

建立小流域风蚀量统计模型初探*

董 治 宝

(中国科学院兰州沙漠研究所·兰州·730000)

摘 要 根据模拟实验及野外实测资料,以陕北神木县六道沟为例建立了小流域土壤风蚀流失量的经验估算模型,并以此模型估算该小流域的年风蚀量、风蚀模数。计算结果表明:六道沟小流域的风蚀模数为 $1\ 887.27\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,相当于 $1.25\text{mm}/\text{a}$,接近强度风蚀。春季是主要风蚀季节,占年风蚀总量的 99.98% 以上,其中又主要集中于 4—5 月,占年风蚀量的 99.30%。若该小流域的平均侵蚀模数按 $25\ 000\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 计,则风蚀占总土壤侵蚀的 7.55%,风蚀量与水蚀量之比为 1:12.25。在该小流域,风蚀与水蚀在时间序列上交错分布,前后相连。

中图分类号:S157.1

关键词: 小流域 风蚀量估算模型 风蚀模数

Establishing Statistic Model of Wind Erosion on Small Watershed Basis

Dong Zhibao

(Institute of Desert Research, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, PRC)

Abstract Taking Liudaogou small watershed as an example, based on simulative experiment from laboratory and field observation, attempts to establish wind erosion loss prediction model which are further used to estimate the amount of wind erosion loss and wind erosion modulus. It is found through the model estimation that the wind erosion modulus in Liudaogou small watershed is $1\ 887.27\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, corresponding to $1.25\text{mm}/\text{a}$, close to the severe erosion type. If the mean erosion modulus of this area is $25\ 000\text{t}/\text{a}$, the percentage of wind erosion out of total erosion is 7.55%, and the ratio of wind erosion to water erosion is 1:12.25. Of the total erosion, 99.98% is concentrated in spring and 99.30% is concentrated in April and May. The wind erosion season is followed by water erosion season, constituting severe erosion.

Keywords: small watershed; wind erosion prediction model; wind erosion modulus

为了精确地估算风蚀量,土壤风蚀科学家们已作了近 40a 的不懈努力,虽然先后提出了许多风蚀量估算模型^[1~6],但精确的估算问题仍远未解决。其原因在于土壤风蚀过程极其复杂,影响因素繁多,任何一个模型都难以尽全。所以,在世界范围内被广泛应用的风蚀方程(WEQ),仍在不断地修正与完善之中。

小流域水土流失治理是从多年的水土保持实践中得来的共识。小流域土壤侵蚀量的估算是治理规划及治理效果的评估依据。在风蚀营力与水蚀营力共同作用的风水两相侵蚀区,分别估算风蚀量与水蚀量对因害设防,采取有效治理措施具有指导意义。但是,虽然以小流域为单元的流水侵蚀量估算已取得了不少成绩,而以小流域为单元的风蚀量估算目前未见报道。本项研究选取位于典型风水两相侵蚀区的陕北神木县六道沟小流域,以风洞模拟试验建立土壤风蚀流失量模型,再根据野外调查资料计算风蚀量。六道沟小流域位于陕西省神木县城以西 14 km 处,是黄河中游重要产沙支流窟野河的 2 级支流。流域面积 6.89km^2 ,是“神木水蚀带生态

风蚀交错带生态环境整治技术及试验示范研究'环境整治区。流域地处毛乌素沙漠东北边缘,地貌类型为片沙覆盖的黄土丘陵。区内风蚀、水蚀强烈,除在一些沟台地及梯田地外,地表土层被侵蚀,土壤发育不良,绝大多数地表成土母质出露。年平均降水量 430 mm,其中 70% 集中于 6—9 月;年平均大风日数 13.5 d,最多可达 44 d,主要发生在春季。年平均气温 8.4℃, 10 积温 3 200℃,干燥度 1.8,无霜期 135 d,属典型温带半干旱区。

1 风蚀流失量的测度

风蚀流失量模型的建立必须明确风蚀流失量的测度形式,即用什么样的方式来测度风蚀流失量。测度方式取决于测度的时空尺度。如 Woodruff 和 Siddoway 提出的通用风蚀方程预测对象是田间总风蚀量,其空间尺度是某一地块,时间尺度为 1 a^[1]。他们所采用的测度形式为潜在平均年风蚀流失量。Cole 等的日风蚀流失量模型的空间尺度是某一地块,时间尺度为 1 d^[1]。风蚀流失量的空间尺度可以是点、线、某一条带,某一地块、某一区域乃至某一大陆或全球。时间尺度可以是某一时刻,某一时期,乃至历史时期和地质历史时期。各种测度形式之间又是相互联系的,可以通过数学手段来转换(表 1)。

表 1 各种风蚀流失量测度形式对比及其关系⁽¹⁾

测度对象	测度函数形式	量纲 ⁽²⁾	自变量
瞬时点风蚀流失通量	$E_t = f(x, y, z, J(t))$	$ML^{-2}T^{-1}$	时刻及空间的点
某一时段,某一地块风蚀量 ⁽¹⁾	$m = \int_0^T \int_A f \cdot dx \cdot dy \cdot dt$	M	特定的时段及地块
风蚀流失率	$E = \int_A f \cdot dx \cdot dy$	MT^{-1}	面积
面风蚀流失密度	$m = \int_0^T f \cdot dt$	ML^{-2}	时间间隔
线风蚀流失强度	$\bar{q}_x = \int_y^x f \cdot dy$	$ML^{-1}T^{-1}$	地块长度
	$\bar{q}_y = \int_x^y f \cdot dx$	$ML^{-1}T^{-1}$	地块宽度

注:(1) 测度空间为 x, y, z 坐标系;(2) M 为质量, L 为长度单位, T 为时间单位。

2 模型变量

建立风蚀流失量模型,首先必须确定模型变量,即影响土壤风蚀流失量的各种自然和人文因子。现代风蚀过程是一个自然社会复合系统过程,影响因子十分复杂,各因子之间又存在着不同程度的影响与制约关系,对整个风蚀系统发挥着不同形式的作用,并产生系统总体效应。模型变量选取的目的正是对影响风蚀流失量的各种因素进行系统分析、综合,归纳出具有代表性的因子作为模型变量。在过去多年的风蚀流失量模型研究中,由于对风蚀因子及风蚀过程的理解及其作用形式认识程度的差异,不同的研究者归纳出不同的模型变量,从而提出不同的风蚀流失量模型。Woodruff 及 Siddoway 于 1965 年建立的风蚀方程根据大量的实验研究,从 10 多个风蚀因子中归纳出土壤可蚀性指数、风蚀气候指数、糙度因子、地块长度及植物量 5 个变量^[1]。本文应用系统分析法,将某一区域的风蚀系统视为区域综合体,根据风洞模拟实验结果归纳出影响风蚀流失量的主要因子做为模型变量。

2.1 模型变量选取原则

(1) 综合性原则:综合性是地理综合体的基本特征。模型变量选取的综合性原则包括两方

面的含义: 其一, 模型变量的选取必须综合考虑风蚀系统中影响风蚀流失量的所有可能因子; 其二, 因为各种风蚀因子之间又存在着不同程度的相互影响及相互制约关系, 根据这种关系将风蚀因子进行综合, 选取具有代表性, 起主导作用的因子作为模型变量。

(2) 相对独立性原则: 虽然风蚀系统中各种风蚀因子之间是相互影响、相互制约的, 但从中所归纳出的模型变量必须具有相对独立性, 即对风蚀流失量的产生相对独立地发挥作用。只有这样, 才可依据风蚀流失量与各变量之间的关系建立综合模型。

(3) 系统性原则: 风蚀系统可以划分为若干子系统。风蚀过程是大气圈对土壤圈及岩石圈的作用过程, 并深受生物圈及人类圈的影响。据此, 风蚀系统可以划分为营力系统(大气圈), 响应系统(土壤或岩石圈)及影响系统(生物圈与人类圈)等子系统。各子系统之间具有相对独立性, 而子系统内部则存在着较大的相似性。模型变量选取的系统性原则是针对风蚀系统的上述特点而言的, 要求所选取的变量必须反映出系统的层次性。

(4) 变量最少原则: 模型变量选取的多少取决于风蚀系统的复杂程度及模型变量的综合水平。模型变量的选取要在保证充分揭示风蚀过程的前提下, 使变量数最少, 从而降低模型的复杂程度, 增加可操作性。

2.2 模型变量选取

根据上述原则, 作者选择的模型变量如表 2。本文提取的模型变量有: 风速(V), 空气相对湿度(H), 土体颗粒平均粒径(d), 土体硬度(F), 植被盖度(V_{CR}), 地表破损率(S_{DR}), 地表坡度(θ)。根据风洞模拟实验风蚀流失量(风蚀率)与各模型变量之间存在下列关系。

表 2 模型变量一览表

系 统	所属圈层	影响因子	所提取的模型变量及其意义
营力系统(A)	大气圈	风	风速 $V/(m \cdot s^{-1})$
		大气水分	空气相对湿度 $H/\%$
响应系统(R)	土壤圈或 岩石圈	土壤机械组成	土体颗粒平均粒径 d/mm
		土壤胶结状况	土体硬度 $F/(N \cdot \text{cm}^{-2})$
		土体水分	土体含水率 M , 可转换为空气相对湿度 H
影响系统(I)	生物圈或 人类圈	植物(密度、作用 区面积、排列形式)	植被盖度 $V_{CR}/\%$
		人类活动	人为地表结构破损率 S_{DR} , 单位 $/\%$
		地形(坡度及坡向)	坡度 $\theta/(^\circ)$

根据风洞模拟实验, 风蚀流失量与各模型变量之间有下列关系: (1) 风蚀流失量与风速之间存在 2 次幂函数关系, $E \propto V^2$; (2) 风蚀流失量与空气相对湿度之间存在 -8 次幂函数关系, $E \propto H^{-8}$; (3) 风蚀流失量与土体颗粒粒径(平均粒径)之间存在 -2 次幂函数关系, $E \propto d^{-2}$; (4) 根据 Gregory 和 Wilson 等的研究结果, 风蚀流失量与土体硬度成反比例关系, $E \propto 1/F^{0.1}$; (5) 风蚀流失量与植被盖度之间成指数函数关系, $E \propto K^{V_{CR}}$, 其中 K 为经验系数; (6) 风蚀流失量与人为地表结构破损率之间成 2 次幂函数关系, $E \propto S_{DR}^2$; (7) 地面坡度对风蚀的影响函数可用 3 次多项式表示。

2.3 模型变量动态分类

模型变量的动态特征系指变量随时间变化规律, 是一个相对概念。考察变量的动态特征, 必须指明特定的时间尺度, 在一定时间尺度上, 作者将那些随时间变化相对比较明显的变量称

为随机变量,而将那些相对稳定的变量称为稳定变量。就上述诸模型变量而言,若以 1 d 做为考察的时间尺度,则风速、空气相对湿度为随机变量,而其它变量,如土体硬度、土体粒度组成、植被盖度、地表结构破损率及地表坡度为稳定变量。若以 1 月做为考察时间尺度,则风速、大气相对湿度、地表结构破损率为随机变量,而其余变量为稳定变量。若以季节或年作为考察时间尺度,则风速、空气相对湿度、植被盖度、地表结构破损率可视为随机变量,而其余变量,如颗粒粒度组成、土体硬度及地面坡度可视为稳定变量。所以,分清模型变量的动态特征对研究风蚀的动态发展过程具有十分重要的意义。

3 模型建立

从方法论的角度来考察,风蚀流失量模型有物理模型、经验模型和理论模型,建模可采用归纳法和演绎法。科学的建模方法应是归纳法与演绎法的有机结合。但在目前的研究水平下,实现二者的有机结合尚存在诸多困难。迄今为止,对风蚀过程的物理机制远未认识清楚,众说纷纭。纯粹由演绎法推导出的模型虽具有极强的理论性,但往往与实际脱节太远,难于应用于复杂的风蚀流失量计算中。因此,本文避开复杂的物理机制,直接以大量的风洞实验资料得出风蚀流失量的统计模型。

3.1 建模原则

(1) 准确性:所建模型对风蚀流失量的估算力求达到最大的准确性。

(2) 实用性原则:风蚀流失量模型最终要用于实际风蚀流量的估算,估算以模型变量的实测与调查资料为基础。模型的实用性要求可以利用上述资料进行估算。

(3) 简单性原则:在保证模型准确性的前提条件下,对各种可应用的模型进行比较,采用最简单的。此原则包含两方面的含义:其一,选取简单的模型变量;其二,采用简单的表达形式。只有这样才可保证其实用性。早期的研究者们都曾提出他们自认为是最简单的模型^[9,10]。

3.2 模型假设

模型假设依赖于研究手段。本研究主要是通过风洞实验资料来建模的,所以提出下列假设条件。

(1) 风洞足以模拟风蚀过程。这是最重要的假设。只有这样才能根据风洞模拟实验将风蚀流失量与诸模型变量之间的独立关系定量地表示出来。显而易见,风洞模拟实验的面积不代表所研究对象的野外面积。另外,从时间尺度来看,由于所做风洞实验的土样规模小,又缺乏磨蚀作用,风蚀作用时间很短,仅几分钟或十几分钟,而野外则长得多,至少数小时或更长。结果,野外因变量与风洞因变量之间存在较大差异,风洞实验仅可以部分地模拟风蚀过程,模拟结果与野外实测结果存在一定差异。若假设这些差异可以通过对风洞实验模型赋予一些参数加以校正,则可认为,风洞足以模拟风蚀过程。

(2) 本文所选择的模型变量可以基本上满足建模要求和保证模型的有效性。风蚀过程是复杂的,影响因子相当之多,其对风蚀流失量的贡献各不相同,而模型变量的选取则是有限的,只能选其中主要的。假设其余次要因子可以通过模型系数的选择反映其影响作用或可以忽略,则本文所选取的变量既可满足建模要求,又可以保证精度。

(3) 各模型变量在风蚀过程中对风蚀流失量的影响作用可以认为是相对独立的事件,即模型变量之间的相互作用与其对风蚀流失量的影响作用相比很小,可以忽略不计。根据概率论原理,独立事件共同产生的总概率等于各种事件概率的乘积,各模型变量对风蚀流失量的总体作用效果就等于各模型变量作用形式之乘积。模型变量选取中的相对独立性原则保证了这一

假设的科学性。Woodruff 和 Siddoway 的风蚀方程中, 各方程变量对潜在年风蚀量的总体作用效果都以各方程变量的作用效果之乘积的形式表示。

3.3 建模过程

本研究的目标是估算风蚀流失量, 时间尺度为 1 a, 空间尺度为整个研究区。为了明确模型建立与推导过程, 首先建立了建模所采用的坐标系。模型参照坐标系统为 x, y, z 三维坐标系, x 代表东西方向距离, y 为南北方向距离, z 为高度。将风蚀过程视为三维空间函数, 并随时间变化, 即 m 实际是 x, y, z, t 四维函数, 则研究区的年风蚀流失率可视为瞬时点风蚀流失通量对时间及空间积分的平均。

$$E = \frac{1}{AT} \int_A f dA \cdot dt \quad (1)$$

式中 f 为瞬时点风蚀流失通量矢量函数, 可以认为是某一时段某一面积风蚀流失量(m) 对时间或面积的微分。

$$f = f(x, y, z, t) = \lim\left(\frac{m}{AT}\right) \quad (2)$$

或

$$f = \frac{\partial m}{\partial A} + \frac{\partial m}{\partial T} = \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{\partial m}{\partial y} + \frac{\partial m}{\partial z} \quad (3)$$

由公式(1)可知, 风蚀流量 Q 是 f 的时间及空间积分, 其量纲是相同的, 即都为质量/(面积·时间)。因此, 单从量纲分析来看, f 与 Q 是没有区别的。实际上, 二者有本质的不同, 即 Q 是时间及空间尺度的函数, 而 f 则是某一时间及空间尺度范围内的点的函数。在同一个 Q 值内可以有許多 f 值。所以, 以往的有些风蚀模型中对那些随时间变化的变量都选择单一的值进行计算是不精确的! 若将模型变量中的随机变量与稳定变量分开, 则:

$$f(x, y, z, t) = \{V(t), H(t), d(x, y, z), F(x, y, z), V_{CR}(x, y, z, t), S_{DR}(x, y, z, t), \theta(x, y, z), \dots\} \quad (4)$$

因此, f 至少是风速(V)、空气相对湿度(H)、土体颗粒平均粒径(d)、土体硬度(F)、植被盖度(V_{CR})、地表结构破坏率(S_{DR})及坡度(θ)的函数。这些变量要么空间变化明显, 要么时间变化明显, 而方程既指明了空间变化, 又包含了时间变化, 比用单一的变量定值进行估算更准确。当然, 将模型变量视为时、空变化的变量比用固定值计算复杂得多, 但这是风蚀流失量模型迈向更精确层次的必然选择。

诚如前述, 与野外实际情况相比, 风洞模拟实验的空间尺度可视为点, 时间尺度可视为瞬时, 即仅可以得出风洞瞬时点风蚀流失通量函数 f , 若将 f 转换为野外瞬时点风蚀通量函数 Q , 则可以由(1)式得出 Q 。

由模型假设条件知, 根据风洞模拟实验建立风蚀流失量模型是可行的, 但必须解决 4 个问题。第一, 通过风洞模拟实验得出风蚀流失量与各模型变量的定量关系, 进而建立综合关系式; 第二, 对比风洞实验与野外观测结果, 建立野外瞬时点风蚀流失通量与风洞风蚀流失通量的数量对比关系; 第三, 搞清研究区内模型变量的时空变化规律; 第四, 根据野外模型变量的时空变化规律, 对野外瞬时点风蚀流失通量进行时间及空间积分, 求出 Q 。其中, 第二、三由野外实地观测和调查来解决, 第四是计算技术, 对第一、二、三得出的实验或野外调查结果做数学处理。所以, 风蚀流失量建模的关键是风洞瞬时点风蚀流失通量——风洞实验函数的建立。

3.3.1 风洞实验函数(f') 根据模型变量选取, 模型假设, 综合的风蚀流失量模型可由风蚀流失量与各模型变量之关系的乘积得出。由风蚀因子的风洞实验结果可知, 风洞实验函数 f' 与 $V, H, d, F, V_{CR}, S_{DR}, \theta$ 之间存在下列关系。

$$f = K(1.0143 + 0.0441\theta + 0.0021\theta^2 - 0.0001\theta^3) [V^2(8.2 \times 10^{-5})^{V_{CR}} S_{DR}^2 Y(0.2H^8 d^2 F)] \quad (5)$$

其中 K 是经验常数, 由实验结果可以求出。根据风沙土粉碎样在不同含水率条件下的风蚀率(E) 可以确定(5) 式中的 K 值。

已知条件: $V_{CR} = 0$, $S_{DR} = 100\%$, $d = 0.1 \text{ mm}$, $\theta = 0$, $F = 0.9 \text{ N/cm}^2$, $A = 2565 \text{ cm}^2$, $H^8 = M^2$, 与野外相比, $f = E$, 则有 $K = 0.009EM^2/V^2$ 。

根据 E, M, V 可求出 K 值平均为 23.45, 所以

$$f = 117.25(1.0431 + 0.0441\theta + 0.0021\theta^2 - 0.0001\theta^3) [V^2(8.2 \times 10^{-5})^{V_{CR}} S_{DR}^2 / (H^8 d^2 F)] \quad (6)$$

3.3.2 野外瞬时点风蚀流失通量函数(f) 野外实际条件与风洞实验条件的相似问题一直是风蚀物理学中长期悬而未决问题, 从而影响风洞模拟实验结果应用于野外实践的有效性, 许多研究者试图以相似度来解决这一问题。作者认为, 若用风洞实验结果来估算野外田间风蚀流失量, 相似度并不是理想的解决办法, 因为这种物理学方法首先就涉及到风蚀的物理机制以及野外与风洞风蚀物理过程的对比。实验及野外观测研究结果表明, 风洞气流与野外实际气流性质存在着很大的差异, 即使风速相同瞬时风蚀点流失通量亦产生明显的不同。鉴于目前关于风洞气流性质及野外气流性质的对比研究极少, 从风蚀物理机制分析入手, 找出野外风蚀流失量与风洞风蚀流失量的换算关系尚存在诸多困难, 二者的数量关系应通过风洞实验及野外观测对比分析确定。根据流沙在野外风速与风洞实验风速相同条件下, 风蚀流失量的差异, 风速相同时, 风洞瞬时点风蚀流失通量是野外的 10 ~ 50 倍, 平均为 30 倍, 由(6) 式可得出, 野外瞬时点风蚀流失通量函数为:

$$f = 3.91(1.0413 + 0.0441\theta + 0.0021\theta^2 - 0.0001\theta^3) [V^2(8.2 \times 10^{-5})^{V_{CR}} \cdot S_{DR}^2 / (H^8 d^2 F)] \quad (7)$$

3.3.3 时间尺度分析 回顾已有的风蚀流失量模型可以看出, 绝大多数统计模型都建立在风洞实验资料基础上, 风蚀流失量所代表的时间尺度仅为数分或数十分钟, 本文各种实验最长者也莫过于 30 min, 但风蚀流失量模型中的流失量所代表的时间尺度至少在 1 月以上, 时间尺度差异很大。因此, 时间尺度的转换是建模必须解决的问题。Woodruff 等试图解决这一问题, 但缺乏充分的资料, 因此, 他们引入了“可蚀性”(erodibility), 即相对风蚀流失量的概念然后对不同的时间尺度乘以不同的加权系数将相对风蚀流失量换算为绝对风蚀流失量, 这只是一种半定量的处理办法。

如前所述, 模型变量可分为随机变量和稳定变量, 不同时间尺度上风蚀流失量的变化正是由变量的随机性, 即不稳定性所致。所以风蚀流失量的时间尺度若可根据随机变量时间变化规律, 应用数学方法进行转化比乘以加权系数更科学, 定量化水平更高。在时间尺度中, 由瞬时向不同尺度时段转换的基本数学方法是积分法, 即将瞬时点风蚀量函数对不同尺度的时段积分, 得出某一时间尺度上的点风蚀流失密度。

$$m = \tau F \{V(t), H(t), d(x, y, z), F(x, y, z), V_{CR}(x, y, z, t), S_{DR}(x, y, z, t), \theta(x, y, z), \} dt \quad (8)$$

3.3.4 空间尺度分析 本文风洞实验样品的风蚀面积一般仅为 0.25 m^2 左右, 这对于广大的野外地块来说, 仅可视为一个点, 因而风蚀流失量只是通量, 具有相对意义, 不能代表一个面积上的绝对风蚀流失量。点风蚀流失通量必须经过一定的数学转换才可变成空间尺度上的绝对风蚀流失量, 同样需用积分法。在坐标系中, 各种模型变量的空间变化可以分解为沿 x 轴, y 轴及 z 轴方向上的变化。在此, 我们只关心的是某一面积, 某一时段内的总风蚀量, 所以 z 轴方向上的变化是不重要的。故点风蚀流失通量(点风蚀流失密度) 对空间的积分实际上是对 x, y 轴

的积分。风蚀流失量为:

$$m = \int_{T} \int_{x} \int_{y} \{V(t), H(t), F(x, y), V_{CR}(x, y, t), S_{DR}(x, y, t), \theta(x, y), \} dx \cdot dy \cdot dt \quad (9)$$

3.3.5 风蚀流失量模型 由(9)式及以上建模过程可以得出区域风蚀流失量模型(10)。

$$Q = \int_{T} \int_{x} \int_{y} \{ 3.90(1.0413 + 0.0441\theta + 0.0021\theta^2 - 0.0001\theta^3) \cdot V^2(8.2 \times 10^{-5})^{V_{CR}} S_{DR}^2 / (H^{8d^2F}) x, y, t \} dx \cdot dy \cdot dt \quad (10)$$

其中,各变量量纲如下: Q ——风蚀流失量/ t ; V ——风速/ $(m \cdot s^{-1})$; H ——空气相对湿度%; V_{CR} ——植被盖度/%; S_{DR} ——人为地表结构破损率/%; d ——颗粒平均粒径/ mm ; F ——土体硬度/ $(N \cdot cm^{-2})$; θ ——坡度/ $(^\circ)$; x ——距参照点距离/ km ; y ——距参照点距离/ km ; z ——距参照点距离/ km ; t ——时间/ s 。

4 模型应用与讨论

应用已建立的风蚀流失量模型,根据六道沟流域各风蚀变量的调查结果可以估算该区域的风蚀流失强度。但是精确地利用上述模型需要知道各风蚀变量的时空变化函数,这在短期的研究中是难以解决的。所以,本文在六道沟流域风蚀流失量的估算中,从已建模型出发,采用了近似方法——风蚀土地类型详算法。具体方法是根据六道沟流域风蚀因子组合特征将全区划分为 161 种风蚀土地类型,根据各月的模型变量对各种风蚀土地类型各月的风蚀流失量借助计算机用模型进行计算,然后将各种风蚀土地类型的风蚀流失量相加,得出全区的风蚀流失量(表 3)。由表 3 可知:(1)六道沟流域风蚀模数为 $1887.27t/(km^{-2} \cdot a^{-1})$; (2)风蚀流失强度随时间变化十分明显,各月风蚀流失量的差别可达好几个数量级。春季风蚀最强,风蚀流失量占全年流失量的 99.98% 上,其余季节风蚀极其微弱,不能造成危害。春季风蚀又集中于 4—5 月,约占全年风蚀流失量的 99.30%。强烈的风蚀与春耕季节相吻合,所以该地区乃至整个沙漠/黄土带防风蚀的重点应放在春季。

表 3 六道沟流域风蚀流失量计算结果

月份	1	2	3	4	5	6	7
流失量/ t	0.0039	0.4687	43.6327	9068.3750	3843.8350	45.6910	0.0012
流失密度/ $(t \cdot km^{-2})$	0.000549	0.068032	6.332757	1316.16473	557.88607	6.631494	0.000179
占全年百分比/%	0.0000301	0.0036047	0.3355509	69.7390277	29.5604579	0.3513799	0.000094
月份	8	9	10	11	12	合计	
流失量/ t	0.0001667	0.0038447	0.02857	0.64192	0.61580	13003.30000	
流失密度/ $(t \cdot km^{-2})$	0.0000241	0.0005583	0.004147	0.093167	0.089376	1887.271408	
占全年百分比/%	0.0000012	0.000294	0.0002197	0.0049345	0.0047375	100	

据研究,窟野河流域的年平均侵蚀模数为 $20000 \sim 30000 t/km^2 \cdot a^{-1}$ 。若六道沟流域按 $25000 t/km^2$ 计,则在年侵蚀模数中,风蚀流失量占 7.55%,风蚀量与流水侵蚀量之比为 1:12.25。流水侵蚀多发生于夏秋季,7—9 月水蚀量占全年流水侵蚀量的 95.2%^[2]。本区,乃至整个陕北沙漠/黄土带的风蚀与水蚀互为促进。春季的风蚀使部分处于面上的松散物质沉积于沟谷中,为夏秋季的水蚀提供物源,夏秋季的水蚀破坏地表结构,形成局部破口,为次年春季风蚀发展创造了有利的条件。在类似陕北沙漠/黄土带的这种典型风、水两相侵蚀区,在控制土壤

侵蚀时必须同时兼顾两种侵蚀方式。

虽然风蚀流失量与水蚀相比在强度上相对弱得多,但其绝对数量亦相当可观,年风蚀模数按 $1\ 887.27\ \text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 计,每年平均要有 $1.25\ \text{mm}$ 左右的表土层被风吹蚀。根据 Zachar 的建议,如此的风蚀深度已近强烈风蚀的范畴,意味着由风蚀所致的土壤有机质损失量与植物吸收量相当^[3]。

六道沟所处的区域——晋陕蒙接壤区是我国重要的能源基地,是典型的风、水两相侵蚀区。脆弱的自然条件加之强度的人类活动使该区以水土流失为主的土地荒漠化问题愈演愈烈。本区的土壤风蚀量远不如流水侵蚀量大,但根据科学界的研究,已接近强烈风蚀程度。土壤风蚀具有影响范围广的特点,会引起流水侵蚀无法比拟的损害,可以造成大气污染等影响人类身心健康的环境问题。国际上兴起的 PM_{10} (大气中小于 $10\ \mu\text{m}$ 的尘埃) 研究证明,这种物质可促成支气管痰、肺痰等慢性疾病。每年在全球范围内由土壤风蚀所产生的 PM_{10} 之量相当惊人。有鉴于此,建议当加强该区域的土壤风蚀研究。

* 本项研究承蒙中国科学院水利部水土保持研究所唐克丽研究员的指导。野外工作得到陈渭南研究员、张平仓副研究员、侯庆春副研究员以及王文龙、张晓卫、郭东卫等的协助。论文初稿曾经董光荣研究员审阅,并提出宝贵修改意见。特此致谢!

参 考 文 献

- 1 Woodruff, N P Siddoway F H. A wind erosion equation. Soil Science Society of America Proceedings, 1965, 29: 602—608
- 2 Pasak V. Wind Erosion on Soils VUM, Zbraslaav, Scientific Monographs 3. 1973
- 3 Gregory J M, Borrelli J, Fedler C B. TEAM: Texas erosion analysis model, in: Proceedings of the 1988 Wind Erosion Conference, April 11—13, 1988, 88—103 Texas Tech University, Lubbock, Texas
- 4 Shao Y, Raupach M R, Leys J F. A Model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34: 309—324
- 5 Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet the user's needs. Journal of Soil and Water Conservation. 1991, 46: 106—111
- 6 Fryrear D W. Modeling wind erosion. Wind Erosion in Africa and West Asia: Problems and Control Strategies. Proceedings of the Expert Group Meeting 22—25 April 1997. Cairo, Egypt. 1998, 143—153
- 7 Cole G W. Some wind erosion process measures. Transactions of the ASAE, 1985, 28(4): 1108—1114, 1123.
- 8 Gregory, J M, Wilson R G, Singh U B. Wind erosion: Detachment and maximum transport rate, written for presentation at the 1993 International Summer Meeting Sponsored by ASAE and CSAE No 932050. 1993
- 9 Bagnold R A. The physics of Blown Sand and Desert Dunes. William Marrow and Co., New York, New York, 1941
- 10 Chepil W S. Wind erodibility of formlands. Journal of Soil and Water Conservation. 1959, 14(5): 214—219.
- 11 陈永宗,等.黄土高原现代侵蚀与治理.北京:科学出版社,1998
- 12 甘枝茂.晋陕蒙接壤区土壤侵蚀方式及其特色.黄土高原地区综合治理开发研究论文集.北京:中国环境科学出版社,1993,104—109
- 13 Zachar D. Soil Erosion, Development in Soil Science. Elsevier Scientific Publishing Company. 1982