

# 片沙覆盖的黄土丘陵区土壤风蚀特征研究\*

张丽萍 唐克丽 张平仓

(中国科学院  
水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

**摘要** 以神木县为研究基地, 在野外调查和资料分析的基础上, 应用场论及空气流压场原理, 对片沙覆盖的黄土丘陵区土壤风蚀的特殊规律进行了分析, 并讨论了不同地貌部位土壤粗粒化形成的不同过程。得出如下结论: ①土壤强烈风蚀主要发生在迎风坡、丘顶及气流发生辐合的沟谷段; ②片沙主要堆积在气流发生涡动的背风坡及气流发生辐散的沟谷段谷坡; ③迎风坡及丘顶土壤粗粒化是由于强烈风蚀所致, 背风坡土壤沙化、粗化是沙粒堆积所致。

**关键词** 片沙覆盖; 空气流压场; 风蚀; 土壤粗粒化

## Research on Soil Wind Erosion Laws in Loess Hilly- Gully Region Covered by Sheet Sand

Zhang Liping Tang Keli Zhang Pingcang

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and  
Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract** On the basis of field investigation and information research in Shenmu County, according to the fundamentals of air flow pressure field theory, the specific wind erosion laws are analysed and soil coarsening causes are discussed. The results are as follows. ① soil wind erosion occurred on facing the wind slope, top of hilly and air-flow converging landforms places; ② soil wind-sand accumulation occurred on the lee slope and air-flow divergence landforms places; ③ soil coarsening resulted form wind-erosion on facing the wind slope and sand accumulation on the lee slope.

**Key words** sheet sand covered; air flow pressure field; wind erosion; soil coarsening

神木县位于塞北高原, 地处黄土高原与干旱荒漠的过渡区, 是黄土高原北缘的沙黄土带和沙漠化正在发展区。地表沟壑纵横, 梁峁起伏, 片片明沙点缀于黄土丘陵沟谷坡地, 从而形成了典型的片沙覆盖的黄土地貌类型。相应的生物气候带属中纬度温带半干旱典型草原地带, 具有温带大陆性季风气候的特点, 干旱、少雨、多风及暴雨集中是该区水蚀风蚀交替进行的主要原因。地表组成物质主要为极易风化的中生代砂岩及砂页岩, 富含煤层, 其上堆积第四纪黄土, 表

层覆盖了成片的沙层。松散粗质的地表组成物质是风蚀水蚀的物质基础。自然条件具有明显的过渡性及复杂性, 植被稀少, 地形起伏, 终年风力水力侵蚀交替进行, 土壤侵蚀极为严重。正是在这样特殊的脆弱生态环境区, 决定了土壤侵蚀特殊规律。

## 1 气压场梯度决定了风蚀能力的强弱

土壤风蚀是大气与地表的一种动力过程。风是土壤风蚀的最直接动力, 土壤风蚀的强弱主要由风能所决定。根据能量计算原理, 风能大小的表达式为:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

式中:  $E$ ——风能;  $m$ ——空气质量;  $v$ ——风速。

由式(1)可知, 风蚀能力主要取决于风带, 二者呈正相关。然而, 风速的大小取决于空气流压场的形势变化及气压梯度的大小。大气运动方程能表明风速与气压梯度的关系, 其方程式则为:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}vP - 2\omega \sin\varphi + g + k \quad (2)$$

式中:  $-\frac{1}{\rho}vP$ ——气压梯度力, 负号表示由高压指向低压;  $2\omega \sin\varphi$ ——地转偏向力;  $g$ ——重力加速度;  $k$ ——摩擦力。

由于地转偏向力在小尺度水平运动系统中可忽略不计, 故(2)式可写为:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial n} \cdot n + g + k \quad (3)$$

式中:  $g$  是一个常数, 它随着地形的起伏, 变化很小;  $k$  在一个地区只要有风, 就说明它永远小于气压梯度力, 所以风速随时间的变化是气压梯度的函数, 随气压梯度的增加而增大。

风作用于迎风坡所产生的风压可表示为:

$$P = \frac{\rho}{2g}v^2 \quad (4)$$

(4)式表明风速愈大, 对迎风坡产生的风压愈大, 风蚀能力愈强。

气流在运行过程中, 经过不同的地貌类型区, 其流场形势不同。流经宽阔平坦的旷野, 气流运行畅通; 遇到高大山系, 高度超过了气流翻越能力, 气流受阻产生折射; 流经丘陵区上空时, 气流波动, 产生一系列的波状气流, 近地面则产生间距有规则的转动, 在迎风坡和背风坡出现一系列的快慢反向气流, 故在不同的地貌部位风蚀的方式、强弱不同。

## 2 片沙覆盖的黄土丘陵区的大气环流形势

本区不仅地表物质、植被、土壤、气候具有明显的过渡性, 而且控制天气的大气环流也具有显著的过渡性。高空受西风气流的控制, 低空是我国东部季风的边缘区。冬季在蒙古高压的控制下, 气流流线由西北指向东南, 吹强劲的偏北风; 春季, 虽然蒙古高压有所减弱, 但西风气流低槽自西而东通过, 槽后吹风力更强的偏北风, 迭加春季气旋过境频繁, 风力更大, 最大风力可达 8~9 级, 出现频率高, 持续时间长。故该区冬春季节盛行偏北风, 寒冷干燥, 干旱大风迭加风沙流聚起, 导致了土壤的风蚀沙化。仅在 6~9 月之间, 有经长途跋涉的强度很弱的东南季风。经神木县气象资料统计, 全年 75% 刮偏北风。

### 3 片沙覆盖黄土丘陵区空气流压场形势分析

#### 3.1 风向与丘陵沟道走向斜交或垂直时的空气流压场分析

强劲的偏北风流经该区时, 由于地形起伏, 气流发生波动, 近地面气压场形势发生变化, 丘陵山地顶部与谷底产生了压力差, 丘顶气压低, 谷底气压高, 压力梯度由谷底指向丘顶。

设气流前进方向为  $x$  轴, 垂直于地面为  $z$  轴, 垂直于气流前进方向为  $y$  轴, 建立空气流压场的三维坐标(图1)。假定使丘陵山区气流运动的气压梯度力为  $\vec{P}$ , 它可分解为在丘陵地区顶部大气环流的气压梯度力  $\vec{U}$ , 及由地形高差产生的附加气压梯度力  $\vec{G}$ , 则

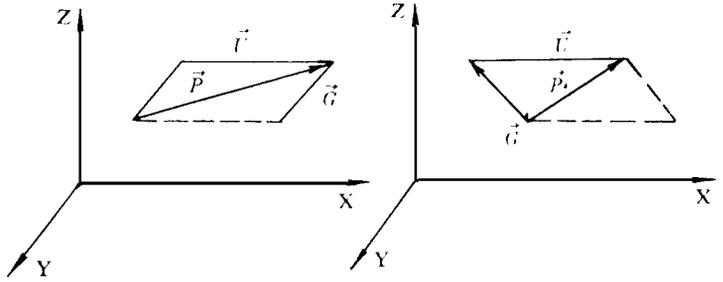


图1 气压梯度合成图解

Fig. 1 The composition drawing of atmospheric pressure gradient vector

$$\text{grad}U = \frac{\partial u_i}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial u_j}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial u_k}{\partial z} \vec{k} \quad (5)$$

其方向导数为:

$$\frac{\partial U}{\partial L} = \frac{\partial u}{\partial x} \cos\alpha + \frac{\partial u}{\partial y} \cos\beta + \frac{\partial u}{\partial z} \cos\gamma \quad (6)$$

式中:  $\text{grad}U$ —— $\vec{U}$  的气压梯度;  $\alpha, \beta, \gamma$ —— $\vec{U}$  与  $x, y, z$  轴的夹角。

根据梯度的性质, 梯度方向就是方向导数最大的方向。根据假设  $x$  轴为气流运行方向, 即梯度方向, 则说明  $x$  轴上的方向导数最大, 梯度在  $x$  轴上的投影为:

$$\text{grad}_x U = \frac{\partial u}{\partial x} \cos\alpha \quad (7)$$

由于地势高差产生的附加压力  $x$  梯度为:

$$\text{grad}G = \frac{\partial G_i}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial G_j}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial G_k}{\partial z} \vec{k} \quad (8)$$

在迎风坡方向与大气运行方向一致为正, 背风坡为负, 其方向导数为:

$$\frac{\partial G}{\partial L} = \frac{\partial G}{\partial x} \cos\alpha + \frac{\partial G}{\partial y} \cos\beta + \frac{\partial G}{\partial z} \cos\gamma \quad (9)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma$ ——分别为  $\vec{G}$  与  $x, y, z$  轴的夹角。  $\vec{G}$  在  $x$  轴上的投影为:

$$\text{grad}_x G = \frac{\partial G}{\partial x} \cos\alpha \quad (10)$$

由矢量合成规则, 作用于迎风坡的压力梯度  $\vec{P}$  在  $x$  轴上的投影(图1a)为:

$$\text{grad}_x P_1 = \frac{\partial u}{\partial x} \cos\alpha + \frac{\partial G}{\partial x} \cos\alpha \quad (11)$$

作用于背风坡的压力梯度  $\vec{P}_2$  在  $x$  轴上的投影(图1b)为:

$$\text{grad}_x P_2 = \frac{\partial u}{\partial x} \cos\alpha - \frac{\partial G}{\partial x} \cos\alpha \quad (12)$$

由式(11)、(12)可知,迎风坡与背风坡压力梯度力的差异主要取决于  $\frac{\partial G}{\partial x} \cos\alpha$ 。

当  $\cos\alpha = 1$  时,  $\alpha = 0$ , 不会产生由于地形而导致的压力差。

当  $\cos\alpha = 0$  时,  $\alpha = 90^\circ$ ;  $\frac{\partial G}{\partial x} = 0$ , 即说明由于地形产生的附加压力梯度在  $x$  轴上没有产生附加量。

当  $0 < \cos\alpha < 1$  时,  $0 < \alpha < 90^\circ$ ;  $\frac{\partial G}{\partial x} \cos\alpha$  是一个非零的量, 故在迎风坡及丘顶气压梯度力为两矢量之和, 风力大, 风蚀强烈, 土壤粗砾化严重, 老岩层暴露, 砾石及钙结核遍及丘顶。在背风坡, 两矢量方向相反, 气流产生涡动, 气压梯度力为两矢量之差, 风力减小, 风能下降, 输沙率减小, 风沙流达到饱和, 沙堆积在背风坡, 形成了成片沙地。

根据作者在片沙覆盖的黄土丘陵区的野外调查、航片分析, 以及典型流域“六道沟流域地面物质组成图”<sup>[11]</sup>计算, 80% 的片沙覆盖在丘陵的背风坡。又在神木县 1/10 000 地形图上, 选择一条 NNW 向的地形断面, 绘制了地形与物质组成断面图, 更进一步说明了上述理论的正确性, 图 2 是地形断面图中的一段。

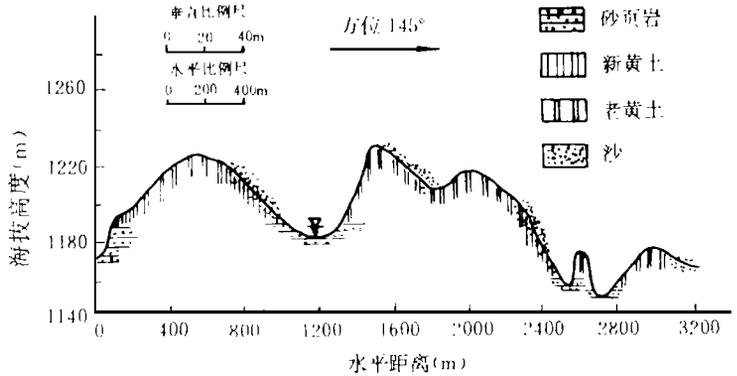


图 2 神木县西沟乡新圪崂地形断面图

Fig. 2 The topography sectional drawing of Xingelao in Shengmu county

根据作者在片沙覆盖的黄土

丘陵区的野外调查、航片分析, 以及典型流域“六道沟流域地面物质组成图”<sup>[11]</sup>计算, 80% 的片沙覆盖在丘陵的背风坡。又在神木县 1/10 000 地形图上, 选择一条 NNW 向的地形断面, 绘制了地形与物质组成断面图, 更进一步说明了上述理论的正确性, 图 2 是地形断面图中的一段。

### 3. 2 风向与丘陵沟道走向平行时的空气流压场分析

当气流流线方向与沟谷丘陵走向相平行时, 在两沟谷之间分水岭的迎风端, 气流辐散, 风速减小, 发生堆积, 而在两侧沟口处气流辐合, 风速加大, 风蚀加强。

在沟谷内部, 由于沟道宽窄不同, 气流场也发生变化。假设进入沟道的气流相似于管形场, 在沟道中任意两个横断面  $S_1$ ,  $S_2$  (图 3) 则有:

$$v_1 dS = v_2 dS \tag{13}$$

若  $S_2$  的横截面大于  $S_1$  的横截面, 则风速在  $S_2$  处必然小于  $S_1$  处。即在沟道中, 沟谷变宽, 气流辐散, 在宽谷阶地上发生风积; 沟谷变窄, 气流辐合, 风速加大, 气流的巷道效应风蚀严重。故在一些分水岭的迎风端及宽谷高阶地上堆积有片片沙地, 在狭窄谷段, 高风速风沙流在沿沟运行过程中, 吹蚀磨蚀两侧易风化的砂页岩及沙黄土, 使沟谷底部侧蚀拓宽形成了上缓下陡的套沟, 是风蚀水蚀交替作用所致。

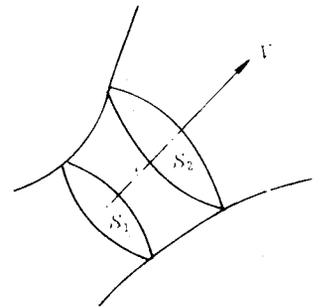


图 3 沟道气流变化示意图

Fig. 3 The air flow change drawing internal valley

## 4 不同地貌部位土壤粗化、沙化过程

根据拜格诺的输沙率理论计算公式及津格、扎基罗夫的经验公式可知,输沙率与风速呈幂指数关系,所以风速变化会引起输沙率的大幅度变化,风沙流随风速的变化而发生侵蚀与堆积,沙粒在运动过程中发生分选,聚集形成了一系列不同的地表形态。在迎风坡风力大,土壤发生风蚀,随着风速的加大,搬运的物质变粗,残留下一些不易被风所搬运的粗砾、石块及钙结核,到了丘顶,风力达到最大,风蚀更为严重,砾石、钙结核比比皆是。随着气流的前进,在背风坡风力逐渐减弱,输沙率减小,风沙流发生卸载堆积。气流由风蚀变风积是一个渐变过程,不仅在时间上有先后之分,而且在空间上也有距离之别。因此,当风速逐渐变小时,风沙流中的较大沙粒首先沉降到地表,较小的沙粒随后才沉积,一些更小的粉尘、悬移质可随风运行到很远的地方。在堆积的同时还可将背风坡土壤中的一些细物质被风带走,风沙流中的沙粒沿程堆积,粗细分化,土壤发生不同程度的粗化、沙化。

## 5 结论

本区自然环境具有明显的过渡性,物质组成复杂多样,在特殊的空气流压场控制下,导致了土壤侵蚀的复杂性及独特的规律性。

(1) 土壤强烈风蚀主要发生在迎风坡及丘顶、气流发生辐合的地貌部位。表现为土壤粗化,老岩层暴露,钙结核、石块及砂粒比比皆是。

(2) 片沙主要覆盖在气流涡动的背风坡及气流发生辐散的地形部位。顺风向吹蚀的流沙痕迹遍及山坡。

(3) 从迎风坡到背风坡,土壤颗粒逐渐由粗砾变为沙粒及细粒,土壤由粗砾化过渡为沙化。同一地貌部位在同一风力的作用下,吹蚀沉降同时进行,带走细粒,沉降粗粒,土壤向粗粒化演化。

总之,本区风蚀水蚀交替进行,在时间上衔接,空间上迭加,区别于荒漠区单一的风蚀,不同于黄土丘陵区单调的水蚀。这是该区土地严重沙漠化的主要原因,形成了独特的土壤侵蚀规律。伴随沙漠化的发展,土壤结构变坏,肥力降低,大风沙暴频率加大,灾害性天气反复无常。加之近年来工矿建设使人为加速侵蚀严重,导致了一系列环境问题。故研究该区的土壤侵蚀规律,有助于我们认识土壤侵蚀的特殊过程,为保持水土、防治沙化、改善环境提供一些科学理论依据。

### 参考文献

- 1 朱朝云等. 风沙物理学. 北京: 中国林业出版社, 1992. 127 ~ 143
- 2 谢树芝等. 矢量分析与场论. 北京: 高等教育出版社, 1984. 13 ~ 36
- 3 杨大升等. 动力气象学. 北京: 气象出版社, 1983. 20 ~ 50
- 4 张平仓, 唐克丽等. 神木试区环境地貌分析. 中国科学院水土保持研究所集刊, 1993, (18): 16 ~ 23
- 5 Goossens D. Wind Tunnel Experiments of Aeolian Dust Deposition Along Ranges of Hills. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, (3): 205 ~ 216