

# 国外评价土壤侵蚀与土壤生产力关系的模式

李忠魁

(中国科学院西北水土保持研究所)

## 提 要

土壤侵蚀减少了植物可利用的有效水分, 损失了土壤的营养物质, 破坏了土壤肥力结构, 影响农业耕作制度, 从而严重地降低了土壤生产力。

土壤侵蚀与土壤生产力关系的模式 (EPIC), 系统地定量地表达了土壤侵蚀与土壤生产力的相互关系。这个模式包括水文、气象、水蚀和风蚀、氮磷元素、土壤温度、作物生长状况、耕作与作物残茬的处理方法、经济因子和土壤排灌与施肥等 9 个因子, 共 36 个方程。

为了保护和提高土壤生产力, 我国需要发展这项研究工作, 制定具有中国特色的土壤侵蚀与土壤生产力关系的模式。

研究土壤侵蚀与土壤生产力关系问题的困难, 在于很难检测出土壤侵蚀对土壤生产力的影响, 或者说很难检测出土壤生产力的降低。其主要原因有二: 一是侵蚀作用使土壤生产力降低的速度很慢, 只有当土壤长期不适于种植作物时, 才能认识到土壤生产力的退化; 另一点是农业工艺的改进, 掩盖了土壤侵蚀使土壤生产力降低的作用。例如, 对某些受侵蚀的土壤经过合理施肥后, 使作物产量保持稳定或有所提高, 就有可能掩盖土壤侵蚀降低了土壤生产力的作用。

土壤侵蚀影响土壤生产力的另一个特点, 就是受到严重侵蚀的土壤恢复生产力的困难大, 代价高。这是因为底土的条件常常抑制作物生长, 其中包括通气性不良、有机质含量低、交换性养分或可溶性养分以及碳酸钙缺乏、可溶性铅含量高和砂砾比重大等因素的影响。虽然增加有机质和肥料可以部分恢复生产力, 但是这些补救措施不可能是经济实惠的。例如, 恢复受到土壤侵蚀的牧区就很困难, 因为在少雨地区施肥一般是没有经济效益的。

## 一、土壤侵蚀与土壤生产力关系计算模式

为了判定土壤侵蚀与土壤生产力的关系, 美国农业部有关人员建立了土壤侵蚀与土壤生产力关系计算模式 (Erosion—Productivity Impact Calculators, 以下简称 EPIC 模式),

简要地说, EPIC 模式是输入一些田间自然因子, 用它来模拟土壤侵蚀、植物生长及有关过程。该模式也用于估测侵蚀的损失价值, 并决定最佳管理策略的经济因子。

EPIC 模式所涉及到的因子有气象、水文, 侵蚀与淤积、养分循环、植物生长、耕作、土壤温度、经济因子和植物环境控制。

1、模拟气象因素时, 首先要输入气象资料, 输入的途径有 4 种可供选择。前 3 种方法与降雨量、气温和太阳辐射有关, 这 3 个变量可以译入程序; 或把降雨量译入而只模拟温度和太阳辐射, 也可以模拟这 3 个变量。降雪量被看作是降雨量和气温的函数。第 4 种方法是在风蚀的地方

用风蚀模式模拟风速和风向，逐日预报风蚀。

2、水文要素可以模拟总蒸发量、渗透作用、地表径流和潜流。它可以通过根系层为精确的养分循环与径流预报，比较恰当地描述土壤水的分布状况，并且保持水分平衡。

3、侵蚀与淤积要素。输入的降雨量与径流量可以影响个别的径流活动，它可以模拟汇流冲刷和淤积时雨水分离土粒，再现径流中的泥沙颗粒、高地与河槽中的土壤。除泥沙量外，该要素还能够计算土壤粒径的大小分布情况，所以能够用于模拟养分输送。

4、养分循环要素能够处理氮和磷在可溶性与吸收性时的情况。氮的平衡要素包括淋溶、径流损失、作物残落物、挥发作用、反硝化作用、稳定性、矿化作用、硝化作用、作物情况、雨量影响和肥料；磷的平衡包括径流损失、作物残落物、作物情况、肥料、对植物的有效性、吸附作用与解吸作用。养分要素还可模拟影响养分输送的过程，诸如泥沙淤积与磷的吸附、解析作用。

5、一般植物生长模式能够模拟一年生和多年生作物地上部分的生长量、产量和根系生长过程，例如玉米、谷类，高粱、小麦、大麦、燕麦、花生、向日葵、大豆、紫花苜蓿和牧草等。

这些植物生长模式模拟能量交叉、能量向根的转化、地上部生长量、谷类和纤维生产、水和养分的向上移动。

6、耕作要素能够模拟出耕作对土壤性质的影响，这些不同的土壤性质影响水文、侵蚀—淤积和作物的种植情况。它恰当地表示出肥料和作物残落物在耕作层的分布情况；还能模拟垄高、地表糙度、容重变化、残余物的长期转变、土层混合、耕作活动对养分和植物残茬的影响。

7、土壤温度的模拟适用于该模式中营养元素循环和根系生长两个要素。有人预算，每一土层中心区域的温度是先前土温而现在气温与太阳辐射的函数。

8、EPIC模式的经济因子，利用农作预算作物生产成本。收入项决定于模拟的作物年产量，纯利润（收入减去成本）受土壤侵蚀状况的制约。

9、植物环境控制要素为灌水，施用肥料、石灰、杀虫剂和模拟排水系统提供了方法。

## 二、模式分量的确定

虽然EPIC模式的综合能力很强，但它是针对土壤侵蚀与土壤生产力问题而建立的。因此，在设计模式时，应考虑计算效率和使用方便。EPIC模式以一天为时距，因此，在一台 AMPAHL 470 型计算机上模拟一年的情况，计算机运算一昼夜的费用只有15美分。再者，储藏系统只需要280K，所以，这个模式可以在多种计算机上应用。

EPIC模式用于模拟以下要素：

### （一）水文

#### 1、地表径流

（1）径流量。利用美国农业部土壤保持局（SCS,1972年）的径流曲线方程，可以预测日降雨量下的地表径流量：

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{R + 0.8s} \dots\dots\dots (1)$$

式中：Q—日径流量；R—日降雨量；s—持水参数，它与土壤含水量有关，在0与1之间变化。

（2）洪峰流量。根据威廉斯等人1983年的修改推理公式，可以预测洪峰流量：

$$q_p = \frac{(\alpha)(Q)(A)}{360(t_c)} \dots\dots\dots (2)$$

式中： $q_p$ —洪峰流量，以立方米/秒表示； $\alpha$ —一个无量纲的系数，表示在流域集流时间以内的降雨量占总降雨量的比例； $t_c$ —集流时间，由地表径流和沟道径流集流时间相加而估算出，以小时为单位； $Q$ —径流量，以毫米表示； $A$ —集水区面积，单位是公顷。

2、渗透。EPIC模式的渗透部分，是使用储藏程序技术同裂隙水流模式相结合的方法，来预测根系周围穿过每一土层的水流（威廉斯等，1983）。渗透量用下式计算：

$$O_i = SW_{oi} (1 - \exp(-\Delta t/TT_i)) \dots \dots \dots (3)$$

式中： $O_i$ —穿过第*i*层的水流渗透率（毫米/秒）； $SW_{oi}$ 是日初始的土壤含水量（毫米）； $\Delta t$ —水分的移动间隔时间（24小时）； $TT$ —下渗历时（小时）。水力传导度（毫米/秒）、土壤含水量和土壤温度等都会影响水分渗透率。

3、亚表层横向水流。亚表层横向水流和渗透同时计算（威廉斯等，1983），每个4毫米的小组都有机会首先渗透，其余的受到横向水流函数的支配。因此，在渗透以后，当任一土层的储水量超过田间持水量时，都有可能发生横向水流。横向水流函数（同式（3）相似）以下式表示：

$$QR_i = (SW_i - FC_i)(1 - \exp(-\Delta t/TT_{ri})) \dots \dots \dots (4)$$

式中： $QR_i$ —第*i*个土层的横向水流速率（毫米/天）； $FC$ —第*i*层的田间持水量； $TT_{ri}$ —横向水流移动时间（亚表层水流移动一段等于地面坡长 $\lambda$ 所需的时间，以天为单位）。

估算每一土层横向水流移动时间时，可以采用最近建立的方程：

$$TT_{ri} = \frac{1000CLA}{CLA + \exp(10.047 - 0.148CLA)}$$

式中： $CLA$ 是土层中的粘土百分率含量。

4、蒸散发。EPIC模式的蒸散发因子是利奇（Ritchie，1972）的ET模式。为了计算蒸发势，该模式应用下述方程：

$$E_o = 1.28 \left( \frac{(RA)(1 - AB)}{58.3} \right) \left( \frac{\delta}{\delta + 0.68} \right) \dots \dots \dots (5)$$

式中： $E_o$ —潜在蒸发速率（毫米/天）； $RA$ —太阳日辐射量，单位兰勒（ly，即lanley，1兰勒 = 1卡/平方厘米）； $AB$ —反射率； $\delta$ —平均气温条件下饱和气压曲线的斜率。土壤、作物和雪被的反射率是估算的。如果覆雪厚度为5毫米或有较大的含水量，那么反射率就可确定为0.8；假若覆雪厚度不到5毫米，且没有种植作物，则土壤反射率可取得适宜值。当种有作物时，反射率由下式确定：

$$AB = 0.23(1 - EA) + (AB_s)(EA)$$

式中： $AB_s$ —土壤反射率；0.23—植物反射率； $EA$ —土壤覆盖指数，在0到1.0之间变化。

该模式用于计算土壤和植物的蒸发和蒸腾。实际土壤蒸发是按二个阶段计算的：第一阶段，土壤蒸发只受到地表可获得的能量的限制，为土壤蒸发能力；第二阶段，土壤蒸发用时间的平方根函数预测。

植物蒸腾以叶面积指数（LAI）的线性函数来计算，蒸腾势 $E_o$ 接近于叶面积指数3。超过LAI = 3后，植物的蒸腾都等于蒸腾势 $E_o$ 。如果土壤水分有限，则植物蒸腾就会减少。

5、融雪。EPIC模式的融雪因子同CREAMS模式（Knisel，1980）的该部分相似。在有雪时，如果日最高温度超过0℃，雪便融化：

$$SML = 4.57T_{max}, SML < SNO \dots \dots \dots (6)$$

SML = SNO.

式中：SML—融雪速率（毫米/天）； $T_{max}$ —日最高温度（℃）；SNO是融雪前雪的含水量（毫米）。估算径流和渗透量时，同样把融雪当作降雨来处理。

（二）气象。使用EPIC模式时所需要的气象要素是降雨量、气温、太阳辐射和风。如果易于获得日降雨量、气温和太阳辐射的资料，那么就可以直接应用EPIC模式。

1、降雨量。尼克斯（Nicks, 1974）提出的降雨EPIC模式，是一个一次马尔可夫（Markov）连状模式。因此，在逐月输入（a）以前降过雨和（b）以前没有雨两种情况所得的降雨概率时，必须提供模式。在给定初始干湿条件下，这个模式可以随机确定是否将有降雨发生。

当出现降雨条件时，日降雨量的非对称正态分布便确定了降雨量。描述每月降雨非对称正态分布所需输入的资料是均值、标准差和日降雨的扭曲系数。用日平均气温把日降雨总量划分为降雨和降雪；就是说，如果日平均气温小于或等于0℃，则这种降雨就是降雪，否则便是降雨。

2、气温与太阳辐射。因为里查森（Richardson, 1981）提出的模式，可以模拟温度和太阳辐射，特别是后者相互间和降雨量之间表现出良好的相关性，所以EPIC模式选用了它。日最高和最低温度以及太阳辐射的偏差是多元正态分布造成的。我们必须输入每个变量的均值和偏差系数。由于大多数变量受到降雨的影响，因此各个平均值和偏差系数必须按照雨天和晴天分别输入。

所采用的多元形成模式意味着最高温度、最低温度和太阳辐射的偏差呈正态分布，还蕴涵每个变量的连续相关可以由一次的线性自动回归模式来描述。里查森对多元形成模式（multivariate generation model）作过详细叙述，他在1982年还描述过日最高温度、最低温度和太阳辐射的互相依存结构。

3、风。里查森（1982年）建立了风的模拟模式，用来和EPIC模式一起模拟风蚀。研究风蚀要考虑的二个因子是日平均风速和一天中的风向，日平均风速可以由无量纲形式的双参数 $\gamma$ 分布求得：

$$U = \left( \frac{V}{V_p} \right)^{\eta - 1} \exp(\eta - 1) \left( 1 - \frac{V}{V_p} \right) \dots \dots \dots (7)$$

式中：U—一个无量纲的变量（0—1），表示风速V（米/秒）的频率； $V_p$ —出现频率最高的风速， $\eta$ 是 $\gamma$ 分布的形状参数。该形状参数由下式计算：

$$\eta = \frac{\overline{V}^2}{SDV^2}$$

式中： $\overline{V}$ 是年平均风速（米/秒）；SDV是日风速的标准偏差（米/秒）。

### （三）土壤侵蚀

#### 1、水蚀：

（1）降雨。EPIC模式的水蚀因子，采用了奥斯塔得（onstad）和福斯特（Foster, 1975）所提出的USLE（通用土壤流失方程）修正式。奥斯塔得和福斯特方程的能量因子包括降雨和径流两个变量，而USLE的能量因子只包括降雨一个变量。奥斯塔得一福斯特方程为：

$$Y = (0.646EI + 0.45(Q)(q_p)^{0.333})(K)(CE)(PE)(LS),$$
$$Q > 0 \dots \dots \dots (8)$$

$$Y = 0, Q \leq 0$$

式中：Y—产沙量（吨/公顷）；EI—降雨能量因子，以米制为单位；Q—径流量（毫米）； $q_p$ —最大径流速率（毫米/小时）；K—土壤可蚀性因子；CE—作物管理因子；PE—控制侵蚀的措施因子；LS—坡长和坡度因子。K值取决于土壤类型，在开始模拟之前就应当确定；同样，PE值可以通过考虑所采用的土壤保持措施而定。LS值由下式计算

$$LS = \left( \frac{\lambda}{22.1} \right)^\xi (65.41S^2 + 4.56S + 0.065)$$

式中：S—地表坡度（米/米）； $\lambda$ —坡长（米）； $\xi$ —一个依赖于坡度的参数。

利用方程

$$CE = (0.8 - CE_{mn,j}) \exp(-0.00115CV) + CE_{mn,j}$$

可以估算所有产流日的作物管理因子，式中： $CE_{mn,j}$ —作物j的作物管理因子的最小值；CV—地上生物量和作物残茬总量（公斤/公顷）。

水文学模式提供了估价Q和 $q_p$ 的可能性。为了估算缺乏降雨时间过程的日降雨能量，假定了降雨速率呈指数分布。指数分布为计算日降雨能量（威廉斯等，1983）提供了代替和综合USLE能量方程的便利条件。

$$EI = R(12.1 + 8.9(\log \gamma_p - 0.434))(\gamma_{0.5})/1000$$

式中：R—日降雨总量（毫米）； $\gamma_p$ —最大降雨强度（毫米/小时）； $\gamma_{0.5}$ —最大30分钟降雨强度。

(2) 灌溉。垄沟中灌溉水引起的侵蚀，是用通用土壤流失方程的修正式(Modified Universal Soil Loss Equation, 简称MUSLE)估算。

$$Y = 11.8(Q \cdot q_p)^{0.58}(K)(CE)(PE)(LS) \dots \dots \dots (9)$$

式中：CE—作物管理因子，其值为0.5。用下式估算径流量：

$$Q = (EIR)(AIR)$$

式中：AIR—灌水量（毫米），EIR—径流系数。假定水深是垄高的3/4，垄沟的横截面为三角形，然后就可用曼宁(Manning)公式估算每个垄沟的最大流量。如果把水浇在没有垄沟的平地上时，田间最大单宽流量取做0.00189立方米/秒。

2、风蚀。库勒(Cole)等人在1982年修正了门哈腾(Manhattan)和卡恩萨斯(Kansas)风蚀方程，并把它用于EPIC模式。原风蚀方程的形式是：

$$WE = f(I, WC, WK, WL, VE) \dots \dots \dots (10)$$

式中：WE—风蚀量（吨/公顷）；I—土壤可蚀性指标（吨/公顷）；WC—气象因子；WK—土垄的糙率因子；WL—沿主风向的田间长度(米)；VE—植被覆盖量，代表小粒谷类作物（公斤/公顷）。方程(10)是用来预报年平均风蚀量的，对这一模式的主要改动是把预报年侵蚀量转换为预报日侵蚀量，以便同EPIC相连系；I和WC这两个变量对一年的每一天都保持不变。但其它变量则随每天的具体情况不同而不同。土垄糙率因子是垄高和垄距的函数，考察土地面积大小、方位和风向就能计算出沿主风方向的地面长度。如下式所示：

$$WL = \frac{(FL)(FW)}{FL \left| \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta - \phi\right) \right| + FW \left| \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta - \phi\right) \right|}$$

式中：FL—田面长度（米）；FW—田面宽度（米）； $\theta$ —从北极方向顺时针旋转的风向角（弧度）； $\phi$ —田间长度方向和北极方向间的顺时针夹角（弧度）。植被覆盖因子是逐日模拟的，

并且做为直立生长的活体生物量，直立残茬和匍匐作物残茬的函数； $VE = 0.2533(g_1 B_{AG} + g_2 SR + g_3 FR)^{1.363}$

式中： $g_1, g_2, g_3$ —某种作物的系数； $B_{AG}$ —正在生长的作物地上生物量（公斤/公顷）； $SR$ —前期作物的直立残茬（公斤/公顷）； $FR$ —匍匐残茬（公斤/公顷）。

#### (四) 养分

##### 1、氮

(1) 地表径流损失的硝酸盐。只要考虑表土层（厚度为10毫米），就可估算径流中的 $NO_3-N$ 数量。用指数分布可以比较满意地模拟出通过某个土层的水流所减小的 $NO_3-N$ 浓度。对给出 $NO_3-N$ 产量的指数函数求积分，并用留在土层中的水量去除，便可得到一天中的 $NO_3-N$ 平均含量。

$$VNO_3 = WNO_3(1 - \exp(-QT/UL)) \dots \dots \dots (11)$$

$$CNO_3 = \frac{VNO_3}{QT}$$

式中： $WNO_3$ —一天开始时土层中所含的 $NO_3-N$ 的重量； $QT$ —第一层丢失的总水量（ $Q + Q + QR$ ）； $UL$ —该层中储水量的上限； $VNO_3$ —从第一层损失的 $NO_3-N$ 总量； $CNO_3$ —第一层的 $NO_3-N$ 的浓度。径流、横向水流和渗透水中所含的 $NO_3-N$ 数量被看作是本式得出的水的体积和浓度的乘积。

(2)  $NO_3-N$ 的淋溶。除不考虑地表径流以外，深层的淋溶和横向亚表层的水流，用研究表层的同一方法处理。

(3) 土壤蒸发引起的 $NO_3-N$ 的转运。当水从土壤蒸发时，质流挟带 $NO_3-N$ 向上移动，到达土壤顶层。估算这种方式的 $NO_3-N$ 移动的方程是：

$$ENO_3 = \sum_{j=2}^M (Es)_j (CNO_3)_j \dots \dots \dots (12)$$

式中： $ENO_3$ —由于土壤蒸发的影响，从深层土移向顶层土中的 $NO_3-N$ 总量，脚注  $j$  指土层； $M$ —土壤蒸发的土层数。

(4) 泥沙转运的有机氮。马克洛利 (McElroy) 等人在1976年建立的负荷函数，经过威廉斯和哈恩在1978年修改后，用来估算单次径流事件中有机氮的损失量，负荷方程是：

$$YON = 0.001 (Y)(CON)(ER) \dots \dots \dots (13)$$

式中： $YON$ —径流中损失的有机氮（公斤/公顷）； $CON$ —表土层的有机氮含量（克/吨）； $Y$ —产沙量（吨/公顷）； $ER$ —富集率。估算富集率的对数方程是：

$$ER = x_1 C_s^{x_2}$$

式中： $C_s$ —泥沙浓度（克/立方米）； $x_1$ 和 $x_2$ —由上、下限确定的参数。

(5) 脱氮作用。作为一个微生物活动过程，脱氮作用是温度和含水量的一个函数。用于估算脱氮速率的方程是：

$$DN_j = WNO_{3j} (1 - \exp(CDN)(TF_{Nj})(C_j)) , SWF_j \geq 0.9 \dots \dots \dots (14)$$

$$DN_j = 0 , \quad SWF_j < 0.9$$

式中： $DN_j$ —第  $j$  层的脱氮速率（公斤/公顷·天）； $CDN$ —脱氮常数（ $\sim -0.035$ ）；

TF<sub>N</sub>—养分温度因子；SWF—土壤水分因子；C—有机碳百分含量。

(6) 矿化作用。氮矿化模式是帕普兰矿化模式的一个变形。该模式考虑两个矿化来源：一是与作物残茬和微生物量有关的新鲜有机氮；二是与土壤腐殖层有关的稳定态有机氮。新鲜有机氮层中的矿化作用用下式计算：

$$RMN = (DCR)(FON) \dots\dots\dots (15)$$

式中：RMN—新鲜有机氮的氮矿化速率（公斤/公顷·天）；DCR—新鲜有机氮的分解率系数；FON—现有的新鲜有机氮数量（公斤/公顷）。分解率系数是C：N比、C：P比、作物残茬组成以及温度和土壤水分的函数。

$$DCR = (CNP)(RC)(SWF)(TF_N)$$

式中：CNP—C：N比和C：P比的因子；RC—残茬组成因子，其值由残茬分解阶段来确定。每个土层的稳定态有机氮层的矿化作用用下式估算：

$$HMN = (CMN)(SWF)(TF_N)(ON)(BD)^2 / (BDP)^2 \dots\dots\dots (16)$$

式中：HMN—腐殖质层的矿化速率（公斤/公顷·天）；CMN—稳定矿化速率系数（~0.0003）；ON—土层中的有机氮数量（公斤/公顷）；BD—确定的土壤容重；BDP—受耕作扰动的土壤容重。  
(待续)

## THE MODELS OF EVALUATING THE RELATIONSHIP BETWEEN SOIL EROSION AND SOIL PRODUCTIVITY ABROAD

Li Zhongkui

*Northwest Institute of Soil and Water Conservation,  
Academia Sinica*

### ABSTRACT

Soil erosion reduces the effective water available to plant, and loses the soil nutrient material with the soil fertility structure destroyed, effecting the farm tillage system. So, the soil productivity is cut down to a great extent.

Erosion-Productivity Impact Calculators (EPIC) quantify the relationship systematically between soil erosion and soil productivity. The models involve 9 factors, that is, hydrology, meteorology, water erosion and wind erosion, the state of nitrogen and phosphorus, soil temperature, crop growth, tillage and treatment of crop residue, economic factors, and irrigation-drainage of soil as well as fertilization, etc. They are expressed with 36 equations.

To protect and raise the soil productivity, we should develop and enhance this research in order to formulate EPIC with distinguishing chinese feature.