致谢 董枝明研究员给予指导并修改稿件,何信禄教授参加前期发掘研究并予以指导,周凤云、代兵等测制地层剖面和参加发掘工作,刘尚忠高级工程师和蔡开基教授协助编绘骨架复原图. 作者对他们表示感谢.

参 考 文 献

1 董枝明,周世武,张奕宏. 四川盆地侏罗纪恐龙化石. 北京: 科学出版社,1983. 1~ 134
2 张奕宏. 四川自贡大山铺中侏罗世恐龙动物群,第三集,蜥脚类(一);蜀龙. 成都: 四川科学技术出版社,1988. 1~ 67
3 杨钟键. 许氏禄丰龙. 见: 中国古生物志新丙种第7号. 北京: 前中央地质调查所,1941
4 杨钟键. 禄丰蜥龙动物群. 见: 中国古生物志新丙种,第13号. 北京: 中国古生物学会,1951
5 张奕宏,杨兆龙. 中国禄丰盆地一新的完整原蜥脚类化石——金山龙. 昆明: 云南科技出版社,1994. 1~ 75
6 Jain S L, Kutty T S, Rog T, et al. The sauropod dinosaur from the lower jurassic kota formation of india. Proc Royal Soc London Ser B, 1975, 188: 221~ 228
7 Galton P M. Basal sauropodomorpha—Prosauropoda. The Dinosauria (15). USA: University of California Press, 1990. 320~ 344
8 Mcintosh J S. Sauropoda. The Dinosauria (16). USA: University of California Press, 1990. 345~ 401

(1998-08-06收稿,1998-12-09收修改稿)

风沙流中跃移沙粒轨迹参数分析

邹学勇 郝青振 张春来 杨 保
刘玉璋 董光荣 周绍祥④
(中国科学院兰州沙漠研究所,兰州 730000; ④中国科学技术大学九系,合肥 230026)

摘要 应用高速频闪摄影技术和理论分析相互印证的方法,揭示了沙粒起跃角(α)与降落角(β)、跃移长度和最大跃高之比(L/H)与α、沙粒运动方向和地面夹角(θ)与时间(t)之间均为非线性关系. 只有当沙粒粒径较大和垂直初速度较小时,可近似地将α与β看做线性关系;当$U_{z1}<1$ m/s时,$L/H\approx 4C\mathrm{tg}\alpha$;当$\alpha<25°$时,$\theta$与$t$近似为线性关系.

关键词 风沙流 跃移沙粒 轨迹参数 高速频闪摄影

在广袤的沙漠和戈壁地区,风沙流作为塑造地貌形态最主要的外营力,早已引起科学家们的重视. 自1941年Bagnold[1]开创"风沙物理学"研究领域以来,许多学者[2~11]相继致力于风沙流研究,在风沙流结构、沙粒运动形式、单个沙粒运动参数等方面取得了丰硕成果. 由于跃移沙粒是风沙流的主要成分,约占75%,研究者们的焦点都集中在跃移成分上. 风沙流中的跃移沙粒是一种群体运动,要认识这种运动的本质,首先要揭示单个跃移沙粒的运动特征,然后才能用随机的方法建立相应理论模式. 因而,沙粒的跃移轨迹参数分析就成为风沙流研究中的重要内容之一. 对于典型的轨迹,主要参数包括起跃角(α)、起跃速度(U_1)、降落角(β)、降落速度(U_2)、跃移长度(L)、最大跃移高度(H)和轨迹各点的角度(θ). 以往这方面的研究主要限于某一个参数的变化,理论与实际没有很好地结合,要么只有实验结果分析[4,9,12],要

么只有理论计算结果[10, 13, 14]. 至于各参数间关系的研究仅见凌裕泉等人[15]的实验分析结果, 他们认为 α 与 β, L/H 与 α 均为线性关系. 形成这种局面的原因在于, 一方面沙粒很小, 一般在 0.1~ 0.25 mm 之间, 难以获得完整的跃移轨迹图象, 另一方面各人的研究侧重点不同. 应用高速频闪摄影技术可以控制单位时间曝光次数, 得到清晰的轨迹图象, 并根据相邻点的实际距离和时间差计算分速度和合成速度. 这样就有可能将理论分析与实验结果相比较, 解决理论与实际脱节问题.

1 实验方法与研究思路

实验安排在本所专用沙风洞内[16]夜间进行. 采用的光源是日本产 MS-230 型频闪光(400 次/s), 经聚集成宽为 1 cm 的片状光, 垂直向下投射. 摄影采用 FUJICA-135 型相机和中国产 27DIN 乐凯牌全色胶卷. 相机曝光时间 0.5 s, 光圈系数 1.9. 为增加照片的色调反差, 冲印药剂用 D76 显影剂和 3 号相纸. 选择适当风速和样品, 即可获得理想的照片. 经照片与实际比例校正后, 计算各参数. 本文所用的实验数据均为完整轨迹的计算结果.

如前所述, 就某一个参数变化规律研究已很多. 本文着重讨论 α 与 β, $\frac{L}{H}$ 与 α 的关系, 以及 θ 等运动参数的变化, 提出近似的理论模式. 在进行理论分析时, 为了方便运算, 做下列简化: ( ) 垂直方向(Z 轴) 上的气流脉动和在水平面上垂直于气流方向(Y 轴) 的气流速度梯度为零, 即气流顺直向前; ( ) 沙粒质量密度远大于空气质量密度, 沙粒的运动速度远小于气流速度(实际可相差数倍, 甚至 10 倍以上). 所以忽略空气质量密度和沙粒运动速度对理论分析结果的影响; ( ) 忽略 Magnus 效应和 Saffman 升力, 这两种力远小于沙粒重力.

2 理论分析与实验结果

2.1 起跃角与降落角的关系

在$(X\ Y\ Z)$三维空间中, 根据前述条件, 可将问题简化在 XOZ 平面坐标系中(图 1). 设在垂直方向(Z)上的风速分布近似为线性, 即 $U_F = KZ - h$. 其中, K 和 h 取风洞内流沙地面条件下的 6 组实验数据平均值, $K = 29.3/\mathrm{s}$, $h = 2.43 \times 10^{-4}\ \mathrm{m/s}$. 则单个沙粒的跃移运动方程为

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}U_X}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{1}{2}SC_X\rho_g U_F^2, \\ m\dfrac{\mathrm{d}U_Z}{\mathrm{d}t} = -mg, \end{cases} \tag{1}$$

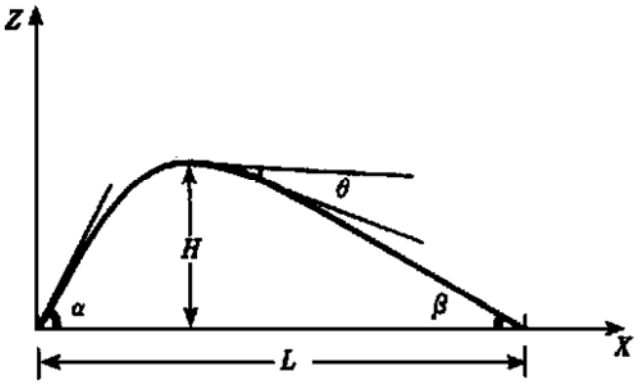


图 1 沙粒跃移典型轨迹

其中 m 为沙粒质量, S 为沙粒最大横截面积, C_X 为正面阻力系数, ρ_g 为空气密度, U_X 和 U_Z 分别为沙粒水平和垂直运动速度, U_F 为风速. 沙粒从起跳到降落所需时间 $t = \dfrac{2U_{Z1}}{g}$, U_{Z1}为沙粒起跳时的垂直初速度, g 为重力加速度. 则

$$\begin{cases} m\dfrac{\mathrm{d}U_X}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{1}{2}SC_X\rho_g(KZ - h)^2, \\ Z = U_{Z1}t - \dfrac{1}{2}gt^2, \end{cases} \tag{2}$$

将方程(2)中的第 2 式代入第 1 式, 积分. 令 t 从 0 $\rightarrow \frac{2U_{Z1}}{g}$. 当 $t=0$ 时, $U_X=U_{X1}$. 得沙粒降落时的水平分速度

$$U_{X2}=\frac{SC_X\rho_g}{m}\left|\frac{h^2U_{Z1}}{g}-\frac{2hKU_{Z1}^3}{3g^2}+\frac{2K^2U_{Z1}^5}{15g^3}\right|+U_{X1}, \tag{3}$$

其中 U_{X1}为沙粒起跳时的水平初速度. 在 Z 轴方向上, 降落时分速度(U_{Z2})的绝对值 $|U_{Z2}|=|U_{Z1}|$, 则 $\mathrm{Ctg}\,\alpha=\frac{U_{X1}}{U_{Z1}}$, $\mathrm{Ctg}\,\beta=\frac{U_{X2}}{U_{Z2}}$. 由方程(3)得到

$$\mathrm{Ctg}\,\alpha=\mathrm{Ctg}\,\beta-\frac{SC_X\rho_g}{m}\left|\frac{h^2}{g}-\frac{2hKU_{Z1}^2}{3g^2}+\frac{2K^2U_{Z1}^4}{15g^3}\right|, \tag{4}$$

方程(4)就是起跃角与降落角的关系(图 2).

2.2 跃移长度和最大高度之比与起跃角的关系

若将方程(2)积分 2 次, 得到沙粒的跃移长度为

$$L=\frac{SC_X\rho_g}{m}\left|\frac{h^2U_{Z1}^2}{g}-\frac{2hKU_{Z1}^4}{3g^3}+\frac{2K^2U_{Z1}^6}{15g^4}\right|+\frac{2U_{X1}U_{Z1}}{g}, \tag{5}$$

沙粒的最大跃移高度 $H=\frac{U_{Z1}^2}{2g}$. 则

$$\frac{L}{H}=4\mathrm{Ctg}\,\alpha+\frac{2SC_X\rho_g}{m}\left|h^2-\frac{2hKU_{Z1}^2}{3g^2}+\frac{2K^2U_{Z1}^4}{15g^3}\right|. \tag{6}$$

由于 $h\ll 1$, 当 $U_{Z1}>1$ m/s 时, 式(6)可简化为式(7). 当 $U_{Z1}<1$ m/s 时, 式(6)可简化为式(8). 取 $U_{Z1}=1.1$ m/s. 采用式(7)(图 3).

$$\frac{L}{H}=4\mathrm{Ctg}\,\alpha+\frac{4SC_X\rho_gK^2U_{Z1}^4}{15mg^3}, \tag{7}$$

$$\frac{L}{H}=4\mathrm{Ctg}\,\alpha. \tag{8}$$

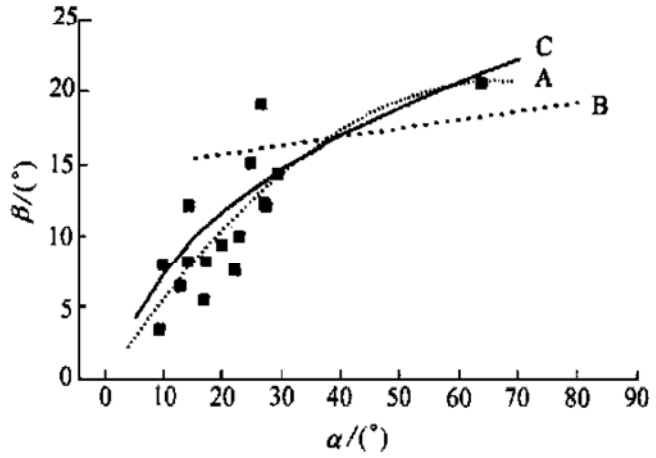


图 2 α-β 相关图

A ——粒径 0.2~ 0.3 mm 流沙, 风速 8.2 m/s, 实测; B ——据文献[13]; C ——据本文方程(4)计算, 粒径 0.2 mm, U_{Z1} = 1.5 m/s, ρ_g = 1.05 kg/m^3, C_X = 0.75

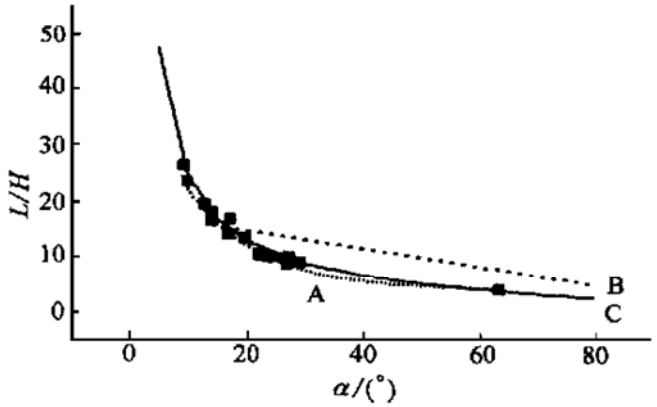


图 3 $\frac{L}{H}$-α 相关图

A ——粒径 0.125 mm 流沙, 风速 7.0 m/s, 实测; B ——据文献[13]; C ——据本文方程(7)计算, 粒径 0.125 mm, ρ_g = 1.05 kg/m^3, C_X = 0.75

2.3 轨迹各点角度变化

轨迹各点的角度变化是指沙粒在跃移过程中, 其运动方向与地面(水平面)间的夹角. 确定了运动轨迹各点的角度变化, 就控制了跃移轨迹的形态. 所以, 它是研究跃移沙粒运动轨迹的重要环节. $\mathrm{tg}\theta=\frac{U_Z}{U_X}$, 根据方程(2)积分, 得

$$\mathrm{tg}\theta=\frac{2m(U_{Z1}-gt)}{SC_X\rho_g t[h^2-hKU_{Z1}t+\frac{1}{3}(hKg+K^2U_{Z1}^2)t^2-\frac{1}{4}K^2U_{Z1}gt^3+\frac{1}{20}K^2g^2t^4]+2mU_{X1}}. \quad (9)$$

式(9)表明, θ 值随时间 t 增加而迅速减小, 并在 $t=\frac{U_{Z1}}{g}$ 时出现 0 值. 随后均以负值出现(图 4). 这完全符合沙粒跃移过程中的实际轨迹.

由以上讨论可知, 在一定的沙粒粒径和风速条件下, 影响 α 和 β 间关系的因素有 2 个, 即风速梯度和垂直初速度, 其中风速梯度的变化是最主要的. 起跃角与降落角并非线性关系, 而是 $C\mathrm{tg}\alpha$ 和 $C\mathrm{tg}\beta$ 间呈线性关系. 前人的实验统计结论所反映的只是 β 随 α 变化的趋势. 经数值计算, $\left|\frac{h^2}{g}-\frac{2hKU_{Z1}^2}{3g^2}+\frac{2K^2U_{Z1}^4}{15g^3}\right|>0$, 它解释了为什么降落角总是小于起跃角, 并且不发生大幅度变化, 原因在于 $\frac{SC_X\rho_g}{m}\left|\frac{h^2}{g}-\frac{2hKU_{Z1}^2}{3g^2}+\frac{2K^2U_{Z1}^4}{15g^3}\right|$ 项的延滞作用.

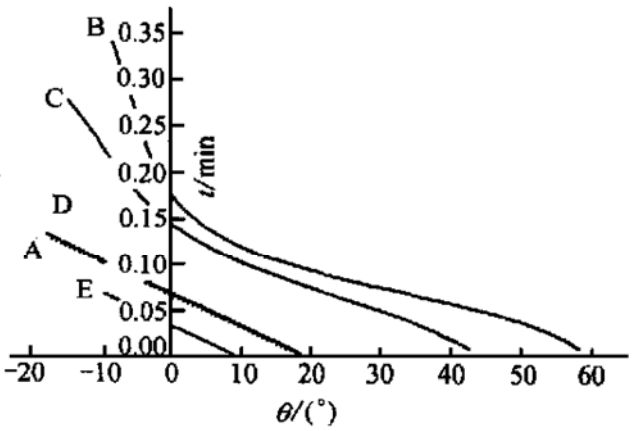


图 4 θ-t 相关图

A ——粒径 0.125 mm, U_1= 1.37 m/s, α= 19.2°, 实测, B, C, D, E —— 据本文方程(9)计算, α 分别为 60°, 45°, 20°和 10°, 粒径 0.125 mm. U_1= 2 m/s, C_x= 0.75

严格地说, $\frac{L}{H}$ 不仅与 α 有关, 而且与 S, C_X, ρ_g, h, m, U_{Z1}和 K 等因子有关, 但这些因子对 $\frac{L}{H}$ 的影响有时很微弱(当 $U_{Z1}<1$). $\frac{L}{H}$ 值随 α($\alpha\in[0°, 90°]$)的增大而减小, 这与实际观测结果相一致. $\frac{L}{H}$ 与 $C\mathrm{tg}\alpha$ 呈线性关系. 当 30°< α< 90°时, $\frac{L}{H}$ 与 α 近似于线性关系, 这就是造成实验统计结果认为 $\frac{L}{H}$ 与 α 呈线性关系的原因.

致谢 本工作为中国科学院重大项目(KZ951-B1-206)和国家自然科学基金(批准号: 39990490)资助项目.

参 考 文 献

1 Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Mathuen & Co Ltd, 1941
2 Owen P R. Saltation of uniform grains in air. J Fluid Mech, 1964, 20(2): 225~ 242
3 Kawamura R. Study on sand movement by wind. Report Institute Sci & Tech, Univ, Tokyo, 1951, 5(3): 95~ 112
4 Nalpanis P, Hunt J C R. Saltating particles over flat beds. J Fluid Mech, 1993, 251: 661~ 685
5 邹学勇, 朱久江, 董光荣, 等. 风沙流结构中起跃沙粒垂直初速度分布函数. 科学通报, 1992, 37(23): 2175~ 2177

6 刘贤万. 颗粒运动及其数理简析. 中国沙漠, 1993, 13(2): 1~ 8
7 马世威. 风沙流结构的研究. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8~ 22
8 邹学勇, 刘玉璋, 董光荣. 风沙流能量的实验计算. 科学通报, 1994, 39(2): 161~ 164
9 Jensen J L, Sorensen M. Estimation of some aeolian saltation transport parameters: a re-analysis of williams' data. Sedimentology, 1986, 33: 547~ 558
10 Anderson R S, Haft P K. Simulation of aeolian saltation. Science, 1988, 241: 820~ 823
11 吴 正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987
12 贺大良, 高有广. 沙粒跃移运动的高速摄影研究. 中国沙漠, 1988, 8(1): 18~ 29
13 贺大良, 刘大有. 跃移沙粒起跃的受力机制. 中国沙漠, 1989, 9(2): 14~ 22
14 邹学勇, 董光荣, 王周龙. 戈壁风沙流若干特征研究. 中国沙漠, 1995, 15(4): 368~ 373
15 凌裕泉, 吴 正. 风沙运动的动态摄影实验. 地理学报, 1980, 35(2): 174~ 181
16 贺大良, 凌裕泉. 风沙现象研究的重要设备——沙风洞. 中国沙漠, 1981, 1(1): 49~ 51

(1998-05-12 收稿, 1998-12-03 收修改稿)

黄土中 $CaCO_3$ 含量及其 Sr 同位素组成变化与古气候波动记录

刘丛强 张 劲 李春来
(中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

摘要 陕西洛川黑木沟黄土剖面中碳酸盐的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值从 0.710 4 变化到 0.712 0, 其中古土壤碳酸盐的 Sr 同位素比值一般比黄土的高. 在剖面上, Sr 同位素比值的变化显示人们所熟悉的 100 ka 左右的冰期-间冰期循环周期, 而且与相同时期古海水的 Sr 同位素组成变化相似. 这一研究结果说明黄土中碳酸盐的 Sr 同位素组成变化可以指示风化程度和古气候的变化, 古海水 Sr 同位素组成的周期变动主要是大陆地壳物质风化作用程度变化的结果.

关键词 **黄土 $CaCO_3$ Sr 同位素 古气候变化**

碳酸盐在大陆黄土堆积和深海沉积物中的含量分布一般在冰期时高, 而在间冰期时低, 说明碳酸岩在沉积物堆积中的溶解和沉淀结晶受不同生物气候环境变化的影响[1,2]. 黄土-古土壤堆积物中有两种成因的碳酸盐, 即原生碎屑和次生碳酸盐, 并以后者为主. 次生碳酸盐的形成同时与碎屑碳酸盐和铝硅酸盐的矿物的风化有关, 其 Sr 同位素组成应随化学风化作用强弱而发生变化. 以下用两个一般化学反应式来说明次生碳酸盐的形成及其 Sr 同位素组成的变化:

$$(Sr, Ca)-\text{铝硅酸盐} + CO_2 + H_2O = (Sr, Ca)^{2+} + HCO_3^- + H_4SiO_4 + \text{铝硅酸盐} \quad (1)$$

$$(Sr, Ca)CO_3 + CO_2 + H_2O = (Sr, Ca)^{2+} + 2HCO_3^- \quad (2)$$

由于钙铝硅酸盐和碳酸盐矿物的耐风化强度不同, 在温湿气候条件下, 风化作用强烈, 长石、