

* 土壤物理力学性质与土壤侵蚀关系研究进展

查小春 贺秀斌

(中国科学院水土保持研究所 陕西杨陵 712100)
(水利部)

摘 要 综述评价了近年来从土壤物理力学性质对土壤侵蚀的研究概况,指出应从土壤物理力学性质方面对土壤侵蚀进行系统研究,使其标准化和量化,为预测土壤侵蚀和防治水土流失服务。

关键词 土壤物理力学性质 土壤侵蚀 研究进展

Progress on the Study of Soil Erosion from Soil Physical Property and Erosive Force

Zha Xiaochun He Xiubin

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Resources Yangling Shaanxi 712100)

Abstract The progress of the soil erosion was reviewed from the soil physical and force properties according to the study in recent years. The authors pointed out that soil erosion should be studied systematically and made it standardly and quantitatively to serve for the prediction and control of the soil and water conservation.

Key words soil physical and force properties soil erosion progress

土壤侵蚀^[1,2]的含义通常是指降雨径流、风力、重力等侵蚀营力对地表土壤的破坏、搬运和沉积的过程,包括了地球表面上发生的所有侵蚀,其产生和发展与土壤的理化和力学特性密切相关。早在60年代,朱显谟^[3]通过对土壤侵蚀机制的研究,将土壤抗侵蚀能力分为抗蚀性和抗冲性,并为之下了定义,指出:抗蚀性是指土壤抵抗径流的分散和悬浮的能力,它主要取决于土粒和水的亲和力,与土壤内在的物理和化学因素有关;抗冲性是指土壤抵抗径流的机械破坏和推动下移的能力,它主要取决于土粒间和微结构间的胶结力和土壤结构体间的抵抗离散力。同时,也有许多学者将土壤的抗侵蚀能力称之为可蚀性,Hudson^[4]定义为:是指土壤对侵蚀的易损性或敏感性,即土壤对侵蚀抵抗力的倒数。对于土壤的可蚀性,它是一个复杂的概念,受着土壤自身特性和处理情况等许多因素的影响,在土壤侵蚀过程中,由于侵蚀营力只是土壤侵蚀过程的外部因素,而土壤自身的性质才是其内在的因素,因此,对于土壤可蚀性研究,是认识和探索土壤侵蚀机

理的一个重要环节。现就对土壤侵蚀研究进展从土壤物理和力学性质两方面作一回顾。

1 根据土壤物理性质对土壤侵蚀的研究进展

在土壤侵蚀研究过程中, 研究者常用试验中所测定的土壤各种物理性质, 来说明所测定的土壤侵蚀量, 直接或间接地评价土壤侵蚀的相对敏感程度, 并提出了许多的指标。其中大多数指标是评价土壤耐溅击的能力或抗分散的能力。

在国外,Middleton^[6]在 1930 年根据试验结果, 提出用分散率(Dispersion ratio)作为估价土壤可蚀性的指标;Baver^[7]于 1933 年提出了分散——渗透性的指标;Lutz^[8]于 1934 年提出, 最细部分团聚体含量对土壤可蚀性影响很大;Bouyoucos^[9]于 1935 年提出用黏粒率作为土壤可蚀性指标;黏粒率越小, 土壤越不容易侵蚀;Anderson^[10]于 1954 年提出团聚体表面率可作为土壤可蚀性指标, 团聚体表面率=0.05mm 颗粒表面积/(粉砂+黏土)团聚表面积;LeenheerDe 和DeboodtM^[11]于是 1959 年提出了团聚体不稳定性指标;川村学者^[12]于 60 年代提出了水稳性团聚体风干率指标;Rousseva^[13]于 1989 年提出可用土壤团聚体稳定性来作为土壤可蚀性指标。

在我国, 也有大量的研究者在土壤可蚀性方面做过大量的工作, 如郭培才^[14]、王佑民^[15]等, 他们也从土壤物理性质上提出了抗蚀性指标, 来评价土壤抗侵蚀的强弱。郭培才等^[14]通过对不同土壤剖面(0~10cm, 20~30cm, 40~50cm)层次的草地、林地、农地的采样分析得出水稳性团粒含量是反映土壤抗蚀性的最佳指标, 并对土地类型作了定性定量分析, 将土壤抗蚀性划分为极弱、弱、中等、强、极强五个等级(表 1)。王佑民等^[15]对不同腐殖质含量和水稳性团粒含量的土壤作抗蚀性评价, 以腐殖质和水稳性团粒作为土壤抗蚀性的指标, 并根据二者的含量, 将黄土高原的土壤抗蚀性分为极弱、弱、中等、较强、强、极强六个等级(表 2)。赵兴实^[16]对黑土地区的土壤抗蚀性进行分析, 认为可利用结构系数和分散系数来表示土壤的抗蚀性指标。张启昌等^[17]得出在侵蚀外营力一定时, 土壤侵蚀状况与地面物质的抗蚀能力有关, 因此, 可以把一定粒径的土壤自然颗粒抗均匀水滴击溅而被分散的性能作为土壤抗蚀性能指标。唐克丽、查轩等^[18]对子午岭林区林草地不同地形部位土壤剖面的水稳性团粒含量分析后得出, 水稳性团粒含量是反映土壤抗蚀性的重要参数, 因此强调恢复和重建植被在防治黄土高原水土流失具有重要意义。

表 1 土壤抗蚀性强弱等级表(据郭培才等)

等级	极弱	弱	中等	强	极强
大于 0.25 mm 风干土水稳性 团粒含量/%	< 15	15~ 22	22~ 43	43~ 57	> 57

表 2 黄土高原土壤抗蚀性分级(据王佑民等)

级别	极弱	弱	中等	较强	强	极强
大于 0.25 mm 土水稳性团聚体含量/%	< 3	3~ 10	10~ 20	20~ 30	30~ 50	> 50
土壤腐殖质含量/%	< 0.5	> 0.6	> 1.0	> 2.0	> 2.5	> 4

2 根据土壤侵蚀营力对土壤侵蚀的研究进展

除了从土壤物理性质来研究土壤可蚀性外, 一些研究者也从土壤侵蚀力学的角度进行研究来评价土壤的可蚀性, 这包括土壤的抗冲性和抗剪性。

2.1 对土壤抗冲性的研究进展

对抗冲性的研究, 最早是前苏联的古萨克于 1949 年采用流水对磨碎过的过筛土样进行冲刷

作试验,尔后又用人工降雨的方法在室内冲刷整段土样标本作试验。当他用水槽放水冲刷作试验时,提出用冲走 100 cm^3 土样所需的水量来评价土样的抗冲性;当用人工降雨的方法冲刷整段土样标本作试验时,采用每平方米面积上冲走土样的克数来评价土壤的抗冲性。随后,考斯加柯夫于 1960 年从泥沙起动的角度出发,采用每平方米面积上所需的冲刷力来评价土壤的抗冲性等^[19]。

如今,我国的研究者从土壤力学的角度,在抗冲性方面已经做了大量的工作,开辟了新的研究领域,并对土壤侵蚀有了深入的认识。研究的方法主要采用原状土冲刷土槽法^[20,21]和 C. C 索波列夫仪用恒压水性直接冲刷土层法^[22]。他们先后就这两种方法进行了不同程度的改进和引用,对黄土区土壤的抗冲性进行了研究,并提出了土壤抗冲性指标。

朱显谟^[19]曾采用土样($5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$)在流水中的冲失率,并以土样在流水中的冲刷时间为附加指标来评价土样的抗冲性,周佩华等^[23]用单位径流深的冲刷量作为土壤抗冲性指标,并将黄土高原的土壤抗冲性划分为五个级别(表 3)。蒋定生^[19,24]在研究土壤抗侵蚀性能时,先后采用了三个评价土壤抗冲性指标:(1)单位水体对土壤的冲刷值, $M\text{ (g/L)}$; (2)每平方米面积上所需的冲刷力, (N/m^2) ; (3)土壤抗冲刷指数 C , 即冲走 1g 土壤所需的水量和时间 $(\text{L} \cdot \text{s/g})$, 并且蒋定生还利用他所提出的抗冲性指标——抗冲性指数 C 研究了黄土高原土壤抗冲性变化规律,得出抗冲性在水平上自北向南有递增的变化规律趋势。李勇^[25]则利用在一定坡度、一定雨强(或冲刷流量)下,以冲刷 1g 土所需要时间来表示抗冲性能的指标,用 A_s 表示,单位: s/g , A_s 愈大,则土壤抗冲性能愈强;赵兴实^[16]以冲走 1g 土所需的力 (kg) 作为抗冲性能指标;吴普特^[26]则以单位径流深的冲刷侵蚀力 $k_w\text{ (kg/m}^2 \cdot \text{mm)}$ 作为土壤抗冲性指标。

表 3 黄土高原土壤抗冲性分级(据周佩华等)

土壤抗冲性分级	极弱	弱	中等	强	极强
土壤抗冲性指标	> 0.30	$0.10 \sim 0.30$	$0.05 \sim 0.10$	$0.02 \sim 0.05$	< 0.02

对影响土壤抗冲性的因素方面,周佩华^[23]认为,影响土壤抗冲性的因素为地面坡度和土地利用情况;王万忠等^[24]指出,影响土壤抗冲性强度取决于两个方面:一是植物根系的分布、盘绕、固结作用,二是有机无机复合体的胶结作用的影响;查轩、唐克丽等^[2,18]对子午岭林区的研究表明,抗冲性与植被有着密切的关系,当地面林草植被遭到破坏和耕垦后,土壤的理化性质会严重恶化,抗冲性能明显减弱,侵蚀由轻微突变为强烈侵蚀。

除了对黄土区土壤的抗冲性研究外,近年来,对植物根系和土壤抗冲性关系的研究发展也较快,刘秉正^[28]、郭培才^[29]、汪有科^[30]、吴钦孝^[31]、李勇^[25,32]等都作了有关的论述,得出植物根系在维持土壤稳定性,抵抗径流对土壤冲刷起决定性作用。

2.2 对土壤抗剪强度的研究进展

当外力作用于土壤时,土壤的力学性质主要表现为抗压和抗剪力。对于土壤的抗剪强度,在计算土工建筑物地基的强度和土壤边坡稳定时,采用的定义为^[33]:是在极限应力条件下,土体一部分对另一部分相对滑动(剪切)时土体抵抗剪切破坏的极限强度,对粘性土抗剪强度用库伦公式表示为:

$$\tau = c + \delta \operatorname{tg} \varphi$$

(1)

式中, τ ——土壤抗剪强度 (kPa) ; δ ——垂直压力 (kPa) ; c ——黏聚力 (kPa) ; φ ——内摩擦角 $(^\circ)$ 。

该定义从宏观的角度考虑了土体的剪切破坏。当把抗剪强度与土壤侵蚀联系起来, 从侵蚀的角度考虑土粒或土团的剪切破坏时, Jumics 和 Barer^[34]把抗剪强度定义为: 在剪应力的作用下, 抵抗土粒或土团持续剪切而引起的剪切变形破坏的阻力, 并指出它由以下三部分组成: 土粒间的黏聚力; 颗粒间相互联结的抵抗变形力; 颗粒表面间的抗滑力。他们对黏性土的抗剪强度采用同样的库伦公式同公式(1)。

对土壤抗剪强度的研究, 在我国, 目前还主要集中于计算建筑物地基的强度和土壤边坡的稳定, 很少把它与土壤侵蚀联系起来进行研究, 依此来预测土壤的可蚀性或者与侵蚀的相关过程。蒋定生、范兴科等^[19]从宏观的角度分析研究了黄土高原的原状土和击实黄土的抗剪强度规律, 他们得出: 在水平变化规律上, 土壤的黏聚力呈现由北向南渐次递增的趋势, 内摩擦角有自北向南渐次减少的趋势; 在纵向变化规律上, 随土层深度的增大, 土壤容重增大, 抗剪强度也有所提高。潘利君等^[35]在分析土壤抵御外力扭剪的能力后, 认为土壤抗剪力制约着土壤的可蚀性, 但他们做的工作很少。代全厚等^[36]通过对嫩江大堤护坡植物根系和抗剪强度分析发现, 土壤稳定性与植物根量关系密切, 根量大, 其土壤抗剪强度大, 而且能网络固持土壤增强土壤的稳定性, 故土壤抗剪强度与植物根量有明显的相关性, 相关系数为 0.9814, 其回归关系为:

$$Y = 0.0088 + 0.264X \quad n = 16 \quad r = 0.9814 \quad (2)$$

国外学者对土壤的抗剪强度做的工作很多, 而且, 它已被成功地用来预测土壤的可蚀性或者与侵蚀的相关过程^[39]。如 Flanagan^[37]把土壤压缩强度和临界剪应力联系起来分析侵蚀现象; Watson 和 Lafien^[38]把沟间侵蚀和抗剪强度联系起来预测土壤侵蚀量; Al-Durrah 和 Bradford^[39]利用土壤强度来研究土粒和击溅机理等。对于降雨径流对土壤侵蚀的影响, Cruse 和 Larson^[40]认为当雨滴击溅土壤表面时, 决定土粒分散的因素中, 起着主要作用的就是粒间的剪力, 即粒间产生的剪切破坏, 可见, 土壤的抗剪强度影响着土壤侵蚀的产生。Watson 和 Lafien^[38]从雨强、坡度和抗剪强度这三个因素对细沟间蚀进行多元回归分析后发现, 降雨后的抗剪强度相对于降雨前的抗剪强度来说, 能很好地预测土壤的流失量, 因此, 并建立了数学方程表示为:

$$D = \tau_a^{-0.43} I^{1.68} (0.0074 \sin \theta + 0.0056) \quad r^2 = 0.84 \quad (3)$$

$$D = 0.00109 \tau_a^{-0.43} I^{1.68} (\sin \theta)^{0.26} \quad r^2 = 0.84 \quad (4)$$

$$D = \tau_a^{-0.40} I^{1.65} (0.0074 (\sin \theta)^{0.36} + 0.00039) \quad r^2 = 0.84 \quad (5)$$

式中: D ——土壤流失量 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$); τ_a ——雨后土壤抗剪强度 (kPa); I ——雨强 (mm/h); θ ——坡度 ($^\circ$)

土壤可蚀性是土壤对雨滴击溅和地表径流侵蚀营力的敏感程度, 它一般被认为是土壤固有的特性 (Lal, 1988)。但是, 季节性或短暂性的变化对土壤有机质含量、土壤强度、团聚体的稳定性等也会产生影响, 而且, 土壤可蚀性与土壤特性密切相关, 因此, 预测土壤可蚀性在季节中发生着变化是合乎逻辑的 (Coote et al^[41], 1988; Young 和 Mutchler^[42], 1977)。

Mutcher 和 Carter^[42]通过研究后得出土壤可蚀性在一年内发生着变化。Bajracharya 和 Lal^[5]以团聚体的稳定性和土壤抗剪强度指标来评价了季节性的土壤可蚀性, 分析得出, 由于冬春季节很湿润的条件而导致土壤入渗降低和较低的土壤强度, 使这段时间土壤比夏秋季节易于侵蚀。在同一季节内, 土壤的抗剪强度也发生着变化。Kok 和 McCool^[34]研究指出, 一般性的作物轮作包括夏季休闲和传统的耕作措施, 在冬季的冻融循环作用下, 很易导致土壤侵蚀, 他们通过对 1987~1988、1988~1989 年的冬季土壤进行研究, 测定了当土壤物理性质对土壤抗剪强度的变化, 得出强度变化范围是在冻融期间的 1.2 kPa 到干土的 14 kPa 之间; 并且, 土壤的抗剪强度

变化很迅速,在强烈的蒸发(阳光照射和风吹时)条件下,融冻土能在几小时内获得前期的冻结强度。

土壤的物理性质对抗剪强度影响很大,Cruise 和 Larson^[40]分析了影响土粒抗剪强度的因素:容重、基质势和粒间物理化学性质,结果得出土壤基质势的增加,将会增加土壤的抗剪强度,而且,很大的容重也有很大的抗剪强度。Kok 和 McCool^[34]、Coote 等^[41]指出土壤的抗剪强度和水分呈反比关系,这就意味着土壤可蚀性随湿度的增加,强度将会降低,在这种情况下,土壤很容易被径流冲刷和雨滴击溅而分散,发生侵蚀,而且,在部分冻结和冻融条件下,会导致土壤表面较高的水分含量,特别是对于裸露的土壤,很容易发生土壤侵蚀。蒋定生^[19]通过对黄土高原的抗剪强度分析后认为:孔隙度、黏粒含量、容重、水分等是影响抗剪强度的重要因素,并建立了这些因素与黏聚力和内摩擦角之间的关系表达式,这对于分析和研究黄土抗剪强度奠定了基础。

3 研究展望

综上所述,许多研究者根据土壤物理和力学性质对土壤的抗侵蚀能力进行了探讨,并对土壤的抗蚀抗冲性能提出了许多的指标,反映了土壤对侵蚀营力的相对敏感程度,但这些指标是否能比较恰当地反映各类土壤和地类的抗蚀抗冲性,还有待于在实践中进一步验证。因为:(1)这些指标并不能反映各类土壤和地类的抗蚀抗冲性,它们的提出具有一定的区域限制。(2)这些指标无法定量地求出一定侵蚀营力下的土壤侵蚀量。(3)这些指标并没有明确指出在抗蚀性和抗冲性之间哪一特征在土壤侵蚀中居于主导地位。但这些指标的出现,一般可认为一方面是由于不同区域土壤特征差异所致,另一方面更重要的是土壤侵蚀动力过程的差异所致。当然,还与地形、耕作方式、土地利用和水土保持措施等因素有关。因此,研究中采用哪种指标比较适宜,要考虑诸多因素。

从土壤物理和力学性质来研究土壤侵蚀属于基础研究,它对于认识土壤侵蚀机理和预测土壤侵蚀过程及合理进行土壤侵蚀防治均有极为重要的意义。因此在今后的研究中,应加强以下几个方面的研究:(1)加强研究的系统性。应当针对不同的土地利用和土地类型,根据其侵蚀动力特征(包括不同方式和强度),对土壤抗侵蚀性能进行系统研究,并提出不同条件下有关抗侵蚀性参考指标,使其定量化和标准化,为区域治理和开发服务。(2)确立明确的指标体系。众多的抗蚀抗冲性指标如何应用?影响这些指标的因子有哪些及其作用大小?应尽快进行有重点研究,制定统一标准,为各地区综合治理提供科学依据,达到应用和开发目的。(3)加强对土壤抗剪强度的研究。对土壤抗蚀抗冲性的研究,经过几十年科学工作者的艰辛研究,已有了更深入的认识。但对土壤抗剪强度的研究,目前在侵蚀方面做的工作很少,主要在于植物根系对土壤固土的抗剪强度的研究。因此,应加强土壤抗剪强度的研究,为防治和控制土壤侵蚀服务。(4)加强植被破坏和重建对侵蚀机理影响的研究。植被能明显地改善土壤理化和力学性质,提高土壤的抗蚀抗冲和抗剪强度,并能有效地防治和控制水土流失和改善自然环境条件,因此恢复和重建植被在黄土高原的环境整治中具有举足轻重的作用。加强此项研究,对于研究土壤侵蚀规律、自然侵蚀发生频率,乃至全球环境演变等均有重要意义。

参考文献

- 1 中国科学院黄土高原综合考察队 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径 北京:中国科学技术出版社,1990

- 2 唐克丽, 张科利等. 子午岭林区自然侵蚀和人为加速侵蚀剖析. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1993, 第17集
- 3 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素(三). 水土保持通报, 1982(1)
- 4 Hudson N. W. 著, 窦葆璋译. 土壤保持. 北京: 科学出版社, 1975
- 5 Bajracharya R. M. and Lal R. Seasonal Soil Loss and Erodibility Variation on A Miamian Silt Loam Soil. Soil Sci Soc AM. J., 1992, 56: 1560~ 1565
- 6 Middleton H E. Properties of Soil Which Influence Soil Erosion. USDA Technical Bulletin, 1930, 173: 16
- 7 Baver L D. Some Factors Effecting Erosion. Agri Eng, 1993, 14: 51~ 52
- 8 Dusan Zachar. Soil Erosion. Developments in Soil Science. Now York, 1982, 10: 164~ 166
- 9 Bouyoucos G J. The Clay Ratio as A Criterion of Susceptibility of Soil to Erosion. Journal of American Society of Agronomy, 1935, 27: 738~ 741
- 10 Anderson H W. Suspended Sediment Discharge As Related to Stream Flow. Topography, Soil and Land Used. American Geophysical Union, 1954, 35: 268~ 281
- 11 De Leenheer L., De Boodt M. Determination of Aggregate Stability by the Change in Weight-diameter. Mededelingen Rande Land-bouwhoghe School, 1954, 24: 290~ 351
- 12 Farres, P. J. and S M. Cousen. An Improved Method of Aggregate Stability Measurement. Earth Surface Processes Landforms, 1985, 10: 321~ 329
- 13 高维森, 王佑民. 土壤抗蚀抗冲性研究综述. 水土保持通报, 1992, 12(5)
- 14 郭培才, 张振中等. 黄土区土壤抗蚀性预报及评价方法研究. 水土保持学报, 1992, 6(3)
- 15 王佑民等. 黄土高原土壤抗蚀性研究. 水土保持学报, 1994(4)
- 16 赵兴实等. 黑土侵蚀区土壤理化特性及抗蚀性能初探. 水土保持, 1981(6)
- 17 张启昌等. 黄土低山丘陵区土壤抗蚀性影响因素的初步研究. 水土保持通报, 1996, 16(3)
- 18 查轩, 唐克丽等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响. 水土保持通报, 1992, 12(2)
- 19 蒋定生等编著. 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
- 20 蒋定生. 黄土抗冲性研究. 陕西省土壤学会 1978 年学术年会论文集, 1978
- 21 刘国彬, 张光辉. 原状土冲刷法与人工模拟降雨法研究土壤抗蚀性对比分析. 水土保持通报, 1996, 16(2)
- 22 黄义端等. 土壤内在性质对侵蚀影响的研究. 水土保持学报, 1989(3)
- 23 周佩华等. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨. 水土保持学报, 1993, 7(1)
- 24 蒋定生. 黄土区不同利用类型土壤抗冲刷能力的研究. 土壤通报, 1979(4)
- 25 李勇. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究. 水土保持通报, 1990, 10(1)
- 26 吴普特等. 黄土丘陵沟壑区(II)土壤抗冲性研究. 水土保持学报, 1993, 7(3)
- 27 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. 水土保持通报, 1996, 16(5)
- 28 刘秉正等. 刺槐林对土壤抗冲性的试验研究. 西北林学院报, 1984(1)
- 29 郭培才等. 黄土高原沙棘林地土壤抗蚀抗冲性能的研究. 西北林学院学报, 1989(1)
- 30 汪有科等. 林地枯落物抗冲试验研究. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1991, 第14集
- 31 吴钦孝等. 黄土高原植物的根系提高土壤抗冲性能的研究. 水土保持学报, 1990(3)
- 32 李勇. 沙棘林根系强化土壤抗冲性的研究. 水土保持学报, 1990(3)
- 33 B. A. 罗姆他捷著. 砂土和黏土的物理力学性试验法. 饶鸿雁译. 北京: 人民铁道出版社, 1957
- 34 Kok, H., and D. K. McCool. Quantifying Freeze/Thaw-induced Variability of Soil Strength. Trans ASAC, 1990, 33: 501~ 511
- 35 潘利君, Ir. E. Bergsma. 利用土壤入渗速率和土壤抗剪力确定土壤侵蚀等级. 水土保持学报, 1995, 9(2)
- 36 代全厚, 张力等. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究. 中国水土保持, 1998(12)
- 37 Nearing M. A. and L. T. West. Soil Strength Indices as Indicators of Consolidation. Trans ASAC, 1988, 31:

471~ 476

- 38 Waston D. A and Laflen J. M. Soil Strength, Slope and Rainfall Intensity Effects on Interrill Erosion Transactions of The ASA E, 1986, 29: 98~ 102
- 39 Al-durrah M. , and J. M. Bradford New Methods of Studying Soil Detachment due to Waterdrop Impact Soil Sci Soc Am. J, 1981, 45: 949~ 953
- 40 Cruse R. M and Larson W. E Effect of Soil Shear Strength on Soil Detachment due to Raindrop Impact Soil Sci Soc Am. J, 1977, 41: 777~ 781
- 41 Coote, D. R. , and C. A. Malcolm Mc Goven et al Seasonal Variation of Erodibility Indices on Shear Strength and Aggregate Stability in Some Ontario Soils Can J. Soil Sci , 1988, 68: 405~ 416
- 42 Mutchler C. K and Carter C. E Soil Variation during the Year Transactions of the ASA C, 1983, 26(1): 1102~ 1108

(上接第 71 页)

传递模型, 并分析了模型参数确定方法。同时利用实验结果对模型进行了简单验证。由于土壤溶质随地表径流迁移影响因素较多, 同时本身过程也十分复杂, 因此本研究仍属于初步探讨。大量的工作需进一步研究分析。

参考文献

- 1 Bruce, et al A Model for Runoff of Pesticides from Small Upland Water Sheds J. Environ. Qual 1974, 4: 541~ 548
- 2 Baiky et al Predicting Pesticide Runoff from Agriculture Lands: A Conceptual Model J. Environ. Qual , 1974, 3: 95~ 102
- 3 A huja et al The Depth of Runfall-runoff-soil Interactions as Detemined by p³². Water Resour. Res 1981, 17: 967~ 974
- 4 A huja Release of A Soluble Chemical from Soil to Runoff Trans ASA E, 1982, 25: 948~ 956
- 5 Rony Wallach et al Transfer of Chemicals From Soil Solution to Surface Runoff: a Diffusion-based Soil Model Soil Sci, Am. J. 1988, 52: 612~ 628
- 6 Rony Wallach et al The Concept of Convective Mass Transfer for Predicting of Surface Runoff Pollution by Soil Surface Applied Chemicals Trans ASA E 1989
- 7 Rony Wallach et al Modeling Solute Transfer from Soil to Surface Runoff: The Concept of Effective Depth of Transfer J. Hydrology, 1989, 109: 307~ 317
- 8 A. N. Sharpley et al The Kinetics of Phosphorts Desorption from Soil Soil Sci Am. J. 1981, 45: 493~ 496, 1981
- 9 王全九等 黄土坡面溶质随径流迁移相应函数模型 水利学报, 1994(11)