sup>1</sup>, 珊丹<sup>1</sup>, 梁占岐<sup>1</sup>, 田世民<sup>3</sup>, 陈新闯<sup>2</sup>

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 3. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

**摘要:**为更合理、精确地计算黄河乌兰布和沙漠段的入黄沙量, 探明其对黄河沿岸植被造成的影响程度, 以黄河乌兰布和沙漠段沿岸沙丘为研究对象, 通过野外地貌调查、沙丘形态测量和遥感解译对其沙丘的形态特征及其运移特征进行了系统研究。结果表明: 乌兰布和沙漠沿黄段沙丘以走向西南—东北的新月型沙丘和新月型沙丘链为主, 沙丘剖面形态不对称, 具有明显落沙坡; 在发育过程中同时受到了西南风和西北风的显著影响, 5 年内以沙丘整体向河道推进为主, 共移动 19.45 m, 具有单向快速运移的特点, 且沙丘不断向黄河侵袭, 应采取措施予以遏制。

**关键词:**沙丘形态; 运移特征; 移动距离; 输沙量; 乌兰布和沙漠

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)06-0040-05

## Dune Morphology and Migration Characteristics in the Ulanbuh Desert

GUO Jianying<sup>1</sup>, DONG Zhi<sup>2</sup>, LI Jinrong<sup>1</sup>, SHAN Dan<sup>1</sup>, LIANG Zhanqi<sup>1</sup>,  
TIAN Shimin<sup>3</sup>, CHEN Xinchuang<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010010, China; 2. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In order to calculate the sediment load entering the Yellow River in the Ulanbuh Desert coastal more reasonably and accurately, and ascertain its impact on vegetation along the Yellow River, we made the sand dunes in the Ulanbuh Desert as the research objects. Through the methods of field topography survey, sand dune morphology measurement and remote sensing interpretation, we studied the morphological characteristics and transport characteristics of the dunes. The results show that the dunes mainly in barchans and barchans chain, which is in the direction of the southwest to northeast, the profile morphology of dune is asymmetric, and the leeward slope is obvious. In the process of development, the sand dune is influenced significantly by the southwest wind and the northwest wind. During the 5 years, the dunes moved the 19.45 m towards the river, and the movement of sand dunes has the characteristics of unidirectional rapid migration. The measures should be taken to curb the constant movement of sand dunes to the Yellow River.

**Keywords:** dune morphology; migration characteristics; movement distance; sediment discharge; UlanBuh Desert

沙丘是在不同风力搬运过程中沙粒堆积而成的丘状或垄状地貌, 是风成床面中最重要的地貌形态<sup>[1]</sup>, 且分布较为广泛。根据沙丘走向与风向的关系可将沙丘分为横向沙丘、纵向沙丘和多风向作用下的沙丘, 每种沙丘类型又可按形态进一步划分<sup>[2]</sup>。沙丘形态的不同主要是由于风沙沉积过程中沙物质在各

个方向上的运移规律差异所致<sup>[3-5]</sup>。国内外学者对于旱半干旱地区的沙丘形态和风沙运移的研究较为全面, 包括新月形沙丘及沙丘链、反向沙丘等沙丘的形态示量特征<sup>[6]</sup>、回涡沙丘形态发育与障碍物之间的关系、沙丘形态的空间变异特征等<sup>[7-10]</sup>。但不同地区的风沙运移特征有着特定的流量和表现形式, 其受微地

收稿日期: 2015-12-22

修回日期: 2016-01-18

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费(201401084); 国家自然科学基金(41301303, 51409114)

第一作者: 郭建英(1979—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 高级工程师, 主要从事干旱、半干旱地区水土流失与植物生态方面的研究。E-mail: guojianying1980@163.com

通信作者: 李锦荣(1980—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 工程师, 主要从事风沙物理及其草地遥感方面的研究。E-mail: lijnrong918@126.com

形的影响极为显著。乌兰布和沙漠地处中国荒漠化草原向草原化荒漠过渡地带,是中国沙尘发生源区及主要路径之一,也是中国干旱区沙漠化发展严重地区<sup>[11]</sup>。关于乌兰布和沙漠风沙方面的研究主要集中在绿洲风沙危害及其控制<sup>[12-14]</sup>、沙丘风沙运动规律<sup>[15-16]</sup>及沙物质理化特性<sup>[17-20]</sup>等,但对于乌兰布和沙漠的沙丘形态及运动特征是一项多尺度、多场耦合、随机性、非线性的复杂科学问题,需长期对该地区进行长序列的观测研究<sup>[16]</sup>。事实上,乌兰布和沙漠沿黄段沙丘具有其独特的地理位置及立地条件,使得该段沙丘在形成机理、发育过程以及移动特征等方面与其他地区的沙丘有明显的差别。此外,该区域还是黄河粗砂的重要策源地,沙丘移动会导致风成沙进入黄河而显著增加泥沙含量<sup>[16]</sup>。鉴于此,以乌兰布和沙漠沿黄段河岸沙丘为例,深入研究沙丘形态变化、沙丘移动方向、方式与速度,解析其运移规律的数量化特征。该研究对揭示沿岸沙丘形态变化与运移特征、控制沙丘移动和防治沙漠化具有重要意义,为合理、精确计算黄河乌兰布和沙漠段的入黄沙量提供扎实的基础资料和科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于黄河乌兰布和沙漠刘拐沙头风蚀观测场内,地理坐标  $40^{\circ}09'52.28''\text{N}$ ,  $106^{\circ}50'37.60''\text{E}$ 。该区属于典型的中温带大陆性干旱季风气候,大风天气频繁。据 1980—2013 年的气象统计资料,该区多年平均气温  $8.0^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量为  $142.7\text{ mm}$ ,年蒸发量高达  $2\ 372\text{ mm}$ 。年均风速  $3.7\text{ m/s}$ ,大风和风沙一年四季均有出现,以 3—5 月份最多。流动沙区地貌呈现新月形沙丘、链状、格状沙丘,白刺灌丛沙堆,粘质土丘间低地,一般沙丘高  $4\sim 10\text{ m}$ ,土壤为典型风沙土,风沙土机械组成以细沙( $0.25\sim 0.05\text{ mm}$ )为主,基本不含黏粒和粗沙。植被类型主要有白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* Maxim)、梭梭(*Haloxylon ammodendron* Bunge)、沙旋覆花(*Inula salsoloides* Turcz. Ostenf.)、沙竹(*Psammodloa, illosa* Trin.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 沙丘形态构件特征值测定

在乌兰布和沙漠距黄河  $500\sim 1\ 000\text{ m}$  处,选取流动沙丘直接入黄段,平行于河道,在其沿线建立风沙观测场,观测场长  $5\text{ km}$ ,宽  $3\text{ km}$ 。在观测场内随机选择该区域典型沙丘,参考吴正等对风沙地貌研究方法<sup>[2]</sup>,测定沙丘构件的特征值,包括沙丘形态的记

录、沙丘走向、沙丘迎风坡、背风坡坡度、坡长以及落沙坡走向等构件几何特征。对沙丘形态测量,多在沙丘外围风沙影响较小的位置布设 3 个控制点,并打桩固定,方便以后联测或检验误差。较大距离的量测借助红外线测距仪和全站仪,较小距离采用  $50\text{ m}$  钢卷尺确定;用罗盘仪和倾斜仪测定沙丘的走向、坡度;沙丘高度用全站仪或 GPS 确定。

### 2.2 沙丘运移特征测定

于 2010 年 5 月—2014 年 5 月份,采用测桩法进行沙丘移动监测。具体方法为:在观测场内选取典型沙丘,在沙丘移动方向的下风向约  $20\text{ m}$  处确定基线,每个沙丘的基线用标桩严格控制边界,以便使每次测定的典型沙丘边界线准确无误。共计布设观测标桩  $2\ 650\text{ m}$ ,用卷尺每隔  $2\text{ m}$  测定观测标桩距沙丘垂直断面的距离,并用 GPS 测量出沙丘所在地的经度、纬度、海拔高度和沙丘的高度,监测时用卷尺每隔  $2\text{ m}$  测定沙丘移动后观测标桩距沙丘垂直断面的距离,并用 GPS 测量出移动后沙丘所在地的经度、纬度、海拔高度和沙丘的高度,每月测定 1 次,特殊天气(大风、沙尘暴)之后进行加测。

### 2.3 沙丘具体移动量的测定

在黄河乌兰布和沙漠段选取 2 个典型沙丘进行测量。 $1^{\#}$  沙丘走向为  $5^{\circ}$ ,沙丘宽度  $64\text{ m}$ ,沙丘高度  $3.8\text{ m}$ ;  $2^{\#}$  沙丘走向为  $20^{\circ}$ ,沙丘宽度  $72\text{ m}$ ,沙丘高度  $4.4\text{ m}$ ,沙子的容重为  $1.60\text{ g/m}^3$ 。利用全站仪于 2012 年 4 月 6 日—8 日、2013 年 4 月 4 日—8 日两次对  $1^{\#}$  沙丘、 $2^{\#}$  沙丘进行了  $1:200$  的地形图,为二等水准闭合测量,全站仪测距精度为  $1\text{ mm} + 2\text{ ppm}\times D$ ,每个沙丘的边界用木头桩严格控制边界,以便使每次测定的典型沙丘边界线准确无误。将测量数据使用南方 CASS 7.1 软件计算。

## 3 结果与分析

### 3.1 沙丘形态特征

乌兰布和沙漠段沿岸的沙丘既有横向沙丘,也有少量的纵向沙垄,多以横向沙丘为主,沙丘走向为西南—东北向。横向沙丘的形态以新月型沙丘和新月型沙丘链为主,新月形沙丘链由  $3\sim 8$  个新月型沙丘连成,由表 1 可以看出,沙丘走向为  $355^{\circ}\sim 2^{\circ}$ ,主要以 SSW—NNE 走向为主。沙丘剖面形态不对称,西北侧迎风坡缓而长,坡度约为  $6.8^{\circ}\sim 19.3^{\circ}$ ;东南侧背风坡陡而短,具有明显的落沙坡,坡度约为  $14^{\circ}\sim 33.5^{\circ}$ 。落沙坡方向虽在总体上顺应于主风向 ESE 或 ENE,但又具有较大的变化范围,变化幅度在  $64^{\circ}\sim 138^{\circ}$ 。这一方面反映了黄河乌兰布和沙漠段沿岸沙丘发育

的不成熟性,因为风力作用下沙丘形态的发育首先表现为沙丘形态调整,发育成熟的简单沙丘其落沙坡基本上完全顺应主风力,而发育不成熟的沙丘则处于频繁的调整过程,因而其落沙坡方向不稳定。另一方面反映出研究区供沙量、水分条件、沙丘前植被状况、微地形等一系列因子引起的局部气流场对沙丘发育的影响较大。因黄河乌兰布和沙漠段沿岸均为发育不成熟的雏形沙丘,对局地气流场的反映十分敏感,因而,某一沙丘周围沙丘的存在将不可避免地改变局地气流场特征。

沙丘高度因类型的不同存在一定的差异,横向的新月形沙丘和新月型沙丘链的高度为 2~8 m;纵向的沙垄较高,高度为 8~15 m。沿黄段的新月形沙丘的移动是沙物质从迎风坡被不断吹蚀、搬运,而在背风坡堆积的过程,沙丘前移的直接表现是滑动面的前移。沙丘移动受制于风况(风速、风向)、沙丘形态(高度、体积)、周围环境(粒径、植被情况、沙面的水分状况和覆盖地貌条件等)。本文通过对典型沙丘宽度  $W$  和高度  $H$  做线性函数回归分(图 1),结果表明宽度  $W$  和长度  $H$  存在较为显著的线性关系,相关系数达 0.85。

表 1 沙丘形态特征

沙丘编号	沙丘走向	迎风坡坡长/cm	迎风坡坡度	背风坡坡长/cm	背风坡坡度	落沙坡坡向
1	350°	2740	15.7°	1669	25°	100°
2	355°	3300	14.2°	1530	26°	95°
3	4°	1640	16.3°	1194	33.5°	86°
4	2°	1040	19.3°	2230	22.8°	88°
5	10°	1740	9.8°	1110	27.8°	80°
6	312°	960	11°	1260	14°	138°
7	351°	2710	11°	1870	23.7°	99°
8	346°	5000	13°	2190	31°	104°
9	26°	2150	10.5°	1540	20.3°	64°
10	25°	4460	6.8°	1270	28.5°	65°

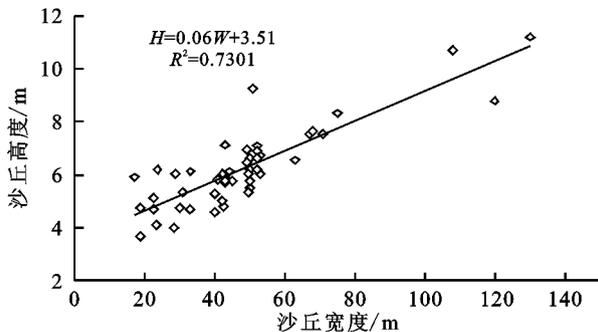


图 1 黄河乌兰布和沙漠刘拐子沙头段沙丘宽—高关系

### 3.2 沙丘运移特征

3.2.1 沙丘移动速度 沙丘的形态不同,移动的速度也不一样,一般的规律是单个新月型沙丘移动快;新月型沙丘链移动较慢,其链子越长也越稳定;沙垄的横向移动慢一些,而纵向线状伸长速度又较快些。经对 2010 年 5 月—2014 年 5 月份 18 623 个监测数据的分析,受不同年份季风强度的影响,2010 年 5 月—2011 年 5 月沙丘向黄河河道前移的距离为 0.55~20.24 m,平均前移距离为 7.87 m;2011 年 5 月—2012 年 5 月沙丘向黄河河道前移的距离为 0.39~6.38 m,平均前移距离为 2.54 m;2012 年 5 月—2013 年 5 月沙丘向黄河河道前移的距离为 0.42~7.96 m,平均前移距离为 3.28 m;2013 年 5 月—2014 年 5 月沙丘向黄河河道前移的距离为 0.25~

5.85 m,平均前移距离为 1.87 m。可见,沙丘受不同年份季风强弱的影响极大,同时也受沙丘高度、沙丘前植被条件等立地条件的影响。一般而言,沙丘的两翼移动速度大于中部(图 2)。沙丘移动速度在年内的变化中,沙丘移动速度以 5 月份最快,1、8、9 月份最慢,沙丘前移主要发生在 3—5 月份,占全年前移距离的 73.51%,年内变化没有规律性(回归函数的  $R$  值远小于 0.80),受季风的影响较大(图 3)。

3.2.2 沙丘高度对移动速度的影响 沙丘移动的速度主要取决于风力的大小、沙丘形态、沙丘高度和体积,同时也与沙丘排列密度、地形及地表性质有密切关系<sup>[21]</sup>。本文通过对乌兰布和沙漠沿黄段 5 a 内沙丘移动距离发现,沙丘高度越高,移动距离越小,对其进行相关分析发现沙丘移动距离  $D$  与高度  $H$  之间具有稳定的线性负相关关系(图 4)。Bagnold, R. A. 曾从理论上推导出  $D=Q/(rH)$ , 式中,  $D$  为沙丘移动距离;  $Q$  为单位时间内通过单位边宽的全部沙量;  $r$  为沙子容重;  $H$  为沙丘高度。根据朱震达等人的研究表明,在塔克拉玛干沙漠不同下垫面条件、不同疏密度沙丘的分布区,沙丘移动速度与高度之间具有较好的线性负相关关系<sup>[22]</sup>。该研究结果与 Bagnold, R. A. 的理论推导及朱震达等人的野外观测研究结果一致。其回归关系式如下:

$$D = -0.52 H + 6.11$$

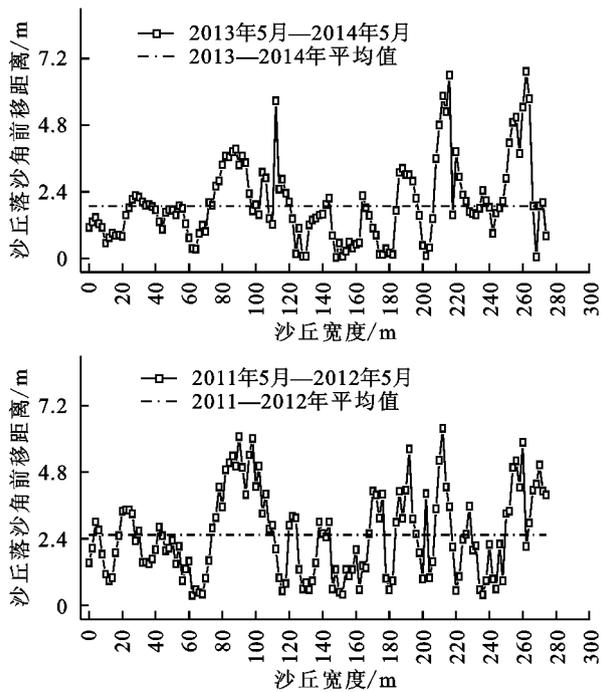


图 2 沙丘落沙角前移距离变化

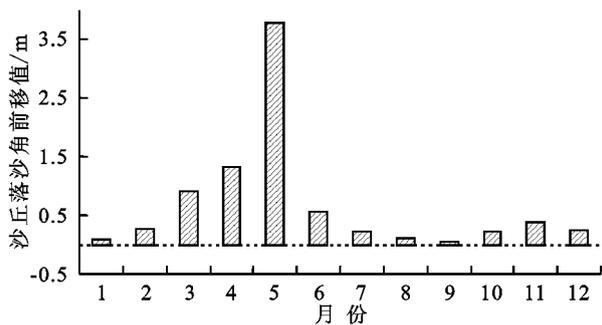
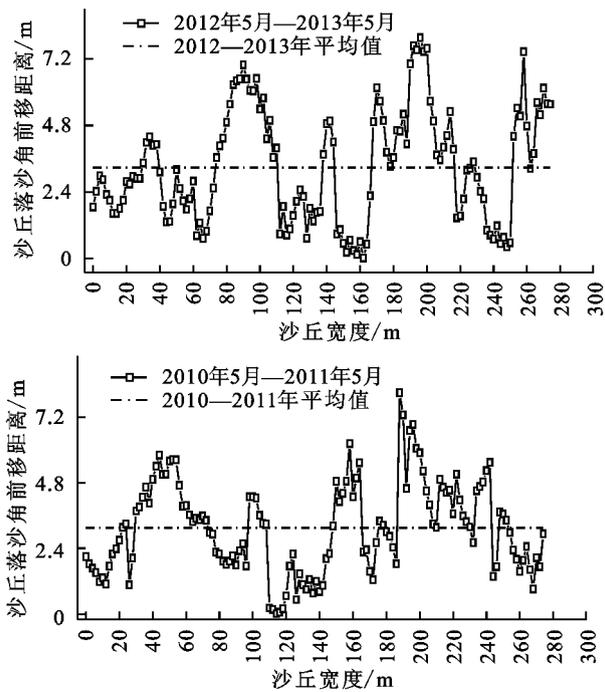


图 3 2011 年落沙角前移距离的年度内变化

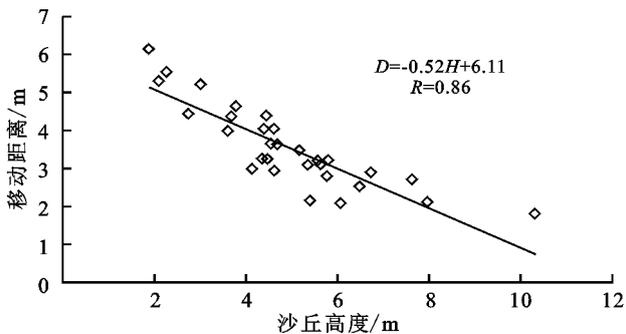


图 4 黄河乌兰布和沙漠刘拐子沙头段  
沙丘高度—移动距离关系

3.2.3 沙丘运移量分析 通过长期的观测研究发现,黄河乌兰布和沙漠段沿岸的入黄风积沙量主要以沙丘整体向河道推进为主,即风沙的蠕移和跃移。使用南方 CASS 7.1 软件对测量数据计算结果表明:1#沙丘 2012 年 4 月 8 日—2013 年 4 月 8 日沙丘移动量为 897.56 m<sup>3</sup>,输沙量为 22.443 t/(m·a)(图 5);2#沙丘 2012 年 4 月 8 日—2013 年 4 月 8 日沙丘移动量为 1 305.29 m<sup>3</sup>,输沙量为 29.011 t/(m·a)(图 6)。

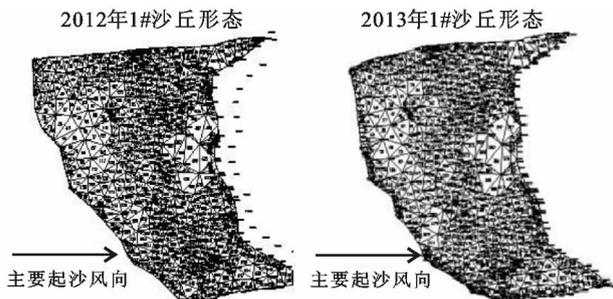


图 5 1# 沙丘移动测量三角网图

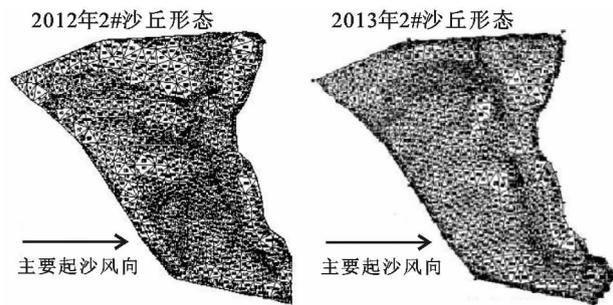


图 6 2# 沙丘移动测量三角网图

## 4 结论

黄河乌兰布和沙漠沿黄段沙丘受季风影响较大,以走向西南—东北的新月型沙丘和新月型沙丘链(3~8 个新月型沙丘)为主,沙丘剖面形态不对称,背风坡坡度接近于最大休止角。但落沙坡方向变化幅度较大(65°—110°),说明乌兰布和沙漠沿黄段沙丘在发育过程中同时受到了西南风和西北风的显著影响。这也造成沙丘移动年内无明显规律,前移主要发生在西南风盛行的 3—5 月份,在 5 a 以内以沙丘整体向河道推进为主共移动 19.45 m,具有单向快速运移的特点。典型沙丘年

内(2012~2013年)移动量为 897.56 ~ 1 305.29 m<sup>3</sup>, 输沙量为 29.011~22.443 t/(m·a)。可见沙丘不断向黄河侵袭, 如果沙丘移动得不到有效的遏制, 势必对黄河沿岸植被造成威胁, 增加黄河泥沙含量, 更有可能使黄河改道, 对下游生态环境的影响甚大。

#### 参考文献:

- [1] 朱震达, 陈治平, 吴正. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 27-80.
- [2] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 91-361.
- [3] Lancaster N. Geomorphology of Desert Dunes [M]. New York: Routledge, 1995.
- [4] 屈建军, 凌裕泉, 井哲帆, 等. 包兰铁路沙坡头段风沙运动规律及其与防护体系的相互作用[J]. 中国沙漠, 2007, 27(4): 529-533.
- [5] 张春来, 郝青振, 邹学勇, 等. 新月形沙丘迎风坡形态及沉积物对表面气流的响应[J]. 中国沙漠, 1999, 29(4): 63-67.
- [6] Dong Z, Qian G, Luo W, et al. A wind tunnel simulation of the effects of stoss slope on the lee airflow pattern over a two-dimensional transverse dune[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F3): 130-144.
- [7] 刘陶, 杨小平, 董巨峰, 等. 巴丹吉林沙漠沙丘形态与风动力关系的初步研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1285-1291.
- [8] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 回涡沙丘的形态特征与表面物质组成[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 587-592.
- [9] 王永胜. 库姆塔格沙漠东缘风沙活动及羽毛状沙丘剖面特征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [10] 范冬冬, 李生字, 雷加强, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地高大复杂纵向沙垄区简单横向沙丘形态特征的空间变异[J]. 干旱区研究, 2009, 26(5): 755-762.
- [11] 李锋. 沙尘暴灾害风险评估指标体系初探[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 8-13.
- [12] 董智. 乌兰布和沙漠绿洲农田沙害及其控制机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2004.
- [13] 董智, 李红丽. 乌兰布和沙漠人工绿洲沙害综合控制技术体系[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 339-345.
- [14] 李红丽, 董智, 左合君, 等. 乌兰布和沙漠农田沙害特征及其时空变化规律[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 346-351.
- [15] 刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1200-1207.
- [16] 何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 71-77.
- [17] 桂洪杰. 黄河宁夏河段四大沙漠粒度和元素特征对比研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [18] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠乌海段新月形沙丘表层沉积物粒度与重金属分布特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 47-51.
- [19] 杨志勇, 陈新闯, 郭建英, 等. 乌兰布和沙漠不同土地利用类型粒度特征分析[J]. 中国水土保持, 2015(7): 50-53.
- [20] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同土地利用类型对土壤分形特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 169-173.
- [21] 严应存, 高贵生, 刘宝康, 等. 青海湖周边地区沙丘移动监测及其气候驱动力分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 617-622.
- [22] 朱震达, 陆锦华, 江伟铮. 塔克拉玛干沙漠克里雅河下游地区风沙地貌的形成发育与环境变化趋势的初步研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 4-13.

(上接第39页)

- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 胡克林, 陈德立. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 33-38.
- [17] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523-525.
- [18] 蒋文伟, 周国模, 余树全, 等. 安吉山地主要森林类型土壤养分状况的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 73-76.
- [19] 赵彦锋, 郭恒亮, 孙志英, 等. 基于土壤学知识的主成分分析判断土壤重金属来源[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 45-50.
- [20] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 等. “中国山地植物物种多样性调查计划”及若干技术规范[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 5-9.
- [21] 方精云. 探索中国山地植物多样性的分布规律[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 1-4.
- [22] 赵淑清, 方精云, 宗占江, 等. 长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 164-173.
- [23] 桑卫国, 王云霞, 苏宏新, 等. 天山云杉树轮宽度对梯度水分因子的响应[J]. 科学通报, 2007, 52(19): 2292-2298.
- [24] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报, 1997, 17(1): 91-99.
- [25] 冯建孟, 王襄平, 李晶, 等. 面积和中间膨胀效应对丽江地区种子植物物种丰富度垂直分布格局的影响[J]. 生物多样性, 2006, 14(2): 107-113.