

# 黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征

孙宝洋<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2,3\*</sup>, 张 洋<sup>2</sup>, 马 波<sup>1</sup>, 张乐涛<sup>3</sup>, 肖俊波<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

2. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘 要:** 十大孔兑的风蚀作用过程为河道输沙提供了重要的泥沙来源。为揭示十大孔兑风蚀作用规律, 选取 3 种典型下垫面建立风蚀监测小区, 利用侵蚀针法对研究区风蚀量及地表形态进行了为期 1 a 的实地监测。在此基础上, 综合当地气象资料, 分析研究区风蚀强度及地表形态变化规律, 结果表明: 1) 研究区风蚀强度与平均极大风速呈指数关系, 10—11 月和 4—5 月风蚀强度大于全年其他时间, 4—5 月风蚀强度最大, 是全年平均风蚀强度的 2~3 倍; 2) 土壤可蚀性颗粒含量大小分别为库布齐沙漠区 (94.95%) > 黄土丘陵沟壑区 (62.18%) > 黄河南岸冲积平原区 (44.51%)。库布齐沙漠区属于中度风蚀, 黄土丘陵沟壑区和黄河南岸冲积平原区属于轻度风蚀, 十大孔兑 3 种地形年累积风蚀量估算结果分别为 8.74、5.95 和 5.16 Mt, 风沙入黄所占总量比例分别为 44.03%、29.97% 和 26.00%; 3) 研究区风蚀发生的方向主要为东南方向, 监测小区的风蚀过程主要为堆积-吹蚀-推移-再堆积, 地表起伏度随风蚀强度增加呈线性增加趋势 ( $R^2=0.78, P<0.05$ )。研究结果可为防治十大孔兑泥沙淤积与合理配置水土保持措施提供科学依据。

**关键词:** 侵蚀; 风; 土壤; 风蚀强度; 时空变化; 地表形态

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.016

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0112-08

孙宝洋, 李占斌, 张 洋, 马 波, 张乐涛, 肖俊波. 黄河内蒙古支流“十大孔兑”区风蚀强度时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 112—119. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.016 http://www.tcsae.org

Sun Baoyang, Li Zhanbin, Zhang Yang, Ma Bo, Zhang Letao, Xiao Junbo. Spatiotemporal variation of wind erosion intensity in region of Ten Small Tributaries in Inner Mongolia branch of Yellow River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 112—119. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.016 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

风蚀是一种重要的侵蚀作用。风蚀面积约占全球陆地面积的 1/4, 广泛分布在干旱、半干旱及部分半湿润地区<sup>[1-2]</sup>。穿越这些地区的河流将受到不同程度地表风力侵蚀的影响, 由于河流通常为风沙传输的边界, 因此风沙已成为河流泥沙的主要来源<sup>[3]</sup>。风沙堆积河道可使河床的行洪、行凌能力降低, 导致河道决口, 阻塞成湖等自然灾害发生<sup>[4-5]</sup>。国内对黄河河道淤积问题已开展了深入的研究。在 1958—1987 年间, 乌兰布和沙漠每年大约有 1 780 万 t 的风沙进入到黄河<sup>[6-7]</sup>。1986—2013 年间整个宁蒙河段, 除年均风沙入黄量最大的石嘴山—巴彦高勒段 (高达  $9.31 \times 10^6$  t/a) 在减小, 其余河段风沙入黄量并未呈现出明显的减小趋势<sup>[8]</sup>, 2001—2010 年宁夏与内蒙古地区对黄河风蚀沙土年均贡献率为 15.87 Mt, 对十大孔兑年均

贡献率为 7.33 Mt<sup>[9]</sup>。通过研究宁夏-内蒙古河段沙粒起动风速的空间分布规律, 发现风蚀风险最大的几个区域大多临近黄河<sup>[10]</sup>。从流域尺度分析, 水蚀风蚀交错带风蚀贡献率最大的区为穿过风沙区和黄土丘陵沟壑区的流域<sup>[11]</sup>。各风向风沙入河量与各风向出现频率之间存在较强的正相关<sup>[12]</sup>。以上关于风沙入黄的研究多采用国外引入的风蚀预报模型估算大尺度区域的土壤风蚀量<sup>[13-15]</sup>。然而, 引入国外模型的应用效果并不理想, 而国内则尚未建立被广泛认可的风蚀模型, 并且无法对模拟结果进行验证。基于侵蚀针法的野外实地观测是目前比较广泛使用的方法<sup>[16-17]</sup>, 侵蚀针法虽然受人为因素影响较大, 容易遭到破坏, 但是可以较精确地估算区域风蚀量, 尤其是当风蚀量较大时<sup>[18]</sup>。

十大孔兑 (黄河的 10 条 1 级支流, 孔兑为蒙语, 沟谷的意思) 被沉积风沙堵塞河道, 致使河道不畅, 严重威胁人民生命财产安全, 制约着经济的可持续发展<sup>[6]</sup>, 减少十大孔兑风沙来缓解河道的淤积, 已成为黄河上游流域治理战略中的重要组成部分<sup>[19-20]</sup>。十大孔兑地形复杂, 从南到北分为黄土丘陵沟壑区、库布齐沙漠区和黄河南岸冲积平原区 3 种地形。前人对十大孔兑水力驱动的产沙输沙的时空分布特征及成因的研究较多<sup>[21-22]</sup>, 对十大孔兑风蚀产沙的研究尚少, 且无法定量区分水蚀与风蚀对河道泥沙贡献。基于此, 本文以十大孔兑 3 种典型下垫面为研究对象, 定量分析不同地形条件下风蚀强度时空变化

收稿日期: 2016-03-01 修订日期: 2016-06-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41330858); 西北农林科技大学博士科研启动基金 (2452015345)。

作者简介: 孙宝洋, 男, 山东枣庄, 博士生, 主要从事土壤侵蚀研究。杨凌西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: 378908186@qq.com

\*通信作者: 李占斌, 男, 河南镇坪, 研究员, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。杨凌中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: zhanbinli@126.com

特征，初探风蚀作用下地表形态变化规律，并分别估算十大孔兑 3 种地形风蚀量及风沙入黄比例，为防治入黄支流河道泥沙淤积与合理配置风蚀防治措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

十大孔兑是黄河 10 条由东到西的 1 级支流，位于内蒙古达拉特旗境内，由南向北将达拉特旗纵向分为 9 块，介于 39°55'20"~40°30'60" N、109°100'45"~110°45'54"E 之间，流域总面积 5 718 km<sup>2</sup>，其中产流面积 3 775 km<sup>2</sup>，单条孔兑流域面积在 200~1 300 km<sup>2</sup> 之间，十大孔兑发源地均在鄂尔多斯台地梁上，属东胜区所辖。十大孔兑地形由南到北分为黄土丘陵沟壑区地表覆盖有极薄的风沙残积土、库布齐沙漠区和黄河南岸冲积平原区三大自然单元。十大孔兑从发源地到入黄河口处，高差达 300~500 m，最高达 587 m。十大孔兑属于典型大陆性气候，年均降水量为 240~360 mm，多集中于 7—8 月，3—5 月常有大风天气，年均大风日数 24 d，最大风速达 28 m/s。

本研究监测点位于十大孔兑中的东柳沟流域，如图 1 所示，流域面积 667.72 km<sup>2</sup>，主沟长 47.73 km，流域最宽处为 24.00 km，最窄处为 12.45 km，水土流失面积达到 518.19 km<sup>2</sup>，占流域总面积的 77.5%。流域监测期（2013 年 6 月—2014 年 5 月）主要气象因子各月变化如表 1 所示。由于库布齐沙漠自西向东横穿该流域中游，因此流域上中下游左岸地貌特征、覆沙厚度、侵蚀类型和土地利用各不相同：上游为黄土丘陵沟壑区，表层为栗钙土与沙土，覆盖厚度为 10~20 cm，植被低矮稀疏，覆盖率为 7%~30%，以水力侵蚀为主；中游以流动风沙土和半固定风沙土为主，覆沙厚度大于 1 m，植被覆盖率在 10% 以下，以风力侵蚀为主；下游为黄河南岸冲积平原农田区，表层为灌淤土、草甸土和风沙土，覆盖厚度为 0~10 cm，植被覆盖率为 50% 左右，以风力侵蚀为主。

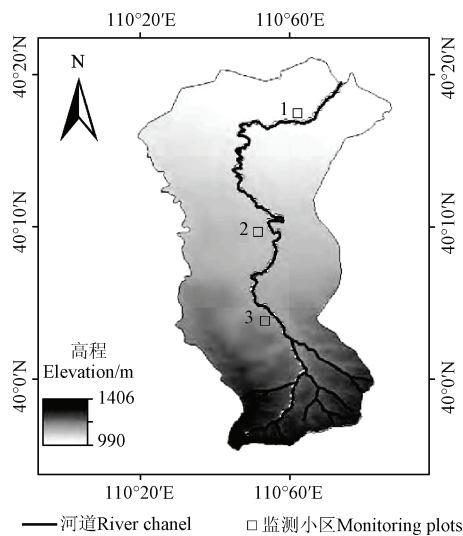


图 1 研究区监测点布置  
Fig.1 Monitoring site layout in test area

表 1 研究区平均温度、降水及风速变化  
Table 1 Variation of mean temperature, precipitation and wind velocity in test area

月份 Month	平均温度 Mean temperature/℃	平均降水量 Mean precipitation/mm	平均风速 Mean wind velocity/(m·s <sup>-1</sup> )
6 月	19.10	42.19	4.3
7 月	22.00	31.12	2.5
8 月	20.00	21.64	2.6
9 月	12.90	22.09	2.2
10 月	4.20	10.02	3.7
11 月	3.30	5.91	2.7
12 月	9.80	2.24	3.0
1 月	10.90	0.51	2.3
2 月	5.30	0.00	2.9
3 月	3.60	1.01	3.1
4 月	9.50	0.50	14.3
5 月	18.60	21.14	8.2
全年 Full year	6.85	13.20	3.0

1.2 风蚀监测

在侵蚀较严重的地区，尤其是野外进行长期风蚀监测，侵蚀针监测法效果较好<sup>[23]</sup>。十大孔兑中的东柳沟流域从上游到下游地貌特征和覆沙厚度具有明显差异，本研究采用侵蚀针原位监测法对流域 3 种不同下垫面进行为期 1 a 的风蚀监测，监测点布设位置如图 1 所示。1 号监测点（40°18'28"N、110°30'57"E）位于东柳沟下游农田与移动沙丘交错带，属于黄河南岸冲积平原区；2 号监测点（40°09'52"N、110°28'5"E）位于中游的移动沙丘，以流动风沙土为主，含水率极低，属于库布齐沙漠区；3 号监测点（40°04'19"N、110°28'17"E）位于上游的固定沙丘与移动沙丘交错区，以栗钙土和半固定风沙土为主，覆沙厚度为 10~20 cm，属于黄土丘陵沟壑区。3 个监测点的风蚀结果可以分别代表十大孔兑地区 3 种地形风蚀特征。十大孔兑上游丘陵沟壑区面积为 5 172 km<sup>2</sup>，中游库布齐沙漠区面积为 2 762 km<sup>2</sup>，下游黄河南岸冲积平原区面积为 2 833 km<sup>2</sup><sup>[12]</sup>。

每个监测点均布置 1 个 10 m×10 m（长×宽）监测小区。监测小区内均无植被覆盖，坡度<5°。小区内均匀布设 121 根高强度抗弯折且长为 1 m 的侵蚀针，即钢钎。钢钎顶端用红色涂料做标记，将钢钎插入地表使露出地表高度统一为 30.0 cm，监测期间内如果钢钎被完全掩埋，需再次拔出到初始高度并记录。每 15 d 左右量取钢钎涂红标记处与地表间的距离，从 2013 年 6 月—2014 年 5 月对 3 个监测小区进行定期监测。

1.3 指标测定与计算

研究中用钢钎埋深变化计算风蚀强度<sup>[24-25]</sup>。

$$Q_i = \frac{|h_i - h_{i-1}| \cdot a \cdot b \cdot \rho_b}{a \cdot b \cdot t} \times 10^{-3} = \frac{|h_i - h_{i-1}| \cdot \rho_b}{t} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$Q_n = a \cdot b \cdot \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot t_i) \quad (2)$$

$$R = h_{\max} - h_{\min} \quad (3)$$

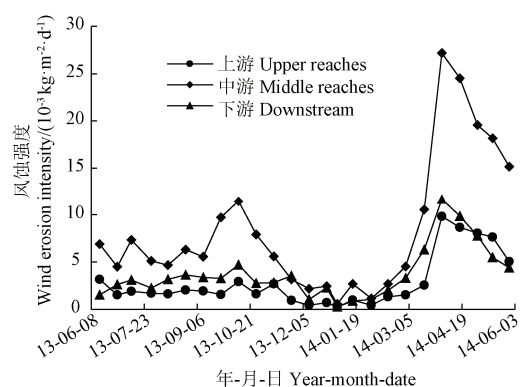
式中  $Q_i$  为风蚀强度, 即单位时间单位面积上土壤风蚀量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ;  $h_i$  为第  $i$  次监测时, 钢钎标记处与地表间平均距离,  $\text{m}$ ;  $a$  为监测小区长度,  $10 \text{ m}$ ;  $b$  为监测小区宽度,  $10 \text{ m}$ ;  $\rho_b$  为监测小区土壤容重,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $t$  为连续 2 次监测间隔时间,  $\text{d}$ ;  $Q_n$  为连续监测  $n$  次后, 累积风蚀量,  $\text{kg}$ ;  $R$  为地表起伏度,  $\text{m}$ ;  $h_{\min}$  和  $h_{\max}$  为单位面积内测钎最小和最大埋深,  $\text{m}$ 。

土壤颗粒粒度分析采用 Malvern Mastersizer 2000 型激光粒度仪 (英国马尔文公司), 该仪器的测量范围为  $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$ 。监测小区东西方向为  $x$  轴, 南北方向为  $y$  轴, 垂直方向为  $z$  轴, 建立空间直角坐标系, 121 根钢钎坐标分别从  $(0, 0, z_1)$  到  $(10, 10, z_{121})$ , 其中  $z$  坐标数值为实测测钎埋深。利用 ArcGIS 进行分析处理, 利用式 (3) 可提取监测期内地表起伏度。利用 Excel 和 Surfer 8.0 软件进行数据处理与绘图, 采用 SPSS 19 统计分析软件对数据进行差异显著性检验 (Mann-Whitney U 检验法和配对样本非参数检验,  $\alpha=0.05$ )。

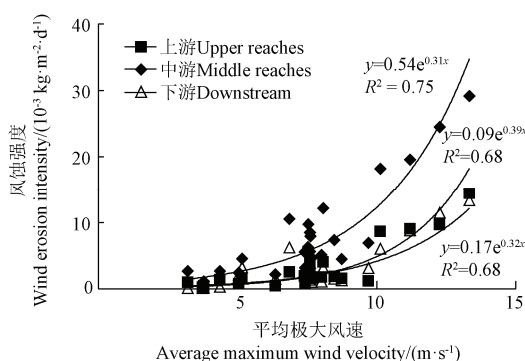
## 2 结果与分析

### 2.1 风蚀强度及风蚀量的时间变化特征

各监测区风蚀强度逐月变化如图 2a 所示。



a. 风蚀强度  
a. Wind erosion intensity



b. 风蚀强度与平均极大风速关系

b. Relationship between wind erosion intensity and average maximum wind velocity

图 2 各监测小区风蚀强度变化及其与平均极大风蚀的关系  
Fig.2 Variation of wind erosion intensity and its relationship with average maximum wind velocity in each monitoring plot

由图 2 可知, 3 个监测区各月风蚀强度极不均匀, 但是变化趋势基本一致。在 1 a 的监测期内, 3 个监测区风蚀强度出现 2 个极大值, 分别在 4—5 月和 10—11 月, 4—5 月的平均风蚀强度最大, 分别为  $11.54 \times 10^{-3}$ 、 $21.11 \times 10^{-3}$  和  $9.35 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  (表 2), 年风蚀强度最大值也出现在此时间段。由风蚀强度逐月变化曲线可知, 全年风蚀强度 10—11 月仅次于 4—5 月, 10—11 月风蚀强度均值分别为  $2.96 \times 10^{-3}$ 、 $7.03 \times 10^{-3}$  和  $2.29 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  (表 2), 4—5 月的平均风蚀强度是 1 a 中风蚀强度均值的 2~3 倍。3 个监测区 1 月平均风蚀强度为全年最低, 平均最小风蚀强度分别为  $1.8 \times 10^{-4}$ 、 $5.9 \times 10^{-4}$  和  $2.5 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 年最大和最小风蚀强度相差极大, 在 50~100 倍之间 (表 2)。3 个监测区风蚀强度时间变化规律均和流域风速变化规律相一致, 且风蚀强度随流域平均极大风速增加呈指数递增关系, 如图 2b 所示。

表 2 各监测小区风蚀强度及风蚀量

Table 2 Wind erosion intensity and amount for each plot

Table 2 Wind erosion intensity and amount for each plot						
监测地 Monitoring area	风蚀强度 Wind erosion intensity/(10 <sup>-3</sup> kg·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )					风蚀量 Wind erosion amount/kg
	最大 Max	最小 Min	平均 Average			
			1—12 月	10—11 月	4—5 月	
下游 Downstream	21.64	0.18	4.99	2.96	11.54	124.76
中游 Middle reaches	27.18	0.59	8.67	7.03	21.11	216.71
上游 Upper reaches	14.64	0.25	3.15	2.29	9.35	78.81

自监测开始, 各监测小区风蚀量逐月平稳增加, 而从第 118 天 (2013 年 9 月 26 日) 到第 177 天 (2013 年 11 月 25 日), 斜率有所增加, 之后曲线又趋于平缓, 斜率接近于 0, 而从第 291 天 (2014 年 3 月 19 日) 到 1 a 监测期结束, 曲线斜率陡增, 尤其是中游监测小区, 风蚀量累积曲线斜率接近 1 (图 3)。

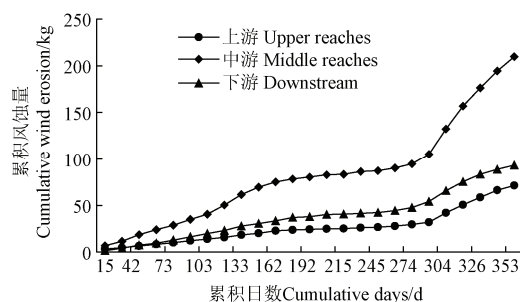


图 3 各监测小区累积风蚀量变化

Fig.3 Cumulative wind erosion amount in monitoring plots

累积风蚀量曲线平稳增长和斜率 2 次增大的变化规律说明在 1 a 的监测期内风蚀是一直发生的, 而风蚀强度在全年的各个时间段明显不同。风蚀强度年内变化可分为 2 个阶段: 6—9、12—次年 3 月的平稳期和 4—5、10—11 月的剧烈期。由气象资料和长期监测可知, 6—9 月降水量大, 使地表含水量较其他月份高, 因此启动风速增加, 而该时间段风速为全年最小, 因此产生的风蚀很小; 10—11 月, 降水量减少, 昼夜气温在  $0^\circ\text{C}$  上下循

环交替, 该时间段冻融循环破坏土壤表层结构, 使地表可蚀性增加, 再加上该时间段风速较大, 因此产生风蚀量大于全年平均水平; 12 月至次年 3 月, 温度一直在  $0^{\circ}\text{C}$  以下, 地表基本处于冻结状态, 可蚀性降低, 基本不会产生风蚀; 到了 4—5 月, 温度虽然回升, 但仍在  $0^{\circ}\text{C}$  上下变化, 冻融循环破坏地表结构, 且该时间段风速达到全年最大, 经历秋冬和冬春 2 个阶段冻融循环的表层土, 在持续的大风天气下风蚀量达到全年平均水平的 2~3 倍以上。根据监测区累计风蚀量时间变化特征, 可估算十大孔兑地区各季节通过风蚀进入黄河支流的泥沙比例为春季 (60.44%) > 秋季 (18.22%) > 夏季 (15.75%) > 冬季 (5.59%)。

## 2.2 风蚀强度空间变化特征

由方差分析可知, 下游与中游风蚀强度具有显著差异 ( $P<0.05$ ), 上游与中游风蚀强度具有极显著差异 ( $P<0.01$ ), 上游和下游风蚀强度无显著差异 ( $P>0.05$ )。对于年平均风蚀强度和累积风蚀量 (表 2 和图 3), 中游库布齐沙漠区是上游黄土丘陵区 and 下游平原区的 2~3 倍; 对于年最大风蚀强度, 中游是下游 1.5 倍, 是上游的 2 倍; 而对于年最小风蚀强度, 中游是下游的 3 倍, 是上游的 2 倍。总之, 中游风蚀强度在全年各时间段始终大于上下游。根据表 2 中各小区风蚀强度, 可换算上中下游 3 种地形风蚀模数 (单位面积土壤及土壤母质在单位时间内的侵蚀量大小) 分别为 1 149.75、3 164.55 和 1 821.35  $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。由风力侵蚀强度分级标准表<sup>[26]</sup>可知, 当风蚀模数为 200~2 500  $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  时, 风蚀强度级别为轻度; 当风蚀模数为 2 500~5 000  $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  时, 风蚀强度级别为中度。因此十大孔兑库布齐沙漠区属于中度风蚀, 黄土丘陵沟壑区和黄河南岸冲积平原区属于轻度风蚀。根据监测小区风蚀模数和十大孔兑 3 种地形所占面积可估算各地形条件下年风蚀量及对黄河支流泥沙贡献比例, 即黄土丘陵沟壑区年累积风蚀量为 5.95 Mt, 占 3 个监测区风蚀总量的 29.97%; 库布齐沙漠区累积风蚀量为 8.74 Mt, 占总风蚀量的 44.03%; 黄河南岸冲积平原区累积风蚀量为 5.16 Mt, 占总风蚀量 26.00%。

风蚀预报方程 (wind erosion prediction system, WEPS) 中将风蚀影响因子分为 7 类: 水文、管理、土壤、作物、气候、分解和侵蚀。十大孔兑地区不同地形风蚀强度差异主要受地表可蚀性影响, 而风蚀可蚀性主要与土壤颗粒及团聚体、土壤水分、地表不可蚀物质和土地利用方式等有关<sup>[27]</sup>。土壤颗粒粒径范围为 0.05~0.75 mm 时为易蚀颗粒<sup>[28]</sup>。由表 3 土壤颗粒粒径分析可知, 中游监测点可蚀性颗粒质量分数最高, 为 94.95%, 上游和下游可蚀性颗粒含量分别为 62.18% 和 44.51%。由图 3 和表 3 可知, 3 个监测小区累积风蚀量: 中游>下游>上游, 而可蚀性颗粒含量: 中游>上游>下游。虽然下游监测小区可蚀性颗粒含量小于上游, 但下游为平原

区, 人为扰动大于上游, 导致下游累积风蚀量大于上游; 中游覆沙面虽然也无人为扰动, 但是监测小区可蚀性颗粒含量明显多于下游, 导致风蚀量仍大于下游。这说明对于 3 个监测小区, 可蚀性颗粒含量是风蚀强度的主要影响因素, 当可蚀性颗粒含量相近时, 人为因素将对其产生一定的影响。

表 3 各监测小区土壤粒径质量分数  
Table 3 Mass fraction of soil particles in monitoring plots

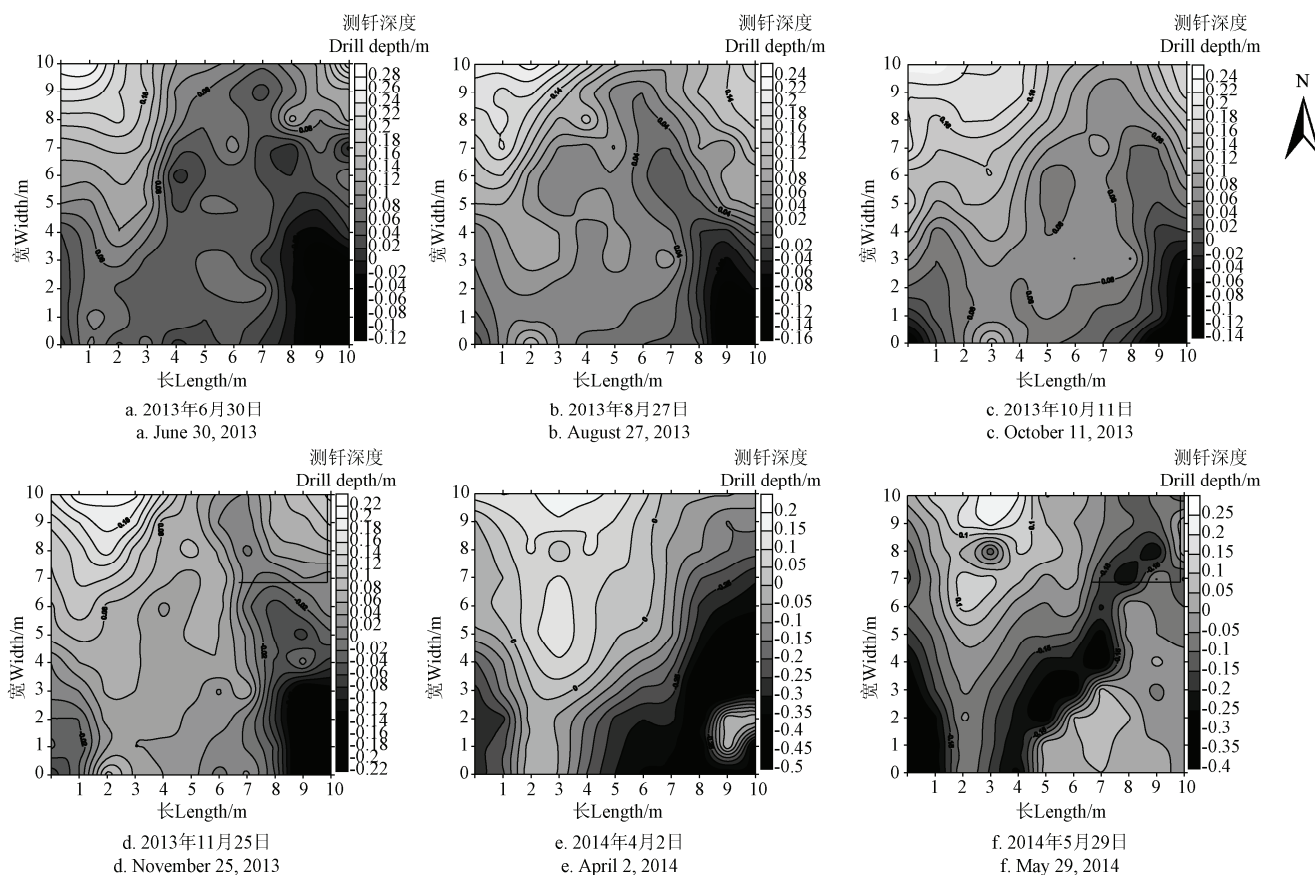
监测区 Monitoring area	>0.7 mm	0.05~0.7 mm	0.05~0.002 mm	<0.002 mm
上游 Upper reaches	0.69	62.18	29.48	7.64
中游 Middle reaches	0.52	94.95	3.05	1.48
下游 Downstream	0.41	44.51	41.09	13.99

## 2.3 地表形态变化特征

风吹过地表时, 产生紊流, 使松散物质离开地表, 从而使地表遭受破坏, 地表形态发生变化。根据测得每根钢钎标记与地表间距离和克里森插值法, 采用 Surfer 8.0 绘制 2013 年 6 月—2014 年 5 月的十大孔兑之一的东柳沟中游库布齐沙漠区地表形态变化图 (图 4)。

结合风蚀强度变化图 (图 2) 可知, 2013 年 6—8 月风蚀强度没有发生显著变化 ( $P>0.05$ ), 地表松散物质沿东南方向向前推移, 地表起伏度由 0.56 cm 减小为 0.47 cm, 说明当风蚀强度较小时, 风力作用下地表将变得平缓; 从 8 月 27 日至 10 月 11 日, 监测小区地表平均坡度和起伏度基本不变, 风蚀强度未发生显著变化 ( $P>0.05$ )。库布齐沙漠区起动风速 8.8~12  $\text{m/s}$ <sup>[10]</sup>。由表 1 可知, 在 6—10 月, 平均风速小于地表土壤启动风速, 仅发生轻度风蚀; 由图 4c 和 4d 可知, 在 10—11 月, 风蚀强度发生显著增加, 地表形态变化明显, 地表起伏度和坡度均增大, 这与风速增加是显著相关的; 从 11—次年 4 月, 由图 4d 和 4e 可知, 监测小区地表起伏度增加 0.91 cm, 这主要是由于 3、4 月份风速迅速增加, 再加上地表解冻, 使表层更加松散, 土壤可蚀性增加, 导致地表风蚀堆积过程更加剧烈, 使地表坡度和起伏度大幅增加; 在 4—5 月, 风速达到全年最大, 风蚀强度显著增加 ( $P<0.05$ ), 地表起伏度、坡度也随之有所增大。由以上分析可知, 风速对地表形态塑造具有双重作用, 当风速较小时, 风力作用下有使地表变平缓的趋势, 当风速较大时, 地表起伏度迅速增加。由于地表起伏度与坡度为线性相关, 因此只对地表起伏度和风蚀强度间关系进行模拟, 发现起伏度随风蚀强度增加呈线性递增趋势 ( $P<0.05$ ), 如图 5 所示。十大孔兑属于风水复合侵蚀交错区, 降水集中于 6—8 月, 在强风力作用下地表坡度和起伏度大幅增加将有利于水蚀的发生, 通过水蚀为河道输送细颗粒泥沙。





注：正值代表风蚀堆积高度，负值代表风力向下侵蚀深度。

Note: Positive and negative values indicate surface cumulative height caused by wind erosion and wind erosion depth in soil, respectively.

图4 中游监测小区地表形态时空变化

Fig.4 Spatiotemporal variation of surface morphology in monitoring plot of middle reaches

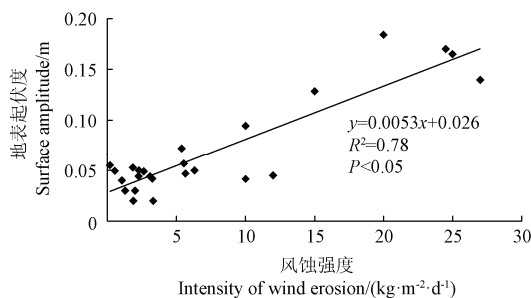


图5 地表起伏度与风蚀强度关系

Fig.5 Relationship between wind erosion intensity and surface amplitude

### 3 讨论

已有研究表明风蚀强度随风速增加呈幂函数变化<sup>[6,24-25]</sup>,而在本研究中风蚀强度和风速呈指数关系,风蚀强度随时间的变化不仅受风速影响,还与土壤风蚀可蚀性密切相关。土壤风蚀可蚀性表征风蚀过程中土壤对于风力引起的剥离和搬运的敏感程度,其大小受土壤质地、土壤团聚体及可蚀性颗粒含量等影响<sup>[28]</sup>。已有研究表明土壤可蚀性是动态变化的<sup>[29]</sup>,与季节变化呈余弦关系,即在10—11月和4—5月,冻融作用将明显增加土壤可蚀性<sup>[30-31]</sup>,导

致启动风速降低,极易产生风蚀。在黄河南岸的冲积平原区,人类活动导致地表结构的破坏,也会增加土壤可蚀性。在风水交错侵蚀区的神木县六道沟流域,1a中风蚀能量的34.45%集中于4—5月,其中4月占18.39%<sup>[31]</sup>。与之相似,十大孔兑地区风蚀强度季节变化更为明显,风蚀能量的60%以上集中在4—5月,因此在该期间合理配置防治措施,对防治风蚀,减少风沙对河道泥沙贡献具有积极意义。

十大孔兑3种地形风蚀强度的空间差异主要与土壤风蚀可蚀性有关。库布齐沙漠区有机质和团聚体含量极低,易受风蚀颗粒(0.075~0.4mm)质量分数占90%以上,年平均风蚀强度是人为扰动较大的黄河南岸冲积平原区的1.74倍,因此,在十大孔兑地区,土壤可蚀性颗粒含量是影响风蚀的主导因素。下游易受风蚀颗粒含量小于上游,而下游年最大和平均风蚀强度大于上游,这主要是因为4—5月的人为翻耕破坏地表结构,使表土分散疏松更易遭受风蚀,而每年的6—8月和12—2月由于农作物覆盖,增加了地表的抗蚀性,因此下游最小风蚀强度小于上游。当易受风蚀颗粒质量分数在40%~60%时,人为扰动对风蚀强度影响程度大于土壤可蚀性颗粒含量。因此加强库布齐沙漠区和黄河南岸冲积平原区措施布设对防治风沙入黄具有积极作用。

## 4 结 论

本文通过侵蚀针法对十大孔兑地区 3 种典型地形进行 1a 风蚀监测, 结果表明: 1) 十大孔兑风蚀强度随平均极大风速呈指数递增趋势, 年最大风蚀强度出现在 4—5 月, 其次是 10—11 月, 是全年平均风蚀强度的 2~3 倍; 2) 十大孔兑库布齐沙漠区为中度风蚀, 黄土丘陵沟壑区和黄河南岸冲积平原区为轻度风蚀, 3 种地形年累计风蚀量分别为 8.74、5.95 和 5.16 Mt, 风沙入黄所占比例分别为 44.03%、29.97%和 26.00%; 3) 十大孔兑风蚀发生的方向主要为东南方向, 主要风蚀过程为堆积—吹蚀—推移—再堆积, 地表起伏度随风蚀强度增加呈线性递增趋势 ( $R^2=0.78$ ,  $P<0.05$ ), 风蚀对地表形态具有一定的重塑能力。加强春秋季节库布齐沙漠区风沙防治措施对减轻十大孔兑泥沙淤积问题具有重要意义。

研究区不仅位于风水复合侵蚀交错区, 而且是黄河河道泥沙重要源区, 本文对风蚀的时空变化特征研究尺度还需进一步增加, 同时, 需加强复合侵蚀营力作用机制的研究, 并量化其对河道泥沙贡献率。

### [参 考 文 献]

- [1] Fernandez-Bernal A, Rosa MADL. Arid Environments and Wind Erosion[M]. New York: Nova Science Publishers, 2009: 1—13
- [2] Sujith R, Ted M Z, Thomas M O, et al. On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion[J]. Sedimentology, 2006, 53(3): 597—609.
- [3] Bullard J E, Livingstone I. Interaction between aeolian and fluvial systems in dry land environments[J]. Area, 2002, 34(1): 8—16.
- [4] Bourke M C, Pickup G. Fluvial form variability in arid central Australia[C]//Miller A J, Gupta A. Varieties of Fluvial Form. Chichester, England: Wiley, 1999: 249—271.
- [5] Jia Xiaopeng, Wang Haibing. Element geochemical analysis of the contribution of aeolian sand to suspended sediment in desert stream flash floods[J]. The Scientific World Journal, 2014, 1: 1—12.
- [6] 杨根生, 拓万全, 戴丰年, 等. 风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 151—159. Yang Gensheng, Tuo Wanquan, Dai Fengnian, et al. Contribution of sand sources to the silting of riverbed in Inner Mongolia section of Yellow river[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(2): 151—159. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨根生, 刘阳宣, 史培军, 黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J]. 科学通报, 1988(13): 1017—1021. Yang Gensheng, Liu Yangxuan, Shi Peijun. The estimation quantity of the coastal aeolian sand into Yellow River[J]. Chinese Science Bulletin, 1988(13): 1017—1021. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杜鹤强, 薛娴, 王涛, 等. 1986—2013 年黄河宁蒙河段风蚀模数与风沙入河量估算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 142—151. Du Heqiang, Xue Xian, Wang Tao, et al. Wind erosion modulus and quantity evaluation of aeolian sediment feed into river in watershed of Ningxia-Inner Mongolia Reach of Yellow River from 1986 to 2013[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 142—151. (in Chinese with English abstract)
- [9] Du Heqiang, Xue Xian, Wang Tao, et al. Assessment of wind-erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, northern China[J]. Aeolian Research, 2015, 17: 193—204.
- [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, et al. 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)
- [11] 李秋艳, 蔡强国, 方海燕. 黄土高原风水蚀交错带风力作用对流域产沙贡献的空间特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(4): 39—49. Li Qiuyan, Cai Qiangguo, Fang Haiyan. Spatial characteristic research on wind erosion contribution to sediment yield in wind and water complex erosion zone of loess plateau[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(4): 39—49. (in Chinese with English abstract)
- [12] 许炯心. 风水两相作用和高含沙水流对“十大孔兑”侵蚀产沙的影响[J]. 泥沙研究, 2013, 6: 28—37. Xu Jiongxin. Erosion and sediment yield of 10 small tributaries joining Inner Mongolia reach of upper Yellow River in relation with coupled wind-water processes and hyper concentrated flows[J]. Journal of Sediment Research, 2013, 6: 28—37. (in Chinese with English abstract)
- [13] Lu Hua, Shao Yaping. Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modelling system and its applications[J]. Environmental Modelling and Software, 2001, 16(3): 233—249.
- [14] Coen G M, Tatarko J, Mattin T C, et al. A method for using WEPS to map wind erosion risk of Alberta oils[J]. Environmental Modelling and Software, 2004, 19(2): 185—189.
- [15] Gregory J M, Wilson G R, Singh U B, et al. TEAM: Integrated, process-based wind-erosion mode[J]. environmental Modelling and Software, 2004, 19(2): 205—215.

- [16] Wang Genxu, Quan Tuowan, Du Mingyuan. Flux and composition of wind-eroded dust from different and scapes of an arid inland river basin in north-western china[J]. *Journal of Arid Environment*, 2004, 58: 373—385.
- [17] 李晓丽, 申向东, 解卫东. 土壤风蚀物中沙粒的动力学特性分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 71—75.  
Li Xiaoli, Shen Xiangdong, Xie Weidong. Analysis of dynamic characteristics of sand grains in wind erosion soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(6): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [18] 郭晓妮, 马礼. 坝上地区不同土地利用类型的地块土壤年风蚀量的对比[J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 30(4): 93—96.  
Guo Xiaoni, Ma Li. The comparison on annual soil wind-erosion amount of the different land-use types in Ba shang region[J]. *Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition*, 2009, 30(4): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [19] 申冠卿, 张原锋, 侯素珍, 等. 黄河上游干流水库布齐调节水沙对宁蒙河道的影响[J]. *泥沙研究*, 2007(1): 67—75.  
Shen Guanqing, Zhang Yuanfeng, Hou Suzhen, et al. Impact of water and sediment regulation by reservoirs in the upper Yellow River on Inner-Mongolia reaches[J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(1): 67—75. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘晓燕, 侯素珍, 常温花. 黄河内蒙古河段主槽萎缩原因和对策[J]. *水利学报*, 2009, 40(9): 1048—1054.  
Liu Xiaoyan, Hou Suzhen, Chang Wenhua. Cause of main channel shrinkage occurred to the Inner-Mongolia reaches of Yellow River[J]. 2009, 40(9): 1048—1054. (in Chinese with English abstract)
- [21] 许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J]. *中国沙漠*, 2014, 6: 1641—1649.  
Xu Jiongxin. Temporal and spatial variation in erosion and sediment yield and the cause in the ten small tributaries to the Inner Mongolia reach of the Yellow river[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 6: 1641—1649. (in Chinese with English abstract)
- [22] 林秀芝, 郭彦, 侯素珍. 内蒙古十大孔兑输沙量估算[J]. *泥沙研究*, 2014, 2: 15—20.  
Lin Xiuzhi, Guo Yan, Hou Suzhen. Estimation of sediment discharge of ten tributaries of Yellow River in Inner-Mongolia[J]. *Journal of Sediment Research*, 2014, 2: 15—20. (in Chinese with English abstract)
- [23] Haigh M J. The use of erosion pins in the study of slope evolution[J]. *BGRG Technical Bulletin*, 1977(18): 31—49.
- [24] 丛培飞, 尹光华, 谷健. 留茬和秸秆覆盖对农田土壤风蚀量的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(8): 2060—2064.  
Chong Peifei, Yi Guanghua, Gu Jian, et al. Effect of stubble and straw mulch on soil erosion amount[J]. *Magazine of Ecology*, 2014, 33(8): 2060—2064. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李晓丽, 申向东, 张雅静. 内蒙古阴山北部四子王旗土壤风蚀量的测试分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(2): 292—296.  
Li Xiaoli, Shen Xiangdong, Zhang Yajing. Experimental analysis on soil wind-erosion amount in Siziwang Banner North Yinshan Mountain, Inner Mongolia[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(2): 292—296. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴发启, 张洪江. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 28.
- [27] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(4): 1—6.  
Dong Zhibo, Li Zhenshan. Wind erodibility of aeolian sand as influenced by grain-size parameters[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(4): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [28] 南岭, 杜灵通, 展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 204—211.  
Nan Ling, Du Lingtong, Zhan Xiuli. Advances in study on soil erodibility for wind erosion[J]. *Soils*, 2014, 46(2): 204—211. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 土壤可蚀性动态变化规律研究[J]. *地理学报*, 2001, 56(6): 673—681.  
Zhang Keli, Cai Yongming, Liu Baoyuan, et al. Fluctuation of soil erodibility due to rainfall intensity[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 673—681. (in Chinese with English abstract)
- [30] Kirby P C, Mebuys G R. The seasonal variation of soil erosion by winter in South-Western Quebec[J]. *Can J Soil Sci*, 1987, 67: 55—63.
- [31] Coote D R, Malcolm C A, Wall G J, et al. Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils[J]. *Can Soil Sci*, 1988, 68: 405—416.
- [32] 张平仓. 水蚀风蚀交错带水风两相侵蚀时空特征研究——以神木六道沟小流域为例[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(3): 33—34.  
Zhang Pingcang. Spatial and temporal variability of erosion by water and wind in water-wind erosion crisscross region: taking liudaogou watershed in Jin-Shaan-Meng contiguous areas as an example[J]. *Journal of Soil Erosion and Water and Soil Conservation*, 1999, 5(3): 33—34. (in Chinese with English abstract)

## Spatiotemporal variation of wind erosion intensity in region of Ten Small Tributaries in Inner Mongolia branch of Yellow River

Sun Baoyang<sup>1</sup>, Li Zhanbin<sup>1,2,3\*</sup>, Zhang Yang<sup>2</sup>, Ma Bo<sup>1</sup>, Zhang Letao<sup>3</sup>, Xiao Junbo<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Wind erosion is widespread in arid and semiarid regions around the world and it has been considered as a serious environmental threat that leads to change in global biochemical cycles, decline in agricultural productivity, and contributes to climate change. Aeolian erosion provides abundant eroded sediments for channel sediments delivery in the ten small tributaries. In order to reveal the mechanism of wind erosion in the region of ten small tributaries, three plots were established in Dongliugou watershed of the ten small tributaries in Inner Mongolia. The first monitoring plot (40°18'28"N, 110°30'57"E) was located in the criss-cross region of farmland and moving dune, the second monitoring plot (40°09'52" N, 110°28'5" E) was located in moving dune and the third monitoring plot (40°04'19" N, 110°28'17" E) was located in the criss-cross region of fixed and moving dune. The amounts of wind erosion and the change of surface shape were monitored by the method of pins measurement for 1 year. Combining the local meteorological data with the monitoring data, spatial and temporal variation of wind erosion intensity was analyzed by using the technologies of ArcGIS and Surface 8.0. The results showed that: 1) The average intensity of wind erosion from the plots during the months from April to May in 2014 were  $11.54 \times 10^{-3}$ ,  $21.11 \times 10^{-3}$ , and  $9.35 \times 10^{-3}$  kg/(m<sup>2</sup>·d), respectively, and that from October to November in 2013 were  $2.96 \times 10^{-3}$ ,  $7.03 \times 10^{-3}$  and  $2.29 \times 10^{-3}$  kg/(m<sup>2</sup>·d), respectively. The intensity of wind erosion from April to May was 2-3 times stronger than the annual average intensity. The intensity of wind erosion was exponentially related with the maximum wind velocity in the study area. Based on the temporal variation of cumulative wind erosion of the monitoring plots, the proportion of sediments into Yellow River through wind erosion was 60.44% (spring)> 18.22% (autumn)> 15.75% (summer)> 5.59% (winter) in the region of ten small tributaries; 2) The wind erosion modulus of 3 monitoring plots were 1149.75, 1821.35 and 3164.55 t/(km<sup>2</sup>·a), respectively. The contents of erodible particles was 94.95% (midstream)> 62.18% (upstream)> 44.51% (downstream), thus the amounts of wind erosion of middle reaches (216.71 kg) were significantly higher than upper reaches (78.81 kg) and downstream (124.76 kg) in the region of ten small tributaries. In this study, the amounts of wind erosion of downstream were significantly higher than upstream although the contents of erodible particles in upper reaches were more than downstream. It was caused by land use patterns and human disturbance; 3) The area of Kubuqi desert was moderate wind erosion, the region of Loess hilly and gully and the South Bank of the Yellow River alluvial plain area were mild wind erosion. It's estimated that the three surface cumulative amounts of wind erosion were 8.74, 5.95 and 5.16 Mt, the proportion of sand blown by the wind into the Yellow were account for 44.03%, 29.97% and 26.00%; 4) The main direction of wind erosion was from northwest to southeast, and the process of wind erosion was accumulation, erosion, passage, and then deposition. The surface amplitude of midstream was significantly increased from April to May and from October to November, but hardly changed in the other months. Surface amplitude was linearly correlated with intensity of wind erosion ( $R^2=0.78$ ,  $P<0.05$ ). Wind erosion has the ability to restore surface. The study may provide evidences for preventing increasing sediments for the river channel from the region of the ten small tributaries and to formulate reasonable soil and water conservation measures.

**Keywords:** erosion; wind; soils; wind erosion intensity; spatial and temporal variation; pattern change