

黄河上游宁夏-内蒙古段跃移沙粒起动风速的空间分布

杜鹤强, 薛 娴, 王 涛

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 黄河上游宁夏-内蒙古段穿越河东沙地、乌兰布和沙漠和库布奇沙漠, 大量风沙被吹入黄河, 因此, 迫切需要揭示宁夏-内蒙古河段沙粒起动风速的空间分布规律, 从而为该区域的风沙防治工作提供理论依据。首先, 应用归一化植被指数 (normalized different vegetation index, *NDVI*) 数据集计算该河段地表植被盖度、植被迎风面积指数与粗糙度。而后, 通过植被迎风面积指数计算摩阻起动风速的影响函数, 研究河段摩阻起动风速的空间分布。利用实测数据检验摩阻起动风速的计算方法, 表明摩阻起动风速的计算方法误差较小。研究表明, 研究区内风速廓线均呈对数函数的分布规律, 并利用风速廓线方程计算了研究区不同下垫面 (10 m 高度) 处的起动风速, 进而得到跃移沙粒起动风速的空间分布。结果显示研究区风蚀风险最大的几个区域大多临近黄河。最后, 根据当年最大 *NDVI* 值与下一年风季 (3 月至 5 月) *NDVI* 平均值之间的关系, 提出利用当年最大 *NDVI* 值对下一年风季起动风速的预测方法, 该研究为黄河宁夏-内蒙古段的风蚀预报提供理论支撑。

关键词: 植被, 风, 速度, 归一化植被指数, 宁夏河段

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.027

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0210-10

杜鹤强, 薛 娴, 王 涛. 黄河上游宁夏-内蒙古段跃移沙粒起动风速的空间分布[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 210—219.

Du Heqiang, Xue Xian, Wang Tao. Spatial distribution of threshold wind velocity for sand saltation in Ningxia-Inner Mongolia reach of upstream of Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 210—219. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

全球干旱、半干旱地区穿越沙漠的河流均不同程度受到地表风力侵蚀的影响。风成沙堆积在河道内, 使河道发生分流、迁徙、萎缩, 决口改道, 阻塞成湖等灾害^[1-8]。黄河上游自宁夏下河沿至内蒙古托克托, 流经穿越河东沙地、乌兰布和沙漠与库布奇沙漠, 形成典型的沙漠宽谷。该区域是中国西北重要的能源基地、粮食产区、蒙回等少数民族集居区, 是黄河上游风沙、水沙活动强烈、河道演变剧烈的关键河段, 同时也是受上游大型水库联合调度影响显著的河段。近几十年来, 由于气候变化、沙漠扩张、过度用水等自然与人为影响, 该区域风沙活动剧烈, 大量风成沙堆积在黄河内, 导致黄河宁夏-内蒙古段淤积严重, 形成长达 268 km 的“新悬河”^[9]。“新悬河”不仅导致黄河—内蒙古河段出现“小水致大灾”、洪凌灾害频发的严峻局面, 而且关系到上游水资源的开发利用和大型水利工程

的布局, 甚至威胁到黄河下游河道的安全。因此建立该河段风蚀预报系统, 完善流域内风沙防护体系, 及时开展相关研究任务重大, 意义深远。

早期的风蚀预报系统类似天气预报一样, 只能对未来几天的风速进行预测, 从而起到防治风蚀的作用。且早期的研究多关注裸地的风沙活动, 对有植被覆盖的地表观测分析较少^[10]。但是地表沙粒起动风速随地表植被盖度、土壤湿度与积雪覆盖度的变化而变化^[11-12], 且下垫面特征, 如土壤颗粒组成、植被盖度、地表粗糙度、迎风面积指数等存在较大的空间异质性, 因此早期的风蚀预报系统很难确定风蚀过程发生的临界条件与精确的沙源, 且与当前的风蚀模型耦合较为困难。

近年来, 由于地表观测设备的发展, 如沙粒计数器 (sand particle counter, SPC)、便携式风蚀实验室 (portable in-suit wind erosion laboratory, PI-SWRL) 的发明^[13-14], 风蚀预报系统得到进一步发展, 如 Kimura 和 Shinoda 利用 MODIS-*NDVI* 数据对亚洲东北部地区沙尘起动风速的空间分布进行了计算^[15], Jugder 等对蒙古地区空气中 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化进行了观测与预测^[16]。

本文通过对地表植被盖度与沙粒跃移输沙量的测定, 分析了地表粗糙度、起动风速、输沙率与下垫

收稿日期: 2012-11-26 修订日期: 2013-06-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“黄河上游沙漠宽谷段风沙水沙过程与调控机理”(2011CB403306)

作者简介: 杜鹤强 (1983—), 男, 河北深泽人, 博士, 主要从事风水复合侵蚀的研究。兰州 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 730000。Email: dilikexue119@163.com

面特征的关系。基于 MODIS 与 SPOT 归一化植被指数 (NDVI) 数据, 对黄河上游宁夏-内蒙古段不同植被盖度下的沙尘起动风速进行了计算, 确定地表风蚀过程发生的临界条件, 指明具体沙源, 以期为该区域建立完善的风蚀预报系统提供条件, 同时也为该地区建立完善的风沙防护体系提供理论支撑。

1 研究区概况

黄河上游自宁夏下河沿至内蒙古托克托流经河东沙地、乌兰布和沙漠与库布奇沙漠约 1 000 km,

流域地理坐标为 $104^{\circ}34'32'' \sim 111^{\circ}30'5.8''\text{E}$, $35^{\circ}11'50'' \sim 41^{\circ}52'9.5''\text{N}$, 总面积约 15 万 km^2 (图 1)。该区域发育典型的沙漠宽谷, 谷宽可达 60 km。该区域气候类型为大陆性季风气候, 年降水量 150~400 mm, 由东向西递减, 年内降水主要集中在 7~9 月。该区域风沙活动频繁, 年平均风速为 2.5~5 m/s, 最大风速可达 17 m/s, 年沙尘暴日数为 19~22 d。该区域盛行风向主要为偏西风与偏北风, 风季为头年的 11 月至翌年的 5 月, 与植物枯黄季基本同步^[17]。

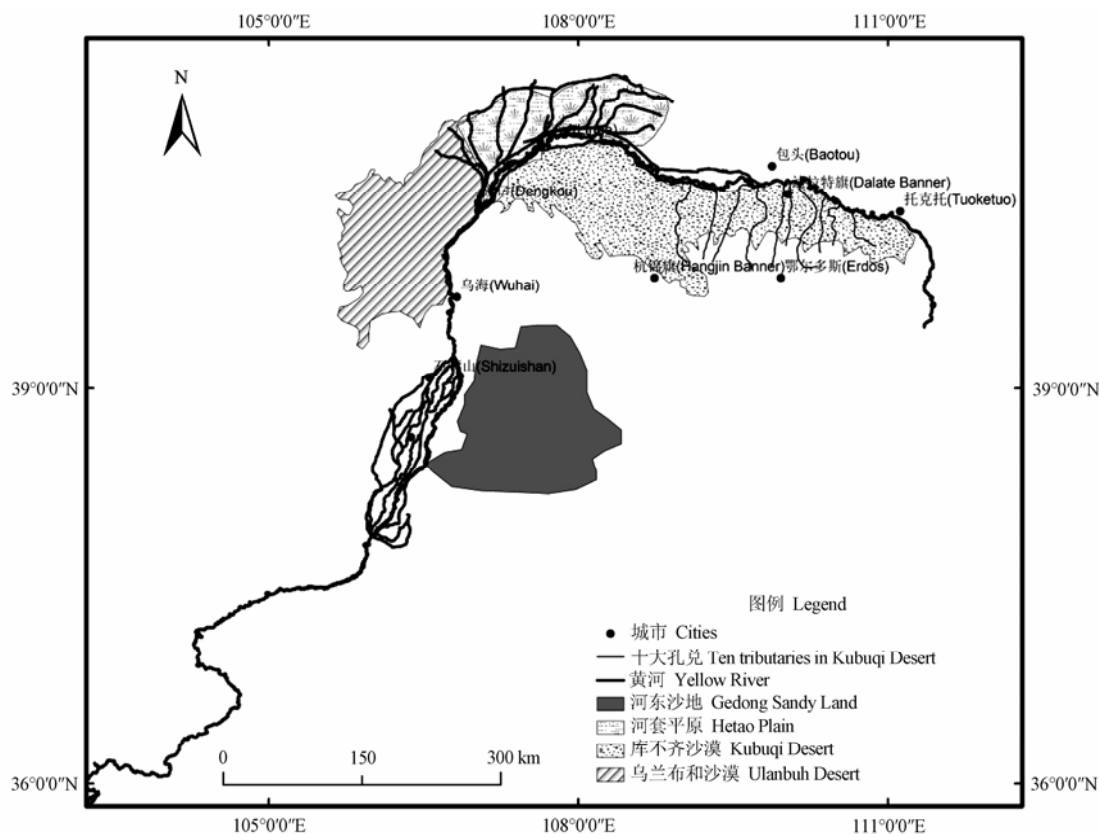


图 1 研究区示意图

Fig.1 Sketch map of study site

该河段两岸分布广阔的风沙地貌, 河东沙地位于黄河银川-惠农段的左岸, 主要分布固定、半固定沙丘与片状流沙。石嘴山-乌海段, 沿河分布大片冲积平原, 平原覆盖片状流动及半固定的起伏平缓的小沙丘, 土壤含沙量较高; 靠近乌海处丘陵北坡堆积流动沙丘, 覆沙坡面发育十分典型。乌海-磴口段, 黄河沿乌兰布和沙漠东侧绕行, 长约 150 km, 沙丘主要呈流动状态, 高约 5~6 m, 在盛行西北风作用下, 风沙流直接贯入黄河, 尤其自碱柜-磴口段部分沙丘已侵入黄河。磴口-临河段分布广阔河套平原, 土壤内富含沙物质, 冬春季节, 沙尘肆虐。临河-托克托段, 黄河南岸自西向东分布狭长的库布奇沙漠, 其沙漠沙主要通过黄河的一级支流——十大孔

兑 (孔兑为蒙语, 沟谷的意思), 进入黄河。风季大量沙漠沙堆积在十大孔兑中, 在雨季, 突发性洪水将大量泥沙冲入黄河。库布奇沙漠以罕台川为界, 以东以半固定沙丘为主, 以西多为流动沙丘, 沙丘形态为链状或格状沙丘。

黄河宁夏-内蒙古段丰富的沙源与冬春季节强劲的风力, 导致流域内风沙活动极为剧烈, 大量风成沙进入黄河, 使得该河段淤积严重, 洪凌灾害频发, 严重威胁当地人民的生活生产安全。

2 研究方法

2.1 粒径采集

对研究区内裸露沙地进行粒径采集, 沙物质采

集样方大小为 5 cm×5 cm, 深度为 10 cm。样本分布在河东沙地、乌兰布和沙漠与库布奇沙漠。样方位置主要分布在平坦沙地、沙丘迎风坡、沙丘顶部、沙丘背风坡处。每个样方设 3 个重复样本, 采集样本用自封袋封存, 带回实验室分析。在研究区内, 共采集 500 个沙物质样方。

在实验室内去除样品中的植物根须、动物残骸等杂质, 应用电动振筛机进行三维振动 15 min 后, 用电子天平 (精确到 0.01 g) 称量各粒径组的沙粒的质量。从而获取研究区地表粒径分布。

2.2 风速与输沙率观测

对乌兰布和沙漠刘拐沙头与库布奇沙漠西柳沟与毛不拉孔兑流域内的流沙地与不同植被盖度区域进行风速与输沙量的同步观测。

风速观测仪器采用美国 Met One Instruments Inc. 公司生产的 014A 风速传感器和 024A 风向传感器。风速和风向传感器的量程分别为 0~45 m/s, 0~360°; 分辨率分别为 ±0.11 m/s 和 ±5°, 起动风速均为 0.45 m/s, 其测量结果以 ASCII 码数据输出。传感器固定在 3 m 长的金属杆上, 风速传感器架设 8 个高度, 分别为 10、20、30、40、50、100、150 和 200 cm。风向传感器架设高度为 200 cm。传感器的数据采集步长设置为 1 min (1 min 的平均风速和风向)。观测时间为 2011 年 4 月至 5 月与 2012 年 4 月至 5 月, 共选择 21 个观测点, 每个观测点观测时间为 4~8 h, 按当时风速条件而定。

由于输沙量主要集中在距地表 20 cm 高度内^[18], 因此所采用的集沙仪粒径采集高度为 20 cm, 分为 10 个连续的采集梯度, 集沙管容量约为 300 mL, 每个进沙口大小为 2 cm×2 cm。

将集沙仪分别架设到观测点下风向处。依据风速大小, 每次观测时间为 20 min 至 3 h 不等, 进行重复观测, 记录每次集沙的起始时间, 共取得 520 组观测数据。采集的沙样用自封袋封存, 带回实验室, 利用自动振筛机筛析沙粒, 并称各粒径组的质量。利用实测输沙量计算单宽输沙率^[19]

$$q = \frac{Q}{2t} \quad (1)$$

式中, Q 为集沙量, g; q 为单宽输沙率, g/cm/min; t 为观测时间, min。

2.3 不同下垫面 10 m 高度起动风速的计算方法

本文利用样方调查与遥感数据相结合的方法得到 $NDVI$ 与植被盖度 VC 、迎风面积指数 λ 、地表粗糙度 z_0 与摩阻起动风速 u_{*i} 之间的关系^[20], 并利用这些关系式在 ArcGIS 9.2 软件平台下, 利用地图代数的方法计算得到不同下垫面的摩阻起动风速 u_{*i} , 进而利用风速廓线方程计算不同下垫面 10 m

高度处的起动风速, 其流程图如图 2。下面将讨论各参数之间的关系。

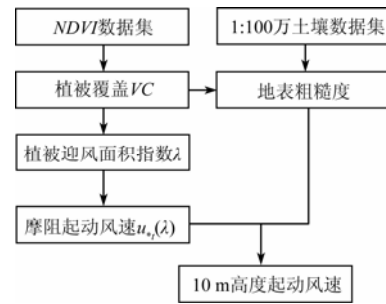


图2 起动风速计算流程图

Fig.2 Flowchart for calculating threshold wind velocity

2.3.1 植被盖度 VC 与 $NDVI$

对各观测点的植被盖度进行调查, 同时用 GPS 记录各观测点的坐标。植被调查应用样方调查与图像处理相结合的方法进行。样方大小为 10 m×10 m, 应用数码相机对样方内植被的正上方 (盖度) 与侧向 (迎风面积指数即地表植被侧向面积与植被占地面积的比值) 的不同高度处进行拍照, 按裸露地表与植被枝干灰度值的不同, 应用图像处理软件 ERDAS IMAGINE 9.1 对照片进行非监督分类, 利用分类结果中植被枝干与裸露地表分别占象元比例统计植被盖度与迎风面积指数。植被调查结果如表 1 所示。

归一化植被指数 ($NDVI$) 是反映土地植被覆盖状况的一种遥感指标, 一般可表示为^[15]

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2)$$

式中, ρ_{NIR} 表示近红外波段的反射值, ρ_{RED} 表示红光波段的反射值。本研究采用 SPOT- $NDVI$ 数据集 (时间分辨率为 10 d, 空间分辨率为 1 000 m) 与 MODIS- $NDVI$ 产品 (时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为 250 m) 作为数据源, 进行图像融合得到时间分辨率为 10 d, 空间分辨率为 250 m 的 $NDVI$ 数据集。

将各样方内植被盖度与同时期同地点的 $NDVI$ 进行对比, 得到植被盖度与 $NDVI$ 之间的关系。

2.3.2 粗糙度 z_0 计算

利用观测点所获得的风速廓线数据计算不同植被盖度下的粗糙度。当大气环境为中性条件时, 风速廓线可以用一个对数函数表示^[21]

$$u_z = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (3)$$

式中, u_z 表示 z 高度处的风速, m/s; u_* 为摩阻风速, m/s; k 为 Von Karman 常数, 取 0.4; d 为零位移平面, m; z_0 为地表粗糙度, m。由于研究区内风季时 (冬春季节, 盛行西北风), 植被盖度较低, 一般小于 20%, 风应力能够轻易触及地表, 因此将零

位移平面假设为 0。因此，式（3）可以变换为

$$u_z = \frac{u_*}{k} \ln(z) - \frac{u_*}{k} \ln(z_0) \quad (4)$$

令 u_*/k 为斜率， $-u_*\ln(z_0)/k$ 为截距，式（4）变

换以 $\ln(z)$ 为自变量， u_z 为因变量的线性形式

$$u_z = a \ln(z) + b \quad (5)$$

式中， a 和 b 都为风速廓线的拟合系数，拟合结果如表 1 所示。

表 1 地表植被参数与风速廓线拟合

Table 1 Surface vegetative parameters and fitting wind profile functions

编号 Number	植被类型 Vegetation types	植被调查结果 Vegetation survey results		风速廓线拟合公式 Wind profile fitting functions $u_z = a \ln(z) + b$		
		植被盖度 VC	迎风面积指数 λ	拟合系数 a	拟合系数 b	决定系数 R^2
1	芨芨草	0.143	0.060	0.758	4.006	0.921
2	冰草	0.162	0.062	0.422	2.842	0.867
3	冰草	0.165	0.063	1.122	6.652	0.967
4	冰草	0.138	0.052	0.67	3.102	0.989
5	冰草和芨芨草	0.177	0.069	1.395	7.111	0.901
6	梭梭	0.153	0.058	0.649	2.695	0.917
7	梭梭	0.134	0.052	0.475	2.039	0.935
8	白茎绢蒿	0.153	0.069	1.003	4.755	0.911
9	白茎绢蒿	0.167	0.058	1.285	4.22	0.926
10	白茎绢蒿	0.165	0.063	1.104	3.535	0.970
11	白茎绢蒿	0.158	0.060	0.712	2.92	0.972
12	油蒿	0.189	0.074	1.681	5.226	0.976
13	油蒿	0.167	0.064	1.138	4.486	0.982
14	油蒿	0.166	0.064	0.881	5.771	0.953
15	油蒿	0.162	0.062	1.807	6.82	0.936
16	油蒿	0.137	0.053	0.657	2.988	0.962
17	杞柳和白茎绢蒿	0.172	0.066	0.489	1.978	0.910
18	杞柳和白茎绢蒿	0.178	0.069	0.532	3.148	0.937
19	无植被	0	0	0.045	1.011	0.912
20	无植被	0	0	0.048	1.063	0.875
21	无植被	0	0	0.047	1.111	0.924

根据粗糙度的定义（风速降为 0 时，距离地面的高度），故当 $u_z=0$ 时， $z=z_0$ 。因此，粗糙度可以写为

$$z_0 = e^{-b/a} \quad (6)$$

根据风速廓线的拟合结果，可获得不同植被条件下的粗糙度。

2.3.3 摩阻起动风速

自 Bagnold 以来，不同的学者提出了许多不同形式的摩阻起动风速的计算公式^[21-23]。本研究采用 Shao 等提出的方法计算摩阻起动风速^[24]

$$u_{*t}(d_s; \lambda, \theta) = u_{*t}(d_s) f_\lambda(\lambda) f_w(\theta) \quad (7)$$

式中， $u_{*t}(d_s; \lambda, \theta)$ 表示在植被与土壤水分影响下的沙粒摩阻起动风速，m/s； λ 为地表粗糙元（植被）的迎风面积指数； θ 表示土壤体积含水量，mL/m³。 f_λ 与 f_w 分别表示地表粗糙元迎风面积指数 λ 与土壤体积含水量 θ 对起动摩阻风速的影响函数。 u_{*t} 表示在理想状态下（即干燥、无植被覆盖、地表组成物质较疏松的情况下）粒径为 d_s 的沙粒的起动风速，m/s。其表达式为

$$u_{*t}(d_s) = \sqrt{a_1 \left(\frac{\rho_p}{\rho_a} g d_s + \frac{a_2}{\rho_a d_s} \right)} \quad (8)$$

式中， ρ_p 表示沙粒的密度，kg/m³； ρ_a 表示空气密度，kg/m³； g 为重力加速度，9.8 m/s²； a_1 为一个无量纲参数，根据 Shao 等的建议，其值为 0.0123^[24]； a_2 是一个量纲参数为 3×10⁻⁴ kg/s²^[24]。式（8）左右两边各乘以 d_s ，可变换为一个以 d_s 为自变量的二次函数，经计算，当 $d_s=0.013$ 时， u_{*t} 取值最小。

由于研究区内风蚀过程主要发生在冬春季节，期间降水量稀少。因此，可忽略土壤水因素对起动风速的影响。Raupach 等通过试验提出一个植被迎风面积指数对摩阻起动风速的影响函数 f_λ ^[25]，如下式

$$f_\lambda = \frac{u_{*t}(\lambda)}{u_{*t}} = (1 - m_r \sigma_r \lambda)^{1/2} (1 + m_r \beta_r \lambda)^{1/2} \quad (9)$$

式中， σ_r 表示植被基部面积与迎风面积的比值， β_r 表示作用于在单株植被上的阻力与作用于地表的阻力的比值； m_r 为一个调整参数，其值小于 1，其

大小主要由作用于地表不均一的应力所决定。Raupach 等根据前人的风洞试验与实地观测结果^[26-29], 建议这三个参数的取值为 $\beta_r=90$, $m_r=0.5$, $\sigma_r=1$ ^[24], Kimura 等在蒙古草原上的观测结果验证了这些参数的取值的合理性^[15]。因此本研究采用 Raupach 所建议的参数取值对影响函数 f_λ 进行计算

关于植被迎风面积指数 λ 可通过 Raupach 等提出的公式进行计算^[24]

$$\lambda = -c_\lambda \ln(1-VC/100) \quad (10)$$

式中, VC 表示植被盖度, 其取值范围在 0~1 之间, c_λ 是一个经验系数, 对于植被残茬而言, c_λ 取值在 0.35 左右^[24]。

利用 Owen 提出的输沙率计算模型^[25], 对不同植被盖度下的地表输沙率进行计算。

$$q = \frac{c_o A_c \rho_a u_*^2}{g} \left[1 - \left(\frac{u_{*t}}{u_*} \right)^2 \right] \quad (11)$$

在理论上, c_o 为一个无量纲系数, 由沙粒的最终速度和摩阻速度的比值决定, 即 $c_o=0.25+\omega_t(ds)/3u_*$, 其中, ω_t 为跃移沙粒的最终速度, m/s。但由于沙粒的最终速度难以确定, 因此通常通过试验来确定 c_o 的值。经试验验证, 其值在 1 附近变动^[30]。 A_c 表示地表可蚀面积所占的比例, 其大小主要由植被的迎风面积指数决定。

2.3.4 起动风速的空间分布

由于城镇路面硬化的原因, 基本不会发生风蚀。水体与永久积雪的地表也不会发生风蚀^[11]。因此, 根据 2000 年 1:10 万土地利用图, 在 $NDVI$ 数据集上, 将城镇用地、水体与冰川或永久积雪地剔除。在无植被覆盖地区, 根据 Sherman 等提出的粗糙度与沙粒粒径之间的函数关系获得^[31]

$$z_0 = \frac{d_{50}}{15} + \frac{0.025(u_* - u_{*t})^2}{g} \quad (12)$$

式中, d_{50} 为沙粒粒径的中值, m。当摩阻风速等于或接近起动摩阻风速时, 假定地表处于蚀积平衡状态, 可根据式 (12) 对地表粗糙度进行计算。土壤粒径数据的空间分布可根据研究区 1:100 万土壤数据库与沙物质采样数据获得。

根据图 2 所示, 利用式 (7)、式 (8)、式 (9) 和式 (10), 在 ArcGIS 9.2 软件平台下, 利用地图代数的方法计算得到不同植被条件下的摩阻起动风速 u_{*t} , 进而利用式 (3) 计算不同植被条件下 10 m 高度处的起动风速。

2.4 当年最大 $NDVI$ 与下一年风季 $NDVI$

以上讨论的是基于实时 $NDVI$ 对起动风速的估算方法。该方法只能对研究区的起动风速起到估算

的作用, 而不能对其进行预测。因此, 该部分将讨论当年最大 $NDVI$ 与下一年风季 $NDVI$ 之间的关系。由于研究区的风季处于冬春季, 此时植物尚未返青或刚刚返青, 因此当年风季的植被状况多是对上一年生长季植被状态的继承。由此推断, 当年生长季最大 $NDVI$ 值与下一年风季的 $NDVI$ 值存在相关性。如果能够建立当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 $NDVI$ 值之间的函数关系, 则可通过当年的最大 $NDVI$ 值对下一年风季的起动风速进行预测。

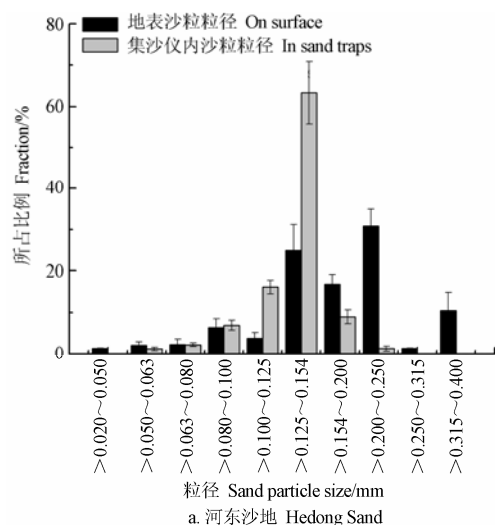
本文通过对研究区内 1998 年至 2011 年中卫、中宁、银川、石嘴山、乌海、磴口、临河、包头、东胜、与杭锦旗, 10 个站点当年最大 $NDVI$ 与下一年风季 (3—5 月) $NDVI$ 的平均值进行了统计, 对二者进行了回归分析, 从而应用当年的最大 $NDVI$ 值对下一年风季 $NDVI$ 进行预测。

3 结果与分析

3.1 地表粒径与风速廓线

通过对地表采样点与集沙仪内的粒径筛析得到研究区 3 大沙地的地表与跃移沙粒的粒径分布 (图 3)。河东沙地地表沙粒分布情况与乌兰布和沙漠和库布奇沙漠略有不同, 其粒径主要分布在 0.125~0.154 mm 之间与 0.2~0.25 mm 之间。乌兰布和沙漠与库布奇沙漠地表粒径分布情况类似, 其主要分布范围均在 0.125~0.154 mm 之间。而集沙仪内的粒径则均呈单峰态分布, 分布范围均在 0.125~0.154 mm 之间。这一结果也从侧面印证了式 (8) 的合理性, 即粒径为 0.13 mm 的沙粒起动时, 所需风力最小。

由表 1 可得, 在不同植被盖度下其风速廓线基本呈对数形式分布, 函数拟合中, 决定系数 R^2 均大于 0.85。植被盖度并未对风速廓线的分布形式产生明显影响。



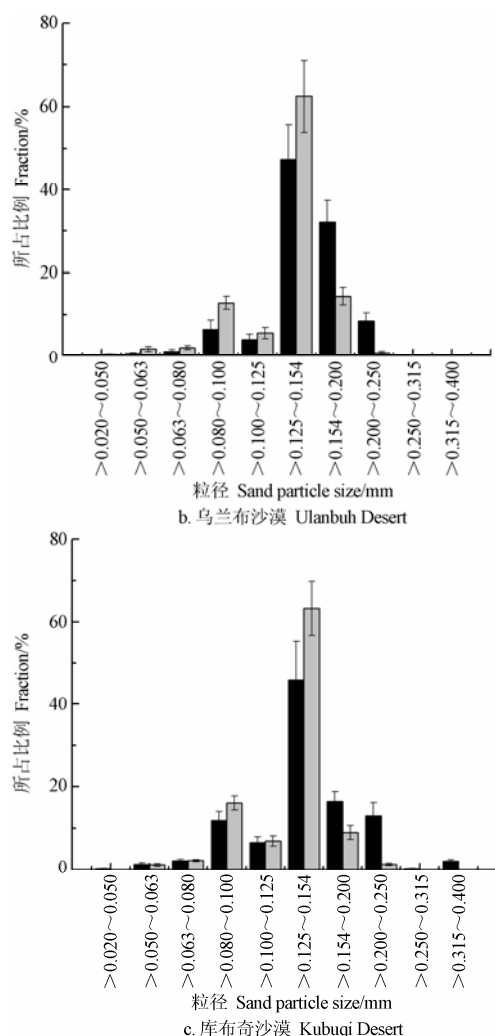


Fig.3 Particle size distribution in study area

3.2 NDVI、植被盖度及粗糙度之间的关系

通过 2011 年与 2012 年风季 (3—5 月) 对研究区 NDVI 值与植被盖度值的同步观测, 共获取 19 对样本。利用相关性分析, 建立二者之间的关系 (图 4a)。在观测时间内, 地表植被大多没有返青, 但 NDVI 值与植被盖度 VC 仍然表现出很强的相关性, 相关系数 $r \approx 0.93$ 。前人的研究表明, 在植被生长期, 蒙古地区与黄土高原地区的 NDVI 值与植被盖度 VC 也显示出很强的相关性 (图 4a) [13,32-33]。整合前人的研究结果与研究区内的观测结果, 对 NDVI 值与植被盖度 VC 进行线性拟合, 得到较好的拟合效果, $R^2=0.982$ 。

利用风速廓线拟合结果 (18 个样本) 对不同观测点的粗糙度进行计算, 得到不同植被盖度下的粗糙度。将本次计算结果与前人研究结果对比 [13,34], 发现在植被盖度 VC 与粗糙度 z_0 之间存在较好的线性关系 (图 4b)。在本次观测中, 研究区内大部分植被没有返青, 植被盖度均小于 0.2。即使如此, 也能清晰看到粗糙度随植被盖度的增加而增加, 相关系数 r 达到 0.81。整合 Kimura 等在蒙古 Bayan

Unjuul 与 Li 等在内蒙古奈曼的观测结果 [13,33], 得到植被盖度与粗糙度之间的线性函数 (图 4b)。

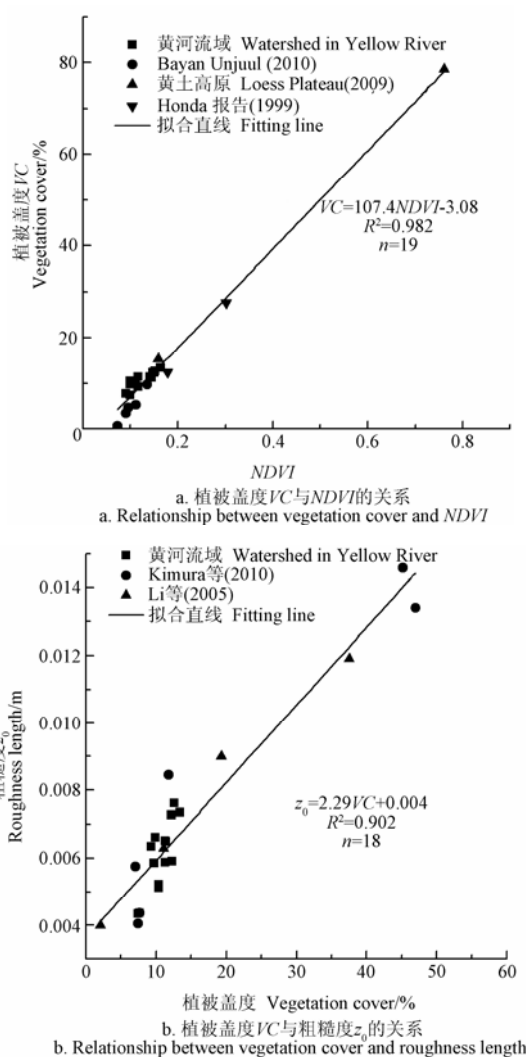


Fig.4 Relationships among NDVI, vegetation coverage VC and roughness length z_0

3.3 摩阻风速、摩阻起动风速与输沙率之间的关系

由于粒径为 0.13 mm 的沙粒所需启动风速最小, 因此利用式 (8) 计算粒径为 0.13 mm 的沙粒的摩阻起动风速。得到 0.13 mm 沙粒所需的摩阻起动风速为 0.229 m/s。利用所测得的风速数据计算摩阻风速 u_* , 筛选出大于摩阻起动风速的摩阻风速, 并统计其每次持续的时间, 作为每次的集沙时间, 共得到 74 个集沙样本。

利用实测输沙量计算输沙率, 并利用曲线回归的方法拟合摩阻风速与裸地输沙率之间的关系 (图 5)。并拟合输沙率 q 与摩阻风速 u_* 之间的关系式, 关系式采用式 (11) 形式。因而可通过图 5 中的关系式, 可对式 (11) 中的无量纲参数 c_0 进行率定。得到无量纲参数 c_0 为 0.98, 与前人得到的试验结果基本吻合 [29]。

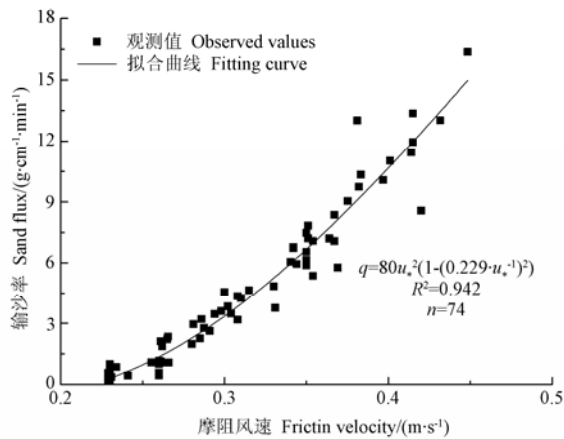


图 5 摩擦风速与输沙率之间的关系

Fig.5 Relationship between friction velocity and saltation sand flux

有植被覆盖地表摩擦起动风速的确定需要大量的风洞及野外试验，耗费大量的人力和时间。本研究中，通过不同植被盖度下输沙量的实测值来验证摩擦起动风速的计算方法。应用式（7）、式（8）、式（9）、式（10）和式（11）计算有植被覆盖地表的输沙率，并与实测值进行对比。通过统计参数均方根误差（ $RMSE$ ）与离差（ R_e ）对模拟结果进行评价， $RMSE$ 与 R_e 的计算方法如下

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \right)^{1/2} \tag{13}$$

$$R_e = \left(\frac{P_i - O_i}{O_i} \right) \times 100\% \tag{14}$$

式中， O_i 与 P_i 分别为第*i*次的观测值与预测值， n

为观测次数。评价结果如表 2 所示。有植被覆盖地表输沙率的均方根误差 $RMSE$ 均小于 0.05，平均离差绝对值 $|R_e|$ 均小于 20%。说明输沙率模型（式（11））对有植被覆盖地表输沙率模拟精度较高。

表 2 有植被覆盖地表输沙率模拟结果

Table 2 Simulated results of sand flux on vegetative surface

观测点 Observed points	观测次数 Observed times	植被盖度 Vegetation cover/%	迎风面积 Frontal area/λ	均方根误差 RMSE (g·m ⁻¹ ·min ⁻¹)	平均离差 绝对值 R _e /%
1	8	14.3	0.060	0.032	11.199
2	9	16.2	0.062	0.040	12.603
3	7	16.5	0.063	0.035	12.091
4	5	13.8	0.052	0.043	15.814
5	6	17.7	0.069	0.020	9.477
6	5	15.3	0.058	0.037	12.059
7	6	13.4	0.052	0.028	10.738
8	7	15.3	0.069	0.048	16.774
9	5	16.7	0.058	0.022	11.903
10	8	16.5	0.063	0.038	7.725
11	9	15.8	0.060	0.038	16.723
12	6	18.9	0.074	0.015	12.435
13	9	16.7	0.064	0.019	13.365
14	7	16.6	0.064	0.009	8.725
15	6	16.2	0.062	0.023	13.767
16	8	13.7	0.053	0.019	5.742
17	9	17.2	0.066	0.034	14.542
18	8	17.8	0.069	0.036	15.654

3.4 起动风速的空间分布

通过 $NDVI$ 数据集对研究区摩擦起动风速的空间分布进行计算。由于摩擦风速在风蚀预报中应用不便，因此需要将摩擦起动风速转为 10 m 高度的风速，与标准气象塔风速观测高度一致。根据风速廓线的分布函数，利用式（3）对 10 m 高度处起动风速进行计算，得到研究区沙粒起动风速的空间分布（图 6）。

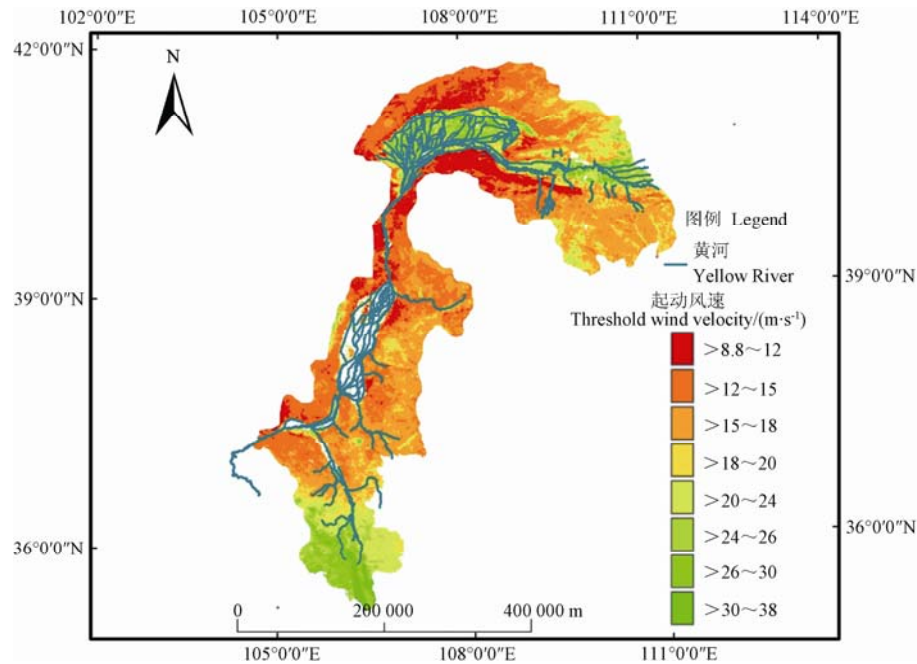


图 6 2011 年 4 月 21 日黄河上游宁蒙河段 10 m 高度起动风速的空间分布

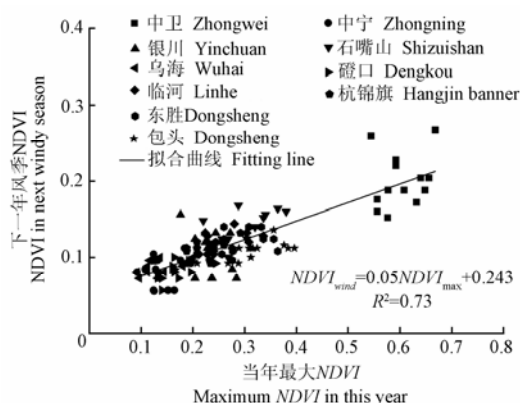
Fig.6 Spatial distribution of threshold wind velocity at 10 m height in Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River on 21st April 2011

由图 6 可知, 风蚀风险最大的区域主要分布在腾格里沙漠边缘地区、河东沙地北部、乌兰布和沙漠、库布奇沙漠西部与河套平原北部的戈壁地区, 其起动风速在 $8.8 \sim 12 \text{ m/s}$ 间。每年的 3 月至 5 月, 这些区域的日最大风速大多能超过其起动风速。因此这些区域的风蚀风险系数极高。河东沙地的大部分地区与库布奇沙漠的东部地区风蚀风险也较大, 起动风速一般都在 $12 \sim 20 \text{ m/s}$ 间。风蚀风险最小的地区主要分布在 3 个区域, 分别为清水河上游地区包括泾源、德隆、西吉与固原地区, 河套平原与托克托县。这 3 个区域的起动风速均超过了 30 m/s , 风蚀过程较难发生。河套平原与托克托县均属于黄灌区, 地表植被盖度较高, 即使在冬春季节, 植被的残茬对地表也能起到一定的保护作用。清水河上游地区海拔较高, 降水相对充足, 地表植被条件较好, 因此风蚀风险较小。

由图 6 可知, 风蚀风险最高的区域中, 除河套平原北部戈壁地区外, 其余 4 个区域均临近黄河。在风力的作用下, 大量风成沙被吹入黄河。由于风成沙大多是大于 0.08 mm 的粗沙, 沉积速度较快。且宁蒙河段大多处于平原地区, 河流比降较小, 尤其是三湖河口至托克托段, 黄河干流比降只有 $0.1\% \sim 0.12\%$ 。另外该区域密布农田饮水工程, 加上上游龙羊峡与刘家峡水库的联合调度, 该区域难以形成大的洪峰。因此, 泥沙在宁蒙河段大量淤积, 对流域内生产生活带来极大地威胁。因此, 风沙防护体系应重点构建在风蚀风险较高的, 且临近黄河的区域, 如河东沙地、乌兰布和沙漠与库布奇沙漠西部。

3.5 当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 $NDVI$

通过对研究区 10 个站点当年最大 $NDVI$ 与下一年风季 (3—5 月) $NDVI$ 的回归分析, 得到二者之间的关系 (图 7)。



注: $NDVI_{wind}$ 表示下一年风季 $NDVI$ 的平均值;
 $NDVI_{max}$ 表示当年 $NDVI$ 的最大值。

图 7 研究区内 10 个典型站点当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 (3—5 月) $NDVI$ 平均值之间的关系

Fig.7 Relationship between yearly maximum $NDVI$ and windy season average $NDVI$ in next year for 10 stations in study area

在风季时, 研究区内大部分植被没有返青, 风季 $NDVI$ 的平均值反映的是前一年植被残茬对光谱敏感程度。因此当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 $NDVI$ 的平均值之间存在一定的相关关系 ($R^2=0.73$)。图中显示某些单个站点, 如中卫站与银川站, 当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 $NDVI$ 的平均值之间的相关性较小, 主要是中卫和银川是流域内主要的农业区。作物收获后会翻耕, 地表残茬较少, 风季时作物大多没有返青。因此这 2 个站点当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 $NDVI$ 的平均值之间相关性较小。对于东胜、杭锦旗、包头等非农业为主的地区, 根据年鉴数据, 近年来执行退耕措施与禁牧措施比较得力, 地表植被残茬保留较好, 因此, 图中显示, 这些站点当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 $NDVI$ 的平均值之间存在较强的相关性。

利用图 7 中所列函数关系, 通过式 (13), 利用当年最大 $NDVI$ 值预测下一年风季 $NDVI$ 的平均值, 其误差均方根为 ± 0.019 。根据上文所得 $NDVI$ 、植被盖度 VC 、迎风面积指数 λ 、植被对起动风速的影响函数 $f_v(\lambda)$ 之间的关系, 经计算可得, 应用前一年最大 $NDVI$ 值对全区域起动风速的预测误差约为 $\pm 1 \text{ m/s}$ 。

4 结 论

本文通过样方调查、图像处理与函数拟合等观测与分析方法, 获取了河东沙地、乌兰布和沙漠与库布奇沙漠几个典型区的地表粒径分布状况。并发现研究区内风季植被盖度 VC 与 $NDVI$ 值、粗糙度 z_0 之间存在较强线性关系, 植被盖度 VC 与植被的迎风面积指数 λ 存在对数函数关系。利用实测输沙率数据对输沙率计算模型进行验证, 发现模型的模拟精度较高, 模拟均方跟误差 $RMSE$ 均小于 $0.05 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{min})$, 平均离差绝对值 $|R_e|$ 均小于 20%。

基于研究区空间分辨率为 250 m 的 $NDVI$ 数据集, 得到研究区起动风速的空间分布情况。结果表明, 河套平原北部戈壁地区、腾格里沙漠边缘地区、河东沙地北部、乌兰布和沙漠与库布奇沙漠西部地区的起动风速均小于 12 m/s , 风蚀风险极大。并且, 除河套平原北部戈壁地区外, 其余风蚀风险较大的地区均临近黄河, 大量风成沙被吹入黄河, 因此, 当地的水保部门, 对黄河宁夏—内蒙古段的风蚀风险应予以相当的重视。

本文提出建立当年最大 $NDVI$ 值与下一年风季 $NDVI$ 平均值之间的函数关系, 从而达到应用当年最大 $NDVI$ 预测下一年起动风速的目的。经计算可得, 利用当年最大 $NDVI$ 值对下一年风季 $NDVI$ 平均值预测的均方根误差为 ± 0.019 , 相对应的对起动风速的预测误差为 $\pm 1 \text{ m/s}$ 。

[参 考 文 献]

- [1] Bourke M C, Pickup G. Fluvial form variability in arid central Australia[A]. Miller, A.J. and Gupta A. Varieties of fluvial form[C]// Chichester: Wiley, 1999.
- [2] Jacobberger P A. Mapping abandoned river channels in Mali through directional filtering of Thematic Mapper data[J]. Remote Sensing of the Environment, 1988, 26(2): 161—170.
- [3] Jones L S, Blakey R C. Eolian-fluvial interaction in the Page Sandstone (Middle Jurassic) in south-central Utah, USA: A case study of erg-margin processes[J]. Sedimentary Geology, 1997, 109(1/2): 181—198.
- [4] Knighton A D, Nanson, G C. Waterholes and their significance in the anastomosing channel system of Cooper Creek, Australia[J]. Geomorphology, 1994, 9(4): 311—324.
- [5] McIntosh R J. Floodplain geomorphology and human occupation of the upper inland delta of the Niger[J]. Geographical Journal, 1983, 149(2): 182—201.
- [6] Tooth S. Downstream changes in floodplain character on the Northern Plains of arid central Australia[A]. Smith N.D. and Rogers, J. editors, Fluvial sedimentology VI[C]// Oxford, 1999.
- [7] Teller J T, Lancaster N. Lacustrine sediments at Narabeb in the central Namib Desert, Namibia[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1986, 56(3/4): 177—195.
- [8] 张克存, 牛清河, 屈建军, 等. 青藏铁路沱沱河路段流场特征及沙害形成机理[J]. 干旱区研究, 2010, 27(2): 303—308.
Zhang Kecun, Niu Qinghe, Qu Jianjun, et al. Study on the characteristics of flow field and the mechanism of wind-blown and disaster in the Tuotuohe Region along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(3): 303-308. (in Chinese with English abstract)
- [9] Ta W Q, Yang G S, Qu J J, et al. The effect of the coarse aeolian sand on siltation of the Inner Mongolian Reach of the Yellow River[J]. Environmental Geology, 2003, 43(2): 493—502.
- [10] Song S K. Synoptic Meteorological Feature Affecting Asian Dust Transport and Its Quantitative Estimation[D]. Pusan, Korea, Pusan National University, 2005.
- [11] Mikami M, Yamada Y, Ishizuka M, et al. Measurement of saltation process over Gobi and sand dunes in the Taklimakan Desert, China, with newly developed sand particle counter[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: D18S02.
- [12] Etyemezian V, Nikolich G, Ahonen S, et al. The portable in situ wind erosion laboratory (PI-SWRL): A new method to measure PM10 windblow dust properties and potential for emissions[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(18): 3789—3796.
- [13] Kimura R, Shinoda M. Spatial distribution of threshold wind speeds for dust outbreaks in northeast Asia[J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 319—325.
- [14] Lancaster N, Bass A. Influence of vegetative cover on sand transport by wind: Field studies at Owens lake, California[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23: 69—82.
- [15] Ishizuka M, Mikami M, Yamada Y, et al. An observation study of soil moisture effects on wind erosion at a gobi site in the Taklimakan desert[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: D18S03.
- [16] Jugder D, Shinoda M, Sugimoto N. Spatial and temporal variations of dust concentrations in the Gobi Desert of Mongolia[J]. Global and Planetary Change, 2011, 78(1/2): 14—22.
- [17] 杨根生, 拓万全, 戴丰年, 等. 风沙对黄河内蒙古段河道泥沙淤积的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 152—159.
Yang Gensheng, Ta Wanquan, Dai Fengnian, et al. Contribution of sand sources to the silting of riverbed in Inner Mongolia Section of Huanghe River[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(2): 152—159. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杜鹤强, 韩致文, 王涛, 等. 新月形沙丘表面风速廓线与风沙流结构变异研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 9—15.
Du Heqiang, Han Zhiwen, Wang Tao, et al. Variation of wind profile and sand flow structure above barchans dune[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 9—15. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 68—72.
- [20] 杜鹤强, 韩致文, 颜长珍, 等. 西北防护林防风效应研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 117—120.
Du Heqiang, Han Zhiwen, Yan Changzhen, et al. Effects of wind prevention by the Northwest Shelterbelt[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 117—120. (in Chinese with English abstract)
- [21] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Chapman and Hall 1941.
- [22] Stout J E, Zobeck T M. Intermittent saltation[J]. Sedimentology, 1997, 44(9): 959—970.
- [23] Gillette D A, Fryrear D W, Xiao J B, et al. Large-scale variability of wind erosion mass flux rates at Owens Lake 1. Vertical profiles of horizontal mass fluxes of wind-eroded particles with diameter greater than 50 μm [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 102(22): 25972—25987.
- [24] Shao Y, Raupach M R, Ley J F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34(3): 309—342.
- [25] Raupach M R, Gillette D A, Leys J F. The effect of roughness elements on wind erosion threshold[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D2): 3023—3029.
- [26] Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution[J]. Agricultural Meteorology, 1971, 8(3): 269—292.

- [27] Lyles L, Allison B E. Wind erosion: the protective role of simulated standing stubble[J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 1976, 19(1): 61—64.
- [28] Gillette D A, Stockton P H. The effect of nonerodible particles on wind erosion at erodible surface[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(9): 12885—12893.
- [29] Musick H B, Gillette D A. Field evaluation of relationship between a vegetation structural parameter and sheltering against wind erosion[J]. Land Degradation Rehab, 1990, 2(2): 87—94.
- [30] Owen R P. Saltation of uniform grains in air[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1964, 20(4): 225—242.
- [31] Sherman D J. An equilibrium relationship for shear velocity and apparent roughness length in aeolian saltation[J]. Geomorphology, 1992, 5(3/5): 419—431.
- [32] Honda Y. Development of estimation method for vegetation biomass using satellite observation[R]. Report of CREST by Japan Science and Technology Agency, 1999, 1154—1161.
- [33] Kimura R, Bai L, Wang J. Relationship among dust outbreaks, vegetation cover, and surface soil water content on the Loess Plateau of China, 1999-2000[J]. Catena, 2009, 77(3): 292—296.
- [34] Li F R, Kang L F, Zhang H, et al. Changes in intensity of wind erosion at different stages of degradation development in grasslands of Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(4): 567—585.

Spatial distribution of threshold wind velocity for sand saltation in Ningxia-Inner Mongolia reach of upstream of Yellow River

Du Heqiang, Xue Xian, Wang Tao

(Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Through the Hedong Sandy Land, the Ulanbuh Desert, and the Kubuqi Desert, Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River suffered from serious blown sand hazard. A mass of aeolian sediment deposited in the Yellow River and brought a serious siltation in the Yellow River. It is in urgent need to develop a warning system to reveal the spatial distribution of threshold wind velocity for wind erosion in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River. The aim of this research is to provide theoretical guidance to prevent the blown sand hazard in this region. In this research, integrated Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data set and the observations in the study area, the threshold wind velocities of different surfaces were calculated, and spatial distribution of threshold wind velocity for wind erosion in the study area was revealed. Firstly, using a map of NDVI, we calculated the vegetation coverage, frontal area, and roughness length in the study area. Then, the frontal area was used to calculate the threshold friction velocity by the vegetation influence function. With tested calculation method of threshold friction velocity using the observed sand flux data, we found the simulated errors were all small. Based on the truth that the wind profiles above the study area all obeyed logarithmical functions, we estimated the spatial distribution of threshold wind velocity for wind erosion in the watershed of Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River. We found that most of the regions that with wind erosion risk were near the Yellow River. At last, this paper proposed a method that using the maximum NDVI in this year to predict the threshold wind velocity based on the relationship between NDIV in the next windy season and maximum that in this year. We hope this research would provide some theoretical advises for predicting the wind erosion hazard in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River.

Key words: vegetation, wind, velocity, Normalized Different Vegetation Index(NDVI), Ningxia-Inner Mongolia Reach

(责任编辑: 张俊芳)