

湿沙的风蚀起动风速实验研究

刘小平, 董治宝

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 风沙物理与工程实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 在土壤风蚀研究中, Bagnold 建立的干沙子的起动风速与沙粒粒径关系的表达式已被广泛接受。然而, 沙子含水率是影响沙粒起动风速的重要因子, 因为沙子在湿润状态下, 水分子与沙粒颗粒之间的拉张力增加了颗粒间的内聚力。通过风洞模拟实验研究了各种粒径的沙子在湿润状态下的起动风速。实验结果表明, 湿沙的起动摩擦速度与干沙的起动摩擦速度之比——相对起动摩擦速度能更好地反映沙子含水率对起动风速的影响。建立了湿沙子的起动风速与沙粒粒径和沙子含水率的关系式。

关键词: 沙子含水率; 沙粒粒径; 起动风速

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2002)02-0001-04

中图分类号: S157.1

Wind Threshold Shear Velocities of Sands at Moistened State

LIU Xiao-ping, DONG Zhi-bao

(Laboratory of Blown Sand Physics and Desert Environments, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu Province, China)

Abstract The widely accepted Bagnold type function to calculate threshold wind velocity or shear velocity was developed for dry sands. However, surface moisture is an extremely important variable controlling the entrainment process of sands by wind because the tensile force between the water molecules and sand grains produces cohesion. The detailed results from experiments in a laboratory wind tunnel are reported, in which the threshold shear velocities for a range of sand grains with different moisture content are measured. The results show that the functions relating threshold shear velocity and moisture content are different for different sized sands. Relative threshold shear velocity, the ratio of threshold shear velocity of sand at moistened state to that at dry state is better related to moisture content. For given grain size, the threshold shear velocity is proportional to the square root of moisture content.

Keywords moisture content; particle diameter; threshold shear velocity

1 前言

在土壤风蚀研究中,把沙粒开始运动的临界风速称为起动风速。这个数值在理论上和生产实践上都有非常重要的意义。起动风速直接影响输沙量的大小,而输沙量的大小是量化风沙危害的重要标志之一。据研究^[1],输沙量与实际风速和起动风速之差的三次方成正比。所以起动风速稍有提高,输沙量就急剧减少。沙子在含有水分状态下,起动风速值增大,因而水分是影响输沙率的重要因子^[2,3]。野外研究表明,沙子含水率对起动风速和输沙率的影响非常复杂^[4]。因而人们试图通过分析沙粒的受力情况来理解沙粒的起动机制。当气流吹过由疏松颗粒组成的床面时,沙粒受迎面阻力(拖曳力)和重力的作用;对粒径小于

0.1 mm沙粒而言,还必须考虑内聚力和黏滞力的作用。沙子在含有水分情况下,水分子与沙粒颗粒之间的拉张力增加了颗粒间的内聚力^[5,6],使之不易被风起动。因而对于粒径大于 0.1 mm 的沙粒在含有水分情况下要考虑颗粒间内聚力的作用。Bagnold根据作用在沙粒上的拖曳力和重力力矩平衡推导的起动风速的公式^[1],已被广泛地用于计算干沙的起动风速。但他忽略了沙土含水率变化导致沙粒间内聚力变化所产生的对起动风速的影响^[7]。许多学者曾就沙土水分对颗粒起动风速的影响进行过许多研究,然而,沙子在含有水分状态下的起动风速的计算仍处于粗略估计阶段^[5-18]。

以往关于含水率对起动风速的影响的研究工作具有如下几个方面的特点:(1)不同研究者采用不同

性质类型的沙土得出的结论不相同,无一可被广泛接受;(2)沙土含水率是在空气中测定的,而在沙土颗粒起动以前,气流对颗粒的风干作用大大影响了颗粒的含水率;(3)实验样品数量非常有限,不能获得水分与沙子起动风速之间的定量关系

本文试图通过风洞模拟实验研究沙子含水率对不同粒径的沙子的起动风速的影响,建立包括沙粒粒径和沙子含水率双因子的沙粒起动风速的表达式

2 实验方法

实验在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所风沙物理与工程实验室沙坡头野外风洞中进行。风洞为直流闭口吹气式,全长约 38 m,其中实验段长 21 m,截面积 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$,风速 $2 \sim 40\text{ m/s}$ 连续可调。本次实验沙样为采自野外的混合石英沙,磨圆度好,不含溶解盐和有机质。将沙样筛分为 10 个粒级: $0.045 \sim 0.054\text{ mm}$, $0.054 \sim 0.077\text{ mm}$, $0.077 \sim 0.090\text{ mm}$, $0.090 \sim 0.100\text{ mm}$, $0.100 \sim 0.135\text{ mm}$, $0.135 \sim 0.150\text{ mm}$, $0.150 \sim 0.200\text{ mm}$, $0.200 \sim 0.250\text{ mm}$, $0.250 \sim 0.400\text{ mm}$ 和 $0.400 \sim 0.500\text{ mm}$ 筛分好的沙样用人工方法加水 $50\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的实验盘底部由有 35 个筛孔的不锈钢筛子构成,底部放一层过滤纸。将沙子装在实验盘中,表面擀平,然后将实验盘一半浸入蒸馏水中,以使整个沙盘内的沙子渗透,然后将加湿后的沙盘放在空气中风干不同时间后用于风洞实验,测量起动风速。沙盘置于风洞实验段入口下风向 18 m 处,表面与洞底齐平。实验时,风速逐渐增加,直至沙粒起动为止,采集风速廓线资料后关机。从风洞中取出沙盘,刮表面 1 mm 厚的沙子装入铝盒中,置于 105°C 烘干箱内烘干 8 h 后,测定并计算沙样含水率。

实验时,用双面胶带放在沙盘下风向边缘处捕获运动沙粒,通过肉眼观察,胶带上沙粒时,视为沙粒运动。此方法与许多研究者(例如, Musik 等^[19])使用的方法相同。风速廓线用风速廓线仪^[20]观测。用最小二乘法回归所观测的风速廓线资料计算摩阻速度。用式子

$$U_z = A + B \ln Z \quad (1)$$

拟合观测的 10 个高度 ($0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 3.0, 6.0, 12.0, 25.0, 35.0, 50.0\text{ cm}$) 的风速资料。因而:

$$U_* = kB \quad (2)$$

式中: U_z ——高度 Z 处的风速; A, B ——回归系数; k ——卡曼常数, 0.4 ; U_* ——摩阻速度

3 结果与讨论

Bagnold^[1]曾提出流体起动风速和冲击起动风速 2 种起动风速的概念,他指出,流体起动风速是在净风作用下的起动风速,冲击起动风速是在挟沙风作用下的起动风速。本次实验仅在净风条件下进行,因而下面的结果仅针对流体起动风速。任何高程 z 上的流体起动风速 U_i 为:

$$U_i = (U_* / k) \ln(z / z_0)$$

式中: 起动摩阻速度 $U_* = \sqrt{f/d}$; f ——地表剪切应力; d ——空气密度; z_0 ——地表粗糙度; k ——卡曼常数, 0.4

由于流体起动风速 U_i 随高程 z 的变化而变化,而每次实验的实验条件和测量风速的高度都不同,所以流体起动风速 U_i 不利于进行实验间的对比,因此本研究采用不随高程变化的参数——起动摩阻速度 U_* 进行研究。各种粒径的沙子在不同含水率状态下的流体起动摩阻速度风洞实验计算结果见表 1

3.1 干沙子的流体起动摩阻速度

为了研究沙子含水率对起动风速的影响程度,首先测量干沙子(在 105°C 的烘箱内烘 8 h)的起动风速,以便进行对比。干沙子的流体起动摩阻速度与沙粒粒径的关系曲线与 Bagnold 的结论^[1]相似,可用一个分段函数来描述:

$$U_{*i0} = 38.52 - 1265.40D, D < 0.1\text{ mm} \quad (3a)$$

$$U_{*i0} = C \sqrt{\frac{d}{d} g D},$$

$$C = 0.172 - 0.0046 \cdot Re_*^{0.5}, D > 0.1\text{ mm} \quad (3b)$$

式中: U_{*i0} ——干沙子流体起动摩阻速度 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); D ——沙粒粒径 (cm); d, d ——为沙子和空气密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); g ——重力加速度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$); C ——与颗粒摩阻雷诺数相关的比例常数; Re_* ——颗粒摩阻雷诺数,表征临界状态近地表湍流,它的定义为:

$$Re_* = U_* D d / \underline{\quad} \quad (4)$$

式中: U_* ——起动摩阻速度 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); $\underline{\quad}$ ——空气动力黏滞系数 ($1.789 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

本实验所得关系曲线与 Bagnold 的曲线不同之处在于,沙粒的流体起动值最小的临界粒径为 0.1 mm ,而非 Bagnold 的 0.08 mm 。实际上,其它研究者已经提出过不同的临界粒径^[1,5],已经报道过的研究成果表明,粒径范围为 $0.07 \sim 0.125\text{ mm}$ 的沙粒最易被风带起。从式 (3a) 可以看出,粒径小于 0.1 mm 的极细沙粒的流体起动值随沙粒粒径的增加而减小。

表 1 各种粒径的沙子在不同含水率状态下的起动摩阻速度的风洞实验结果

粒径 /mm	项 目	不同含水率状态下的起动摩阻速度										
0.045~ 0.054	<i>M</i> /%	0.00	0.80	1.11	1.13	1.22	1.35	1.34	1.76	2.37	4.23	4.46
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	32.40	36.40	36.80	44.40	47.60	58.80	69.60	72.00	81.20	89.20	94.00
	U_{*rel}	1.00	1.12	1.14	1.37	1.47	1.81	2.15	2.22	2.51	2.75	2.90
0.054~ 0.077	<i>M</i> /%	0.00	0.61	0.93	0.96	1.50	1.56	2.06	2.78	2.84	3.49	3.68
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	29.8	36.00	43.30	46.40	53.20	64.00	60.00	70.40	83.60	75.20	94.00
	U_{*rel}	1.00	1.21	1.45	1.56	1.79	2.15	2.01	2.36	2.81	2.52	3.15
0.077~ 0.090	<i>M</i> /%	0.00	0.40	0.56	1.31	1.69	2.21	2.37	2.46	2.75	2.78	
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	28.40	35.60	46.40	56.80	68.80	76.80	60.80	68.80	92.80	78.40	
	U_{*rel}	1.00	1.25	1.63	2.00	2.42	2.70	2.14	2.42	3.27	2.76	
0.090~ 0.100	<i>M</i> /%	0.00	0.96	1.29	1.27	1.71	1.82	2.93	3.10	3.12	3.50	
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	26.40	28.00	38.80	35.60	48.00	48.00	62.00	70.00	75.60	84.00	
	U_{*rel}	1.00	1.06	1.47	1.35	1.82	1.82	2.35	2.65	2.86	3.18	
0.100~ 0.135	<i>M</i> /%	0.00	0.65	0.79	1.19	1.33	2.44	2.88	2.89	3.04	3.67	
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	26.41	26.80	32.80	49.60	50.80	59.60	66.00	84.40	90.00	97.20	
	U_{*rel}	1.00	1.02	1.24	1.88	1.92	2.26	2.50	3.20	3.41	3.68	
0.135~ 0.150	<i>M</i> /%	0.00	0.47	1.27	1.35	1.47	1.72	2.78	3.15	3.70	3.79	
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	27.20	33.20	32.40	43.60	45.60	47.60	78.80	72.00	88.00	95.20	
	U_{*rel}	1.00	1.22	1.19	1.60	1.68	1.75	2.90	2.65	3.24	3.50	
0.150~ 0.200	<i>M</i> /%	0.00	0.45	1.08	1.19	1.44	1.52	1.50	1.55	2.18	3.15	
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	30.80	31.80	49.60	65.60	69.20	62.60	77.60	70.00	89.80	93.80	
	U_{*rel}	1.00	1.03	1.82	2.13	2.25	2.03	2.52	2.27	2.92	3.05	
0.200~ 0.250	<i>M</i> /%	0.00	0.39	0.52	0.54	0.56	0.70	0.77	1.10	1.74	2.81	
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	38.80	46.40	48.40	42.80	48.80	49.20	64.40	68.00	79.60	92.80	
	U_{*rel}	1.00	1.20	1.25	1.10	1.26	1.27	1.66	1.75	2.05	2.39	
0.250~ 0.400	<i>M</i> /%	0.00	0.32	0.51	0.67	0.70	0.95	1.04	1.07	1.09	1.40	2.24
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	40.8	44.00	48.80	49.60	67.60	48.40	55.60	83.60	87.20	90.40	92.80
	U_{*rel}	1.00	1.08	1.20	1.22	1.66	1.19	1.36	2.05	2.14	2.22	2.27
0.400~ 0.500	<i>M</i> /%	0.00	0.26	0.27	0.32	0.36	0.40	0.90	1.29			
	$U_{*t} / (\text{cm}^\circ \text{s}^{-1})$	45.20	46.80	45.60	45.20	45.20	77.20	85.20	92.80			
	U_{*rel}	1.00	1.04	1.01	1.00	1.00	1.71	1.88	2.05			

Bagnold^[1]认为,极细的颗粒表面从大气中吸附了一层黏稠的水膜,因而流体起动速度必须更大才能使极细的沙粒起动。然而,根据本实验的结果,极小床面颗粒的流体起动值增加并不完全是由于吸附水分的黏附力的缘故,而是一个真正的流体动力学现象。充分发展的紊流对床面单个颗粒的作用取决于床面单个颗粒以上以及围绕这些沙粒的小尺度流体,而这种小尺度流动决定于雷诺数 Re_t 。本次实验的极细颗粒(平均粒径为 0.005~0.0095 mm)的 Re_t 小于 2,该值小于 Re_t 的极限值 $3.5^{[1]}$,床面变成“光滑”的,靠近床面沙粒附近的流体发生了重要变化,单个的沙粒不再放射小旋涡,紧贴着颗粒四周有一层半黏性的、非紊动的层流。因而紊流,进而升力对极细颗粒的起动不再起作用。因此,要有更大的阻力才能使极细沙粒发生运动。根据我们的实验结果,对粒径大于

0.1 mm 的沙粒而言,式 (3b)中的系数 C 随颗粒摩阻雷诺数的平方根线性递减。这表明用颗粒摩阻雷诺数表征的湍流对颗粒的起动起着至关重要的作用。在充分发展的紊流中,沙粒的作用有如流程上的一个孤立的障碍物,在它的背流面放射出一连串的小漩涡。处于其它颗粒之上的暴露的沙粒由于承受了更多的阻力而开始运动。我们的另一风洞实验结果表明,颗粒的起动发生在非完全发展的紊流区域,紊流对颗粒起动的影响随 Re_t 的增加而增加,这可以从式 (3b)中系数 C 随 Re_t 的增加而减小反映出来。

3.2 湿沙子的流体起动摩阻速度

本次实验采用 10 种沙粒粒径,分别加水到不同程度,在风洞中测试水分对起动摩阻速度的影响,以找出沙子含水率与湿沙子起动摩阻速度 (U_{*m}) 之间的数量关系。实验结果表明(表 1),沙子含水率使湿

沙子起动摩阻速度 (U_{*tm}^*) 增加了 1.01~ 3.68 倍, 增加的倍数与沙子含水率和沙粒粒径有关。在含水率较低情况下, 粗沙子较细沙子不易被风起动。在本次实验中, 粒径为 0.05 mm 的湿沙子的极限含水率为 4.46%, 而粒径为 0.45 mm 的湿沙子的极限含水率则为 1.29%, 一般说来, 沙子的极限含水率随沙粒粒径的增大而减小。沙漠沙(粒径一般为 0.10~ 0.25 mm)的极限含水率近似为 4.0%, 此结果与 Azizov^[10] 和 Logie^[12] 等的实验结果一致。

各种粒径的湿沙子的 U_{*tm}^* 的实验数据非常分散, 要直接建立 U_{*tm}^* 与沙子含水率 M 之间的定量关系非常困难, 而湿沙子的输沙量方程要求必须建立 U_{*tm}^* 与沙子含水率 M 之间的数量关系。有鉴于此, 本文将各粒径的湿沙子的起动摩阻速度 U_{*tm}^* 与干沙子的起动摩阻速度 U_{*t0}^* 进行比较, 即:

$$U_{*tr}^* = U_{*tm}^* / U_{*t0}^* \quad (5)$$

式中: U_{*tm}^* ——湿沙子的起动摩阻速度 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$); U_{*tr}^* ——相对起动摩阻速度。则根据式 (3a) 和 (3b) 湿沙子的起动摩阻风速与沙粒粒径的关系为:

$$U_{*tm}^* = U_{*tr}^* (38.52 - 1265.40D) \quad (6a)$$

$$D < 0.1 \text{ mm}$$

$$U_{*tm}^* = U_{*tr}^* C \sqrt{\frac{d_s}{d}} gD, D > 0.1 \text{ mm} \quad (6b)$$

相对起动摩阻速度 U_{*tr}^* 基本上不受沙粒粒径的影响, 因而能更好地反映沙子含水率对沙子起动风速的影响。在一定的沙粒粒径条件下, 用统计相关分析得出相对起动摩阻速度与沙子含水率关系为 (表 2)

$$U_{*tr}^* = (1 + fM)^{1/2} \quad (7)$$

式中: M ——沙子含水率; f ——回归系数。

表 2 相对起动摩阻速度与沙子含水率的关系

粒径范围 /mm	平均粒径 /mm	f	R^2
0.045~ 0.054	0.0500	1.595	0.77
0.054~ 0.077	0.0655	1.848	0.86
0.077~ 0.090	0.0835	2.381	0.78
0.090~ 0.100	0.0900	1.708	0.74
0.100~ 0.135	0.1175	2.508	0.79
0.135~ 0.150	0.1425	2.052	0.78
0.150~ 0.200	0.1750	2.684	0.82
0.200~ 0.250	0.2250	1.594	0.88
0.250~ 0.400	0.3250	2.403	0.72
0.400~ 0.500	0.4500	1.946	0.73

注: 拟合函数 $U_{*tr}^* = (1 + fM)^{1/2}$ 。

将 (7) 式代入 (6a) 和 (6b) 式得到湿沙子的起动摩阻速度 U_{*tm}^* 公式为:

$$U_{*tm}^* = (38.52 - 1265.40D)(1 + fM)^{1/2} \quad (8a)$$

$$D < 0.1 \text{ mm}$$

$$U_{*tm}^* = C \sqrt{\frac{d_s}{d}} gD(1 + fM) \quad (8b)$$

$$D > 0.1 \text{ mm}$$

沙子在湿润情况下, 沙子的溶解盐和有机质也会影响沙粒间的内聚力, 从而影响沙粒的起动风速。本次实验选择的沙样不含溶解盐和有机质, 目的是只考虑沙粒粒径和沙子含水率对湿沙子起动风速的影响。式 (8) 表明, 在给定沙粒粒径情况下, 湿沙子的起动风速与沙子含水率的平方根成线性关系。实验结果还表明, 加相同的水分时, 低含水率的沙子比高含水率的沙子的起动风速增加得多。这解释了一个普遍现象, 在沙漠地区, 即使有少量降雨, 风沙流或沙尘暴立即停止^[13]。式 (8b) 表明, 加相同水分时, 粗沙子的起动风速比细沙子的增加得多。

4 结 论

本文通过风洞模拟实验建立了包括沙粒粒径和沙子含水率双因子的湿沙子的起动摩阻速度 U_{*tm}^* 的表示式, 此表示式与 Bagnold 的表示式的差别在于增加了沙子含水率一项。实验结果表明, 湿沙子的起动摩阻速度与沙子含水率、沙粒粒径和近地表湍流等因素有关。湿沙子的起动摩阻速度 U_{*tm}^* 与干沙子的起动摩阻速度 U_{*t0}^* 之比——相对起动摩阻速度 U_{*tr}^* 能更好地反映沙子含水率对流体起动风速的影响。对于一定的沙粒粒径, 湿沙子的起动摩阻速度随线性递增。本文中只考虑了颗粒与水分间的物理作用, 颗粒与水分间的其它物理和化学作用有待于进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. Methuen, London, 1941.
- [2] Lancaster N. Geomorphology of Desert Dunes[M]. Routledge, London, 1995. 290.
- [3] Livinstone I, Warren A. Aeolian Geomorphology: An Introduction[M]. Addison Wesley Longman Limited, 1996.
- [4] Pye K, Tsoar H. Aeolian Sand and Sand Dunes[M]. Unwin Hyman Ltd, 1990. 396.
- [5] Chepil W S. Properties of soil which influence wind erosion. State of dry aggregate structure[J]. Soil Science, 1951, 72: 387-401.
- [6] Baisal F, Hsieh J. Influence of moisture on the erodibility of soil by wind[J]. Soil Science, 1966, 102: 143-146.
- [7] 包为民. 沙土含水率对起动风速的影响[J]. 中国沙漠, 1996, 16: 315-318.

(下转第 61 页)

栽培技术。在建设好 3 大丘陵区重点生态农业基地后,应形成以点带面,扩大影响,使广大农民能真正得到实惠,从而带动整个丘陵山区农业生产的发展。

(3) 调整农业结构,提高林果、畜禽、蔬菜、牧草等特色产业的比重。农业结构的调整应从以下 4 个方面着手:① 粮经结构的优化调整,着重解决粮食过剩、结构单一的问题,使粮经二元结构向粮经饲肥多元结构转变。缩小粮食面积,扩大油菜、蔬菜、饲料及牧草、特种经济作物、花卉苗木和市场销路好的小杂粮种植等;② 要优化品种结构,重点是扩大粳稻和优质稻、双低油菜、优质饲用玉米和青果玉米、专用小麦品种等,扩大“五青”即蚕豆、青豌豆、青毛豆、青玉米、青豆苗和草头面积;③ 要优化种植结构,推广一批高矮相间,前后茬套作,粮经饲品种多元化,多形式的立体种植模式,并积极发展设施化、园艺化、工厂化农业,提高集约化水平;④ 优化区域结构,即根据 3 大丘陵区不同农业生产条件和特点形成各具特色的区域布局结构,农业生产条件好,水资源充足,经济实力强,农民素质高的南部和中部丘陵区,应以优质稻米、蔬菜和设施农业为发展方向;生态环境好、土地肥沃、资源充足、农民勤劳的中北部丘陵区应以优质粮油、特种禽畜、绿色食品开发为发展方向;北部丘陵区地势起伏较大,荒山荒坡多,农业生产条件相对较差,应以特种林果、种草养牧和生态型农业为发展方向等^[4]。

(4) 加大科技投入,提高农业综合开发项目的科技含量。加大农业科技投入应从以下几个方面着手:① 加速农业新技术的推广应用,以先进、高效的农业成果装备农业,农业生产技术应以优质化、轻型化、无害化为主;② 加强农业新技术的开发研究,重点在农产品精加工及综合利用、农产品贮藏、保鲜、包装技术和节本增效技术等方面;③ 加快农技人员的培养和知识更新,解决农技人员年龄结构、地区结构、职称结构的失衡现象,同时要加强人力资源管理,为其创造良好的工作环境。在加大科技投入的同时,还要加强农业综合开发科技示范园的建设,并以之为典型示范推广重大科技成果。目前已有的丘陵地区科技农业示范园要适当扩大规模,提高其科技含量,强化生物技术、信息技术与常规技术的结合应用,加强与大专院校、科研院所的技术合作,发挥好示范带头作用。

[参 考 文 献]

- [1] 江苏省人民政府. 2001江苏年鉴 [Z]. 南京: 江苏年鉴杂志社, 2001.
- [2] 江苏省农业资源开发局. 江苏省丘陵山区农业综合开发“十五”计划及 2015 年远景目标规划 [Z]. 2000.
- [3] 国家统计局农村社会经济调查总队. 中国农村统计年鉴 2000 [Z]. 北京: 中国统计出版社, 2000.
- [4] 程序, 等. 可持续农业导论 [M]. 北京: 北京农业出版社, 1998.
- (上接第 4 页)
- [8] 吴正. 风沙地貌学 [M]. 1987.
- [9] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control [J]. *Advances in Agronomy*. Academic Press, New York, 1963, 15: 302.
- [10] Azizov A. Influence of soil moisture on the resistance of soil to wind erosion [J]. *Soviet Soil Science*, 1977, 9: 105-108.
- [11] Nickling W G. Eolian sediment transport during dust storms Slims River Valley, Yukon Territory [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1978, 15: 1069-1084.
- [12] Logie M. Influence of roughness elements and soil moisture on the resistance of sand to wind erosion [J]. *Catena Suppl.* 1, 1982: 161-173.
- [13] Hagen L J, Skidmore E L, Layton J B. Wind erosion effect of aggregate moisture [J]. *Transactions of the ASAE*, 1988, 31: 725-728.
- [14] 贺大良, 申建友. 降水对起沙风速的影响 [M]. 1988. 18-25.
- [15] Mckenna-Neuman C, Nickling W G. A theoretical and wind tunnel investigation of the effect of capillary water on the entrainment of sediment by wind [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1989, 69: 79-96.
- [16] Saleh A, Fryrear D W. Threshold wind velocities of wet soils as affected by wind blown sand [J]. *Soil Science*, 1995, 160: 304-309.
- [17] Chen W N, Dong Z B, Li Z S. Wind tunnel test of the influence of moisture on the erodibility of loessial sandy loam soils by wind [J]. *Journal of Arid Environments*, 1996, 34: 391-402.
- [18] 董治宝, 李振山. 六道沟流域土壤水分抗风蚀性分析 [J]. *中国沙漠*, 1996, 16: 275-280.
- [19] Musick H B, Trujillo S M, Truman C R. Wind tunnel modeling of the influence of vegetation structure on salination threshold [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 589-605.