

* 收稿日期: 1999-04-15

chmier, Smith, 1978) 及其修正模型 RUSLE 等则属于这种类型。以径流和固体径流形成为基础所构建的理论实验模型更具有发展前景(Мирцху ჯვა, 1970; Foster, 1982; Куценцев, 1981; Nearing et al., 1989)。理论实验模型不受因自然地理条件对其应用的限制, 而成为土壤流失公式的基础。公式的基本自变量水流在斜面上速度为给定土壤的临界速度之比(Мирцху ჯვა, 1970; Куценцев, 1981), 或者是水流的切向应力和临界切向应力(Foster, 1982; Nearing et al., 1989)。因为水流速度和切向应力相互紧密联系, 因此研究水蚀理论模型的上述两种途径没有原则性的区别。

2 水流的临界速度和临界切向应力分析

Мирцху ჯვა 的公式中, 水流的临界速度采用的是“非冲刷”速度, 即在这一速度下土粒不发生移动的最大速度。对于非黏结土(如石块和砂土), 可以目视而测定。而黏结性土壤, 则用另一种临界速度——冲刷速度(V_p)来表示, 也可目视确定。非冲刷速度(V_H)为: $V_H = V_p / 1.41$ 。

黏结性土壤在初始冲刷的速度作用下, “开始连续的、不间断的颗粒(细粒和团粒)的分离, 引起土粒破坏”(Мирцху ჯვა, 1970)。对于稳定性低的土壤和低黏结性土“非冲刷速度”的概念一般没有物理意义。因为在任何情况下, 甚至在最小的水流速度下, 由于膨胀时主要发生与大块土失去联系, 细粒的移动仍然可以被观察到。因此, 冲刷速度理解为, 从水流的临界速度开始, 土壤冲刷的最小流速, 它以该流速对水蚀强度的二阶导数随流速的增加而得到。

图 1a 表示土壤侵蚀强度(q)对流速(V)的关系。从图看出, 侵蚀强度随着流速的增加而增大, 但不均等。从图 1a 难以求出冲刷速度的位置。如果将水蚀强度(q_v)的一阶导数对流速(V)作图, 则是另一种情形(见图 1b)。若再以侵蚀强度(q_v)的二阶导数作纵坐标, 则该曲线具有最低点或者水平直线向凹形转折的拐点(图 1c)。

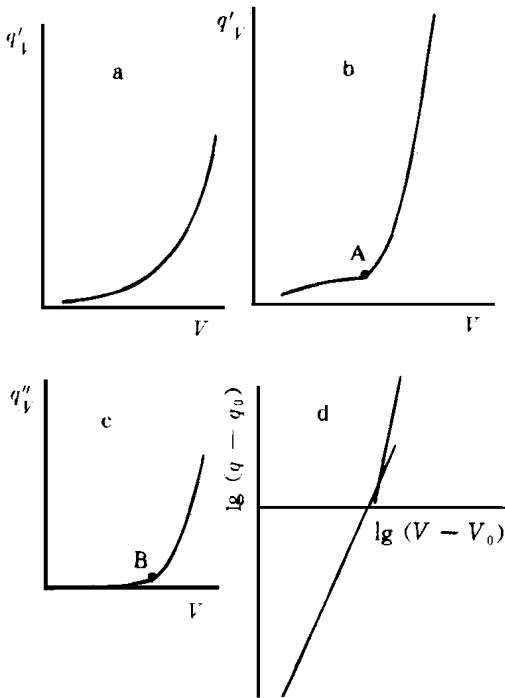
图 1a 曲线表达式 $q - q_0 = \alpha(V - V_0)^n$ (1)

图 1b 曲线表达式 $q_v = \alpha n(V - V_0)^{n-1}$ (2)

图 1b 曲线表达式 $q = \alpha(n-1)(V - V_0)^{n-2}$ (3)
式中: q ——侵蚀强度; q_0 ——初始侵蚀强度; α ——经验系数; V ——水流速度; V_0 ——初流速; n ——幂函数经验指数。

不难看出, 图 1b 的曲线左(水平或下降)部分在 $n = 2$ 时符合公式(3), 而右(上升部分)在 $n > 2$ 时符合公式(3)。故在图 1a 和图 1b 中, A 点和 B 点的纵坐标与测定的冲刷速度(V_p)相吻合。

水流冲刷速度的确定方法是, 求出函数曲线图中小于或等于 2 次幂函数图向同类型的更大



a 普通坐标: 水蚀强度(q)对流速(V)坐标
b 水蚀强度(q)的一阶导数对流速(V)坐标
c 水蚀强度(q)的二阶导数对流速(V)坐标
d 对数坐标: 坐标 $\lg(q - q_0) \sim \lg(V - V_0)$
图 1 侵蚀强度(q)与平均流速(V)的关系曲线

一级幂函数的转折点(图 1b)。在对数坐标中,以 $\lg(q - q_0)$ 对 $\lg(V - V_0)$ 的形式作图(图 1d)。直线转折点的横坐标等于 $\lg(V_P - V_0)$, 因此很容易求出冲刷速度值。图 2 和图 3 给出的实例, 求出冲刷速度。图 2 是普通坐标中 q 和 v 的关系, 图 3 是对数坐标的情况。要测定水流冲刷速度, 需要一定的设备, 操作时间长, 必须要有水流速度和土壤特性关系的理论方程式。对于无黏着力的砂土, 其公式为:

$$V_{\rho} = B \sqrt{\frac{g(\rho - \rho_0)}{d_0}} \quad (4)$$

式中: V_{ρ} ——底部冲刷速度, 即粗糙底部表面的冲刷速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); B ——经验系数; g ——自由落体加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); ρ, ρ_0 ——砂和水的密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); d ——颗粒的平场直径 (m)。

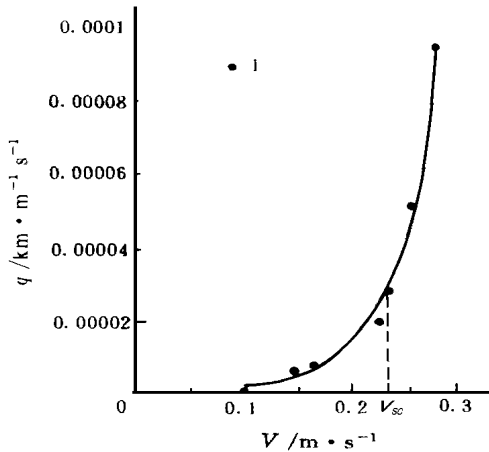


图 2 侵蚀强度和平均流速的关系径流深度 20 mm, 普通黑钙土团粒 2~3 mm

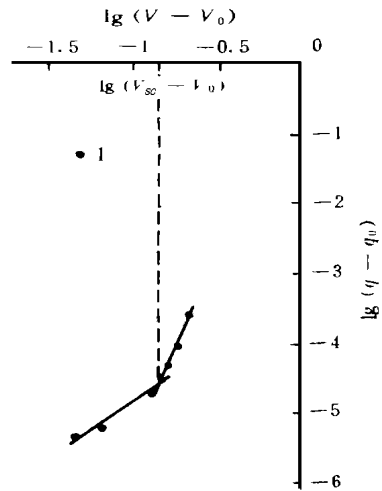


图 3 侵蚀强度与平均流速的关系(对数坐标)普通黑钙土团粒 2~3mm, 径流深 20 mm

具黏着力的土壤与砂有区别, 有团粒内的黏结和团粒间的黏结。团粒内的黏结表现为土壤结构对水的稳定性上, 而团粒间的黏结发生在土快间相互接触处。黏结不仅由于颗粒的相互引力, 而且还有胶结物质和植物根系的作用。土壤常常是团粒内部及团粒间的粘结力的同时作用, 因而水流对土壤临界速度的公式应包括考虑其影响的自变量。库兹勒佐夫 (Куцнецов, 1981) 曾提出了水流对土壤的冲刷速度公式:

$$V_{\rho} = 1.55 \sqrt{\frac{gm_1m_2}{\rho_{0n}}} \left[1 - \frac{P}{100} d_w (\rho - \rho_0) + 12.5kIC_w \right] \quad (5)$$

式中: V_{ρ} ——土壤初始湿度 (W) 时水流底部的冲刷速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); g ——自由落体加速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); m_1 ——由泥沙或土壤类型决定的系数; m_2 ——直径小于 1 mm 根量所决定的系数; ρ, ρ_0 ——各为水、土固相的密度 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); n ——水流速度波动特性参数, 与流速和雨滴特性有关; d_w ——按 Саввинов 法, 水稳性团粒的平均加权直径 (m); P ——土壤团粒的孔隙度 (%); I ——决定土壤密度 (ρ_w) 的系数; K ——土壤黏粒的均匀系数; C_w ——土壤初始湿度 (w) 下, 快速达到饱和持水量后土壤黏结度 (Цычович 法) ($\text{t} \cdot \text{m}^{-2}$); $K = 1 - t\sigma/C_w$; t ——Стюдента 标准的值; σ ——平均方差。

该式的基本自变量是土壤结构的水稳性(d_w)、黏结度(C_w)、土壤密度(P_v)和植物的根量。雨滴的作用大大地降低了冲刷速度, 增大了侵蚀强度。图 4 中第一条曲线是无雨滴时 20 cm 深水流的侵蚀($V_{\rho 1}=0.144\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 第三条曲线是喷水的情况($V_{\rho 3}=0.095\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。在相同水流速度下, 土壤侵蚀在雨滴时为 12 cm/s, 比无雨滴水流深度 20 mm 时高 37 倍, 比水流深度

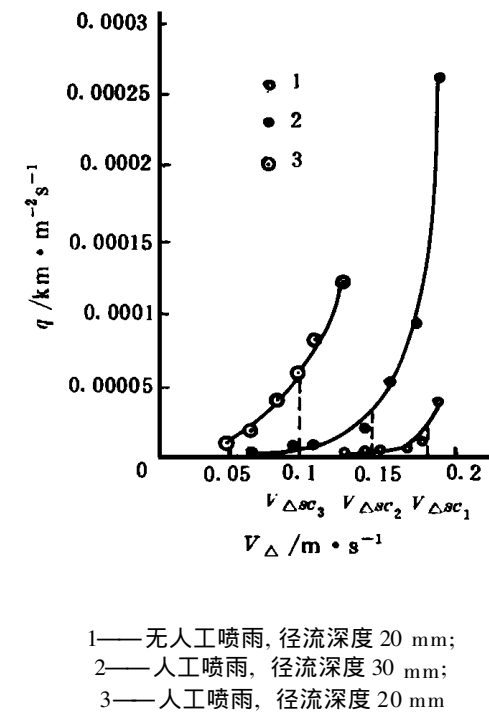


图 4 侵蚀强度(q)和底部平均流速(V_{ρ})的关系
径流深度为 20 mm, 普通黑钙土团粒的 2~3 mm

30 mm 高 4 倍多。公式(5)中雨滴打击作用参数 n , 按库兹勒佐夫的方法(Куцнецов 等, 1990) 计算。在侵蚀过程中, 植物的地上部分起了重要的作用。植物覆盖保护土壤免受雨滴打击, 增加了土壤的渗透性, 和地表的粗糙度, 降低坡面流速。作物对土壤抗侵蚀稳定性最大的正影响是生长最快的时期, 在俄罗斯是夏末至秋初。接近这一阶段, 土壤被压实, 表 1 提供了在无雨滴时径流作用下重亚黏土的最大冲刷速度。对于轻亚黏土和中亚黏土应乘以修正系数 0.94。田间降雨时径流对土壤的冲刷速度值将会降低。转化为实际的冲刷速度, 应该乘以相应的降低参数(表 2)。这个参数与土壤肥力有关, 在生长期呈规律变化。裸露的耕地表面(绝对休闲地), 土壤疏松无杂草, 其系数为常数。多年生牧草 5 月已完全生长, 变化也很少, 在割草时, 覆盖度有变化, 其参数周期性地降低。对其它作物, 从 5 月到收获, 其系数逐渐增大, 最后急剧减少。在设计抗侵蚀措施中, 直接采用冲刷速度, 这些措施以完全排水为基础, 以保护土壤免受灌溉侵蚀。设计水流的允许速度(V_{gen})应低于冲刷速度(V_P)的 25% :
$$V_{gen} = 0.8 V_P。$$

表 1 无雨滴作用下, 径流土壤的冲刷速度

土 壤	农地及作物			
	绝对休闲地和中耕作物(疏松的土壤)	连续播种春播作物	利用一年的冬季作物和草本	利用二年或二年以上的多年生草本
冰碛亚黏土上的生草灰化土	0.19	0.27	0.30	
黄土性亚黏土上的生草灰化土	0.16	0.22	0.26	
灰色森林土	0.17	0.24	0.27	
典型黑钙土	0.19	0.27	0.30	0.30
普通黑钙土	0.19	0.27	0.30	0.70
栗钙土	0.17	0.24	0.27	
普通栗钙土	0.15	0.21	0.24	

此外, 临界冲刷速度是侵蚀理论模型(例如, И. Е. Мирцхулава 的水蚀模型) 和库兹勒佐夫土壤灌溉侵蚀模型(Куцнецов, 1981) 的必要因素。在其它理论模型(WEPP, EUROSEM) 中, 土壤侵蚀稳定性的指标不是最大速度, 而是最大切向应力。根据底部速度(V , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 很容易计算出切向应力(τ , N/m^2) (Куцнецов, Гендугов, 1996): $\tau = 0.02 \rho_0 V_0^2$, ρ_0 ——水的密度($\text{kg}\cdot$

m^{-3})。

故 $\tau_{kp} = 0.02\rho_0V_{kp}^2$ (6)

表 2 最大冲刷速度向实际水流冲刷速度的转化系数

范 围	农地及作物	月 份					
		5	6	7	8	9	10
森 林	绝对休闲地(疏松的土壤)	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	冬季作物	0.50	0.70	0.82	0.37	0.41	0.50
	春季作物	0.50	0.54	0.82	0.77	0.43	0.43
	玉米	0.61	0.64	0.68	0.78	0.64	0.60
	多年生牧草	0.84	0.84	0.79	0.78	0.84	0.79
草 原	绝对休闲地(疏松的土壤)	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	冬季作物	0.60	0.82	0.76	0.37	0.41	0.50
	春季作物	0.54	0.77	0.82	0.54	0.43	0.43
	玉米	0.62	0.66	0.70	0.74	0.74	0.60
	多年生牧草	0.84	0.79	0.84	0.79	0.84	0.79

3 土壤水蚀模型的改进途径探讨

在土壤学及其它自然科学中,预测是以数学模型为基础,土壤侵蚀的经验模型应用广泛。土壤流失与侵蚀因素的关系是模型的基础,包括:气候、地形、土壤、植被、农事活动。美国(Wischmeier, Smith, 1965)的土壤通用流失方程式(USLE, Universal Soil Loss Equation),是采用最多的经验模型:

$Q = 0.224 R K L S C P$

式中: Q ——土壤流失量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); R ——降水侵蚀力, $R = E r_{30}$; E ——降水的总动能($\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}$); r_{30} ——降水 30 min 的最大强度(mm/min); K ——代表土壤侵蚀性的土壤综合指标(渗透性和抗侵蚀稳定性); $k = f(\text{腐殖质含量, 粒度成分})$, L ——坡长指标。

$L = (\frac{x}{22.13})^m$

式中: x ——坡长(m)(当 $1\% \leq \text{tg}\alpha \leq 5\%$ 时, $0.2 \leq m \leq 0.5$); α ——坡度($^\circ$); $y = \text{tg}4\alpha$; S ——坡面倾斜度的指标: $S = 0.065 + 0.0454 y + 0.0065 y^2$; C ——农作物结构对土壤侵蚀影响的指标; P ——抗侵蚀措施效率的指标。

此模型的最大优点是在于它的完整性,在预报侵蚀和设计抗侵蚀措施方面有广泛的可能性。但是,应用 USLE 公式,预测土壤流失的误差,可高达 400%。在俄罗斯有相似的模型,称之为“ВНИИЗ 和 ЗПЭ”模型(全俄农作及土地免受侵蚀保护研究所)(Сурмач, 1979)。研究侵蚀的理论模型更有前景,它建立在研究自然界及斜坡水流和土壤分离、搬运和沉积过程形成规律基础上。1985 年美国农业部几个大学联合进行 WEPP(Water Erosion Prediction Project) 的设计工作,其目的是创新一代模型以预测及防止土壤水蚀。连续公式奠定模型的基础(Foster, 1982)。

$dG/dx = D_i + D_r$ (7)

式中: G ——单位斜坡的流失量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); x ——斜坡长度(m); D_i ——雨滴造成的泥沙进入沟网的强度($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); D_r ——沟间土粒的分离,由下述公式计算:

$D_i = K_i J^2 G_e C_e S_f$ (8)

式中: K_i ——沟间土壤的可蚀性($\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4}$); J ——有效降水强度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); G_e ——植被覆盖土壤表面的幂函数; C_e ——碎石覆盖土壤表面的幂函数; S_f ——斜坡坡度因素。

此公式的物理意义是显而易见的,降水强度越大,雨滴的打击作用越强。坡度越陡,土粒沿斜

坡移动越远, 向上移动越近。植物的地上部分及碎石具有保护作用。研究得最少的是沟间的土壤侵蚀参数 K_i , 可以用公式计算得到, 它包括水分散的泥沙含量, Ca, Mg, Fe, Al 的含量, 土壤的电导性。它的量纲特殊, 为 $\text{kg} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-4}$, 物理意义不清楚, 运用 π - 定理(量值定理)可以假设为

$$K_i = f \frac{\rho_v}{V_k}; \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^4} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] \right]$$

式中: V_k ——雨滴下落时的临界速度, 即引起土壤喷溅的最大速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ_v ——泥沙的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

雨滴下落时的临界速度的计算方法至今不能令人满意, 需要进一步研究。冲刷的土壤沿着支沟向下移动。沟谷中的流水可输送其中的泥沙, 并且形成新的颗粒分离。若搬运进入沟谷的含沙量太高, 引起水流超载, 不可能发生新的分离, 泥沙沉积。在 WEPP 中, 为了表述颗粒的分离和沉积用了很多公式。若在沟中, 水流对底部土壤颗粒的切向应力超过了临界值, 则水流中泥沙的量不会超过其搬运力。沟底部土粒的分离速度(D_r)由下述公式计算:

$$D_r = D_c(1 - G/T_c) \\ D_c = K_r(\tau - \tau_{kp}) \quad (9)$$

式中: D_r ——水流底部土粒的分离速度($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); K_r ——土壤的可蚀性($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); D_c ——土壤的分离能力(当 $G = 0$ 时, $D_c = r$)($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); τ ——沟底水流的切向应力(Pa); τ_{kp} ——临界切向应力(Pa); G ——单位坡长的流失量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); T_c ——水流的搬运能力($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)。

K_i 和 τ_{kp} 的确定包括在试验获得的关系式 $D_c = f(\tau)$ 中。在无试验资料的情况, K_r 和 τ_{kp} 等用经验公式计算, 包括粒度组成和阳离子交换量的指数和土壤表面积等。可见, 要求出 τ_{kp} , 使用(6)式和(5)式计算 V_{kp} 就很简单了。至于参数 K_r 值, 是速度的参数。既然在 WEPP 中认为它是土壤性能的表征, 则可以假定不是速度, 而是冲刷速度的倒数: $K_r = 1/V_{sc}$ 。

那么, 这个参数可以借助于公式(5)求得。应该指出, 在 WEPP 中所采用的颗粒分离公式(9)具有实质性的缺陷, 它建立在砂与水流相互作用下流体力学概念的基础上, 相当于某一临界(非冲刷)速度的切向应力下, 土粒开始分离。在某种意义上, 土壤颗粒(类似于砂的单粒)构成了由团粒组成的相互联系的复杂的一种或者多种复杂粒径的大土块。事实上, 土壤是分散的, 不均匀的。因而, 土粒的脱离在任何径流, 甚至很小的径流下都可以发生。为了得出土壤颗粒分离的性能公式, 应该使用更普遍的多分散的结构力学的理论。Кулишев(1997)等曾提出:

$$D_c = 1.5\rho_0BV \exp(-0.39 \frac{V_p^2}{V^2}) / 1g^2(6.15 \frac{H}{\Delta}), \text{ 若 } \frac{V_p}{V} < 1 \\ D_c = 1.5\rho_0BV \exp(-0.39 \frac{V_p^2}{V^2}) / 1g^2(6.15 \frac{H}{\Delta}), \text{ 若 } \frac{V_p}{V} > 1$$

式中: D_c ——水流的分离为($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ_0 ——水的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); B ——经验系数; V ——水流平均速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); H ——水流深度(m); Δ ——沟床隆起的高度(m)。

水流临界速度平方与速度平方关系是此公式的基本自变量。水流的搬运能力(T_c) 在 WEPP 中由下列关系式求得: $T_c = K_t \tau^{1.5}$

式中: K_t ——泥沙搬运系数($\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-0.5}$); τ ——水流的切向应力(Pa)。

如果含沙量超过水流的搬运能力, 则在 WEPP 公式中, 用下式计算出沉积量:

$$D_f = \beta W(T_c - G)^{-1}$$

式中: D_f ——沟中泥沙的沉积强度($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); β ——由雨滴引起增加 0.5 的湍流因素;
 W ——泥沙在水中沉积的有效速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); G ——单位坡面上泥沙的流失量($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); T_c ——水流的搬运能力($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); Q ——水的单位流失量(坡面单宽)($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。
从以上对 WEPP 理论模型的简短的讨论得知: 它是几种水蚀侵蚀模型中, 最完整而有缺陷的一种模型, 对其存在的问题开展进一步的研究是一个很重要的努力方向。

参考文献 9 篇(略)

(上接第 136 页)

“胁边”现象, 大幅度提高梯田作物产量(57.7% ~ 88.6%)。地膜最佳埋设深度, 下方梯坎内侧为 1.0 m; 上方梯坎坎脚为 0.75 m。该技术成本低廉, 简单易行, 增产效益显著, 具有极大的推广应用前景。黄土高原现有梯田面积 267 hm^2 , 若全部采用这一技术, 以 1 hm^2 增产 750 kg 计, 可年增产粮食 20 余亿 kg。

致谢: 此项研究得到中科院资源与生态环境重大项目 KZ951—A1—402 的经费支持, 感谢米脂县委副书记张海水和试验田农户张海浪对此项试验研究的大力支持。

参考文献

- 1 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京: 中国水利水电出版社, 1997, 464
- 2 陶毓汾等. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发. 北京: 气象出版社,
- 3 李开元, 李玉山. 黄土高原农田水量平衡研究. 水土保持学报, 1995, 6(2): 39 ~ 44
- 4 张信宝, 安芷生. 减少地面蒸发, 充分利用降水资源——黄土高原旱坡地生态农业的思考. 水土保持通报, 1997, 17(1): 57 ~ 62