

# 黄河中游地区泥沙变化研究进展

舒长先

(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** 自 20 世纪 80 年代起, 有关黄河中游地区泥沙变化的研究已取得了丰富的成果。从黄河中游地区泥沙变化的时空差异、泥沙变化研究中存在的问题、未来泥沙变化的预测等 3 个方面分析总结了目前的研究现状, 并在此基础上提出了自己的看法。

**关键词:** 黄河中游 泥沙变化 减沙效益 预测

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2000)03-0010-05

中图分类号: P333.4

## Review on Sediment Variation in Middle Reaches of the Yellow River

SHU Chang-xian

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

**Abstract:** There have been abundant research results on sediment variation in the middle reaches of the Yellow river. The current research results have been summarized from three facts: changes of the sediment variation with time and space, some questions in the research on the sediment variation and trend prediction of the future sediment variation. Based on the existing results, some views for the research on the sediment variation there have been put forward.

**Keywords:** the middle reaches of the Yellow river; sediment change; benefit of soil conservation; prediction

20 世纪 70 年代以后, 黄河来沙量发生了明显的变化。黄河泥沙绝大部分来自中游地区, 因此, 自 80 年代至今, 许多科研单位对黄河中游泥沙变化开展了研究。在分析计算的过程中, 各家确定的研究区域不同, 但大都是围绕着黄河中游进行的, 目前大致有 4 类: (1) 龙羊峡至三门峡区间; (2) 河口镇至三门峡区间; (3) 河口镇至龙门区间及泾河、北洛河上游河源区, 即黄河中游多沙粗沙区; (4) 河口镇至龙门区间。这些研究都是从流域面上的侵蚀产沙和干支流输沙两个方面入手, 分别探讨了黄河中游的泥沙变化动态, 分析了泥沙变化的原因, 预测了未来泥沙变化的趋势, 这些成果对正确评价几十年来黄河中游地区的治理成果, 制订水土保持规划, 进行下游水利工程的建设, 都具有重大的意义。

### 1 黄河中游泥沙变化动态

(1) 空间分布。黄河中游的泥沙变化是明显的, 但不同区域的差别很大。张胜利<sup>[1]</sup>以 1919—1989 年系列平均作为对比基准, 80 年代河口—龙门区间(简

称河—龙区间)、渭河华县以上、北洛河源头以上、汾河河津以上泥沙减少分别为 55%, 31%, 39.3%, 88.5%。在同样的区域, 如河—龙区间不同支流减沙也不相同, 有的支流减沙幅度较大(约 60%), 有些河流减沙轻微, 如皇甫川、窟野河流域。

(2) 时间变化。从各年代平均来看, 70 年代以后, 黄河中游的输沙量较以前有明显的减少, 但并不是随年代递减, 以河龙区间为例, 据水利部第二期水沙基金项目研究, 河—龙区间 50—80 年代输沙量呈递减变化, 90 年代输沙量较 80 年代却有很大增加。为了比较泥沙变化情况, 很多研究者划分了泥沙变化的时间阶段, 景可等<sup>[2]</sup>认为 1919—1985 年, 可以分为 3 个阶段, 其中 1919—1953 年为第 1 时段, 黄河输沙量为  $1.53 \times 10^9$  t/a, 此阶段黄土高原无治理, 河流输沙量代表了这个地区的侵蚀量; 1954—1970 年为第 2 时段, 输沙量为  $1.86 \times 10^9$  t/a, 此阶段已有大量水利水保工程, 人为拦沙约为  $1.76 \times 10^8$  t/a; 1971—1985 年为第 3 时段, 黄河输沙量进一步减少。但在实际计算中, 一般认为 1970 年以前人类活动影响较小, 可近

似代表“天然阶段”,作为对比的基准期,1970年以后人类治理加强,可视为“治理阶段”。

(4) 粒径变化。泥沙量的变化同时也伴随着泥沙粒径的变化。景可通过点绘义门、吴堡、龙门3站粗沙过程线,发现1970年以来粗泥沙来量减少,但各站不同,义门至吴堡减少最明显。倪晋仁等<sup>[3]</sup>研究认为水土保持工作开展后,与黄土侵蚀最密切相关的黄土丘陵区及沙砾丘陵区河流泥沙平均粒径均有减小。特别是沙砾丘陵区河流由于水土保持措施的开展使河流泥沙粒径的分布朝细化、分散和不对称的方向发展。林银平<sup>[4]</sup>等根据已有资料分别绘制了1954—1969年,1970—1979年,1980—1989年,1990—1995年4个时期的黄河中游输沙模数等值线图及大于0.05 mm粗泥沙模数等值线图,通过不同时期输沙模数的分布、范围的对比,分析指出输沙模数与粗泥沙模数值变小,高值区范围在缩小,但不同流域由于治理程度不同,变化不一致;同时认为粗泥沙区面积不断缩小,反映了水利水土保持措施在使黄河泥沙变细方面起着积极的作用。

## 2 泥沙变化研究中的几个问题

有研究者认为黄河泥沙完全是由于地质环境所决定,人类活动对侵蚀产沙未起作用,至少在现在没有反映<sup>[5]</sup>。但多数研究者都认为今天黄河中游河流泥沙的变化是自然因素(主要是降雨的影响)和人为因素(主要是水利水土保持措施的影响)共同作用的结果。这两种因素同时作用于产沙,对产沙影响的比重很难分离开来,因此即使是同一区域,不同的研究者对两种因素影响的比重各是多少,回答也是不一样的。产生这些差异的原因很多。下面着重谈其中的几个问题。

### 2.1 分析方法的选择

在分析泥沙变化的研究中,根据不同的目标选择一种既有理论依据又能符合实际的计算方法,关系到研究目标的实现和计算结果的可信度。在应用中具体的方法很多,归纳起来最主要的2种方法就是水文法和水保法。

水文法的基本原理是在分析降雨、径流和产沙规律的基础上,建立降雨或径流与泥沙的计算关系。具体有以下方法:经验公式法、概念性模型法、不同系列对比法、双累积曲线相关法、类比法。其中经验公式法由于计算简便、直观,为水文法基本的计算方法。经验公式法是利用统计相关建立未治理情况下的产沙经验公式,将治理以后各年或各时段平均的降雨指标代入公式,就可以求出治理以后各年或各时段平均的天

然产沙量;再与治理后实测泥沙量比较,得出泥沙变化情况。这种方法在计算范围内有一定的精度,但不能移用到其它区域。为了克服统计模型的局限性,基于水文学、水动力学原理建立的概念性模型得以产生,如谢树楠<sup>[1]</sup>等提出的黄土丘陵沟壑区暴雨产沙模型,汤立群<sup>[6]</sup>等在小流域产流产沙模型的基础上,提出的大、中流域产流产沙模型等,这些模型在大理河、皇甫川等流域泥沙变化分析中都曾得以利用,取得了很好的效果。概念性模型理论性强,做地区移用时精度较高,为了快速提取区域内各种有关的特征信息,许多模型还设置了3S接口,但是模型在推导过程中需进行必要的简化,影响了计算的精度;在应用中参数通常难以率定,对水文、泥沙等观测资料有严格的要求,目前还很难在大、中流域广泛推广。

水保法也称成因分析法,顾名思义是从成因角度分析计算泥沙变化的方法。传统的水保法通过对水利、水土保持逐项进行减沙效益计算而得到的人为因素对泥沙的影响。赵有恩<sup>[7]</sup>提出用“以洪算沙”法进行坡面措施减沙量计算,考虑了因坡面措施减洪对沟道减沙的影响,从理论上是个突破。水沙基金二期<sup>(2)</sup>研究中在以前“以洪算沙”的基础上将原“径流量同频率对应”改进为“降雨量同频率对应”,以成因分析法和以洪算沙法平行计算(并联法),互相印证,提高了计算的精度。水保法有很大的直观性,能分清各种措施流域泥沙变化中的作用,能预测泥沙变化趋势。水保法的关键是水保措施的面积、单位面积的效益指标以及各项水利措施拦泥量的确定,也就因为这些因素面广,涉及的因素多,许多指标的确定没有形成体系,往往受到人为经验的影响,使水保法计算的结果带有不确定性。

很多研究者在分析泥沙变化原因的过程中,进行了有益的探索,引入了新的方法,如苏光全等<sup>[8]</sup>用拓扑预测法对延河流域减沙进行了分析,樊兰英<sup>[9]</sup>、郭锐等<sup>[10]</sup>应用灰色系统理论分析了汾河、泾河流域减沙效益。但目前这些方法缺乏水文法、水保法的实用和直观,也不象概念性模型那样有明确的物理意义,能否推广应用,还需要实践的检验。

### 2.2 产沙经验公式的确定

(1) 降雨—产沙的关系。这类经验公式应用最广泛。制约降雨—产沙关系合理性的是区域内雨量站的

(1) 黄河水沙变化研究基金会. 黄河水沙变化研究论文集(1—5), 1993.

(2) 黄河上中游管理局. 河—龙区间水土保持措施减水减沙效益分析, 1998.

代表性和根据降雨的特性所确定的指标。黄河中游地区的雨量站网,在 20 世纪 50—60 年代稀少,70 年代后期增加较多,50—60 年代雨量的面代表性较差。如赵文林<sup>[11]</sup>等分析皇甫川流域 50 年代只有出口一处雨量站,80 年代增加到 12 处,1 站与 12 站的雨量相关系数只有 0.73,针对这样的情况,采取了下列方法。第 1 种方法是根据后期雨量站的资料,建立多站平均雨量与少数站平均雨量的相关关系,插补出前期的面雨量,而后再用它来建立产沙关系式;第 2 种方法是根据基准期内降雨资料建立产沙公式,用多站平均雨量和少数站平均雨量的相关关系,对估算的水利水保措施减沙量进行修正;第 3 种方法是选择系列长,前后期都有的雨量站资料建立产沙公式。黄河中游的降雨产沙主要集中于汛期,而且往往集中于汛期的几次暴雨,如何在降雨产沙公式中体现这种特性,是建立雨沙关系的关键。如焦恩泽<sup>(1)</sup>以有效降雨量、有效降雨强度为参数建立的窟野河流域的雨—沙关系:

$$W_s = 48 P_e^{0.7} I_e^{1.8}$$

式中:  $W_s$ ——年沙量;  $P_e$ ——有效降雨量;  $I_e$ ——有效雨强。

惠养瑜<sup>(1)</sup>等以降雨指标为参数建立的延河流域的雨—沙关系:

$$W_s = 6\,119.88 K^{2.26}$$

$$K = n_1 M_{s1} + n_2 M_{s30} + n_3 M_{s汛} + n_4 M_{s年}$$

式中:  $W_s$ ——年沙量;  $n(1, 2, 3, 4, \dots)$  依次代表最大 1 日、30 日、汛期沙量等占年沙量的比例;  $M(s_1, s_{30}, s_{汛}, s_{年})$  依次代表最大 1 日、30 日、汛期及年雨量的模比系数。

(2) 径流——泥沙的关系。如戴明英<sup>(2)</sup>根据无定河流域径流与泥沙形成过程将泥沙分割成坡面与河道挟沙等部分分别计算并综合建立的水—沙关系:

$$W_s = 0.0306 W_{年表}^{1.27}$$

式中:  $W_s$ ——年沙量;  $W_{年表}$ ——地表年径流量。

另外,赵文林<sup>[12]</sup>在分析三川河流域产沙问题时,建立了径流与降雨复合因素与产沙的经验公式:

$$W_s = 1\,688 W^{0.93} B^{0.46}$$

式中:  $W_s$ ——汛期产沙量;  $W$ ——汛期地表径流量;  $B$ ——7、8 月等于和大于 2 mm 日降雨之和与 6、9 月等于和大于 2 mm 日降雨量之和的比值。

黄河上中游不同区域或不同支流流域的降雨、地形、地表物质组成、植被覆盖不同,同样的降雨,产沙的响应不同,经验公式的形式必然有差异。产沙经验公式尽管是统计模型,但依然要从产沙机理入手,方

能选择到适合的形式。

## 2.3 降雨分布的影响

在黄河上中游地区,面积较大的支流流域,都包含有不同的土壤侵蚀类型区,即使是同样的降雨,不同类型区产沙的差别是很大的,况且在这个地区,降雨的分布一般是不均匀的,倘若用流域的平均面雨量和输沙量建立产沙模型,计算结果必然出入很大。如顾文书<sup>[13]</sup>分析认为,1970 年河—龙区间年平均降雨量 430 mm,其中北、中部雨量较大,区间流域产沙  $1.30 \times 10^9$  t。而 1975 年河—龙区间年平均降雨量为 473 mm,大雨发生在南部,再加上该时水保措施的生效,区间产沙量仅达  $4.13 \times 10^8$  t。当然我们也可以根据不同的类型区建立不同产沙计算模型,但水文站、雨量站没有按类型区分布,水文泥沙、雨量实测资料的缺乏给计算带来很大的困难。很多研究者都已认识到降雨分布对泥沙变化的影响,但是目前在泥沙计算过程中这种影响还没有很好的体现。

## 2.4 坡面措施减沙指标体系的确定

确定坡面措施减沙指标体系的研究大致可分为 3 个阶段:第 1 阶段采用了大平均的方法(定额指标法),每种措施单位面积的减沙效益指标只有一个值,这是非常粗略的,因为在丰、平、枯不同水文年、不同量级暴雨强度下,各项措施的减沙指标不应该是一个定数;第 2 阶段在这个基础上,确定了各种水保措施在不同质量、不同水文年型下的减沙效益指标(相对指标法),如熊运阜等<sup>[18]</sup>的指标体系。相对指标法比定额指标客观严谨,但不同质量指标值,不同流域、不同水文年修正系数值任意性依然较大;第 3 阶段是动态指标法,如自然相关法<sup>(2)</sup>:通过对资料的地区综合,以流域产沙量和措施减沙量为相关因素,以措施质量分级指标为参变量,建立减沙指标曲线,通过修正推到流域坡面上。自然相关法没有直接给出减沙指标的结果,而是用流域输沙模数在坡面措施减沙效益曲线图上查取,从一定程度上减少了由小区到大区指标转换过程中确定修正系数的任意性,但不同措施质量减沙曲线的绘制主观成分很大。

## 2.5 人为增沙

人为增沙包括开矿、筑路、建窑和开荒等诸多方面。张胜利<sup>[15]</sup>系统地研究了神府煤田和东胜煤田对侵蚀产沙的影响,进行了土壤试验、人工降雨模拟试

(1) 黄河水沙变化研究基金会. 黄河水沙变化研究论文集(1—5), 1993.

(2) 黄河上中游管理局. 水土保持坡面措施减沙指标体系研究报告, 1998.

验、开矿与非开矿流域水文泥沙观测资料的对比分析,认为煤田开发后侵蚀和产沙明显增加,开矿后和开矿前相比,土壤侵蚀增加 1.34~12.7 倍,相似降雨洪水产沙量增加 50%~80%,而且颗粒变粗,推移质泥沙增多,高含沙水流出现机遇增加,泥沙重率增大。文献[16]通过不同时期航片、卫片的对照判读和实地典型调查,研究了子午岭—吕梁山之间和渭北山地以北的黄土高原地区开荒的时空特点,同时认为因开荒而增加的侵蚀产沙量不仅与开荒面积有关,而且与开荒发生的地形坡度及其组成物质等条件密切相关,用解析方法分别计算了其各种坡度下的开荒增沙量,而后求得其总量,改变了以往单靠开荒面积来估算开荒增沙量的状况。总的来说,目前人为增沙的计算缺乏一套可行的方法,研究所依据的资料多靠调查获得,计算结果比较粗略。

### 3 黄河中游地区未来泥沙变化预测

泥沙变化是自然因素和人为因素共同作用的结果,这已成为共识,基于这一点,在预测泥沙变化的过程中,也应该从这两个方面进行考虑。

景可<sup>[21]</sup>分析了目前水土保持的形势,以侵蚀产沙的最佳气候期与未来全球增温对黄土高原的影响为基础论证了未来黄土高原地区侵蚀产沙的空间趋势,同时认为由于重点侵蚀产沙区的环境因素不会发生根本性的变化,因而入黄泥沙的减少不会太明显。王铮等<sup>[1]</sup>把黄河中游划分为 3 个自然带,也是以气候变暖为前题,预测 3 个自然带在此情况下的变化,最后总结整个中游的变化趋势。这些研究没有给出未来泥沙具体变化的情况,仅仅定性分析了未来泥沙的变化趋势。

为了分析在不同水文年型、不同治理程度下泥沙变化的趋势,水沙基金(一期)、自然基金重大项目和水土保持基金用水保法进行了预测。如水沙基金以确定 1977, 1968, 1965 年为丰、平、枯典型年,假设 1990 年批准的《黄河流域黄土高原区水土保持专项规划》能够实现,用单项水土保持减沙指标,对 2000 年, 2030 年的减沙效益做了预测。自然基金重大项目<sup>[16]</sup>根据黄土高原水保专项治理规划,过去 40 a 的平均发展速度及现有工程延续效益,考虑梯田、林草、坝地措施和水库及灌溉减沙,用先分支流预测,后综合的办法对 2000, 2001, 2020 和 2030 年水利水保措施的减沙趋势进行了分析。黄河流域水保科研基金选择 1967, 1968 和 1965 年作为预测的丰、平、枯典型年,根据近期(2000 年)和远景流域治理规划,分析当遇到丰、

平、枯不同水文年的降水时,流域可能产生和减少的水量和沙量。

“八五”国家重点科技攻关项目采用水文法和水保法相结合的方法<sup>[17]</sup>,对 2000, 2010 和 2020 年多沙粗沙区的泥沙变化进行了预测:先利用相似分析法、时间序列分析法、随机模型法对降雨量变化趋势进行预测,得到不同水文年的降雨量(最大 1 日雨量、最大 30 日雨量、汛期雨量、年降雨量);用降雨指标法、降雨径流关系法、多元回归分析法、径流输沙关系法建立产沙预测模型,用于计算不同水平年的天然输沙量;选用两种规划进度,用水保法计算不同规划下不同水平年水利水保措施减沙量,同时对人为新增水土流失进行了预测;在此基础上,用水文法预测的天然径流量、输沙量中减去用水保法预测的水利水保措施减水减沙量和人为新增水土流失量,得出两种规划进度下 2000, 2010 和 2020 年的天然输沙量,水利水保措施减沙量及预测条件下输沙量。

景可等<sup>[18]</sup>选择地形因子、地面物质组成、降雨、植被和人为因素作为影响侵蚀量的因子建立侵蚀变权模型,依据社会经济发展和降水周期变化规律来确定动态因子的值,利用侵蚀变权模型预测侵蚀量,再根据预测得到的侵蚀量和水土保持规划执行情况,预测入黄泥沙量。

上述研究都在某种治理规划或治理进度的前提下,采用水保法计算不同治理的减沙效益,从而进行预测,考虑到各种规划主观性很大,以及水保法计算的弊端,这些方法的局限性是明显的。胡荣轩<sup>[19]</sup>等用灰色系统模型,张科利等用神经网络预测趋势泥沙变化,这些方法没有确切的物理意义,用数学方法中的模拟运算,反映各个时段的平均值应该是可行的,但无法进行逐年的预测,人为治理黄土高原的速度各年有差异,这种差异在计算中也无法很好体现。

## 4 结 语

黄河中游地区泥沙变化的原因是复杂的,涉及的因素很多,分析、预测泥沙变化的过程中采用的方法各异,依据的资料不统一,而且变化的各个层面,经验性的成份仍然大量存在,这些都影响到计算结果的可信度。在泥沙变化的研究中,以下问题应该受到重视。

(1) 降雨分布,特别是暴雨的分布是影响泥沙变化的一个重要因素,许多文献仅仅描述了降雨分布对

(1) 杨勤业主编,黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集(第 6 集),1993.

泥沙影响的状况,但在计算泥沙变化的过程中,其作用往往被忽略。

(2) 产沙经验公式的建立,一方面应从产沙机理入手选择适当的形式,所选的指标能全面反映某个区域、流域中降雨或径流对产沙的影响;另一方面要求所选降雨或径流指标和产沙量确实相关,而不能进行人为的构造,同时产沙经验公式应相对简单,因为 50—60 年代观测资料较少,如果依靠后来的插补,误差会更大。

(3) 为了方便利用实测水文泥沙资料,对黄河上中游地区泥沙变化的研究大都以支流流域为计算单元,很少以不同侵蚀类型区、不同侵蚀强度区为单元研究它们的泥沙变化情况。例如对侵蚀模数超过  $15\,000\text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的强烈侵蚀产沙区,目前的研究未确切地回答它在目前治理情况下的泥沙变化情况,从而给水保规划带来困难。

(4) 目前的预测是在某一种或几种治理规划的前提下进行的,并不利于实际的应用。只有根据自然(气候、土地利用状况)、社会经济(人口、经济发展情况)因素进行人为的模拟配置,预测各种治理情况下、不同水文年的减沙效益和入黄泥沙量,才能从宏观上为黄河中游地区的治理提供决策的依据。

#### 参 考 文 献

- [1] 张胜利. 略论黄河中游水沙变化及水土保持减沙效益[J]. 水土保持通报, 1994, 14(3): 8—11.
- [2] 景可. 黄河泥沙与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 88—89.
- [3] 倪晋仁, 等. 黄河中游水土保持对入黄干支流泥沙特性的影响: 泥沙粒径变化[J]. 自然资源学报, 1997, 12(1): 1—9.
- [4] 林银平, 等. 黄河中游多沙粗沙区输沙模数变化分析[J]. 水土保持通报, 1998, 18(3): 10—15.
- [5] 洪业汤. 黄河泥沙的环境地质特征[J]. 中国科学, 1990(11): 1175—1184.
- [6] 汤立群, 等. 大中流域长系列径流泥沙模拟[J]. 水利学报, 1997(6): 19—26.
- [7] 赵有恩. 黄河中游水保减沙效益分析方法的改进和应用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996(3): 29—34.
- [8] 苏光全, 等. 流域减沙效益拓扑分析——以延河流域为例[J]. 水土保持通报, 1994, 14(3): 12—19.
- [9] 樊兰英. 应用灰色理论分析水土保持效益[J]. 水土保持通报, 1986(2): 89—92.
- [10] 郭锐, 等. 应用灰色系统动态模型群分析泾河流域减沙效益[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1): 44—48.
- [11] 赵文林, 等. 黄河中游水利水保措施减沙效益分析中几个值得注意的问题[J]. 中国水土保持, 1993(6).
- [12] 赵文林, 等. 三川河水沙变化及人类活动影响[J]. 人民黄河, 1992(11): 22—26.
- [13] 顾文书. 黄河中游水沙变化的宏观分析[J]. 人民黄河, 1988(4): 10—14.
- [14] 熊运阜, 等. 梯田、林地、草地减水减沙效益指标初探[J]. 中国水土保持, 1996(8): 10—14.
- [15] 张胜利. 黄河中游大型煤田开发对侵蚀和产沙影响的研究[J]. 泥沙研究, 1993(3): 26—39.
- [16] 唐克丽, 等. 黄河流域侵蚀与径流泥沙变化[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 220—231.
- [17] 张胜利, 等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. 180—191.
- [18] 景可, 等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 148—154.
- [19] 胡荣轩, 等. 黄河中游区水、沙变化趋势及其预测[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 315—324.
- [26] Levy G J, Levin J, Gal M, Ben-Hur M. Polymers' effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1992, 56: 902—907.
- [27] Ben-Hur M, Letey J. Effect of polysaccharides, clay dispersion, and impact energy on water infiltration[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1989, 53: 233—238.
- [28] Theng B K G. Clay-polymer interactions: summary and perspectives[J]. Clays and Clay Minerals, 1982, 30(1): 1—10.
- [29] Shainberg I, Warrington D, Rengasamy P. Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing[J]. Soil Sci. 1990, 149, 301—307.
- [30] Braclough D, Nye D H. The effect of molecular size on diffusion characteristics in soil[J]. J. of Soil Sci. 1979, 30: 29—42.
- [31] Wallace A G, Wallace A. Control of soil erosion by polymer soil conditioners[J]. Soil Sci, 1986, 141(5): 363—367.
- [32] Lyklema J, Fleer G J. Adsorption isotherms of polyanions on soils using tritium labeled compounds[J]. Colloids Surf. 1987, 25: 357—368.
- [33] Ben-Hur M, Lark D C, Letey J. Exchangeable Na, polymer and water quality effects on water infiltration and soil loss. Arid. Soil Res. Rehab. 1992, 6: 311—317.

(上接第 9 页)