

基于元胞自动机的小流域侵蚀产沙模型研究

原立峰¹, 常春平², 张青峰³

(1. 南京邮电大学 电子信息科学系, 江苏 南京 210003; 2. 河北师范大学
资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050016; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 动态模拟和预测土壤侵蚀的发育及演化过程具有十分重要的意义。传统土壤侵蚀模型从本质上来说是一种稳态模型, 缺乏对土壤侵蚀发生、发展及演化过程的动态模拟能力。元胞自动机 (cellular automata, 简称 CA) 是一种“自下而上”的动态模拟建模框架, 具有模拟复杂地理系统时空演化过程的能力。利用元胞自动机理论和方法, 提出了将 CA 应用于土壤侵蚀过程模拟的基本思想。以黄土高原丘陵沟壑区小流域为例, 构建了基于元胞自动机的小流域侵蚀产沙过程模型。

关键词: 元胞自动机; 小流域; 侵蚀产沙模型

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)02—0085—05

中图分类号: S152.7

Soil Erosion and Sediment Yield Model in a Small Watershed Based on Cellular Automata

YUAN Li-feng¹, CHANG Chun-ping², ZHANG Qing-feng³

(1. Department of Electronics and Information Science, Nanjing University of

Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China; 2. College of Resources
and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang, Hebei 050016, China;

3. College of Resources and Environment, Northwest University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: It is very important to dynamically simulate and forecast the development and evolution of soil erosion processes. The traditional soil erosion model is a steady-state model, which is not good at dynamically simulating the initiation and development of soil erosion processes. Cellular automata (CA) is a “from down to up” dynamic modeling framework, being capable to simulate the spatial-temporal evolutionary process of a complex geographical system. A basic thought that CA is applied to simulate soil erosion processes is put forward using theory and method of CA. By taking the loess hill and gully region as an example, a process model of soil erosion in small watershed based on CA is constructed.

Keywords: cellular automata; small watershed; erosion and sediment yield model

1 前言

动态模拟和预测土壤侵蚀的发生、发展和演化过程对于深入认识土壤侵蚀机理, 定量评价侵蚀强度, 预测未来侵蚀发展状况, 优化水土保持工程措施布局等方面都具有十分重要的意义。以通用土壤流失方程 (USLE) 为代表的经验统计模型虽然具有形式简单, 使用方便等优点, 但这些模型仅仅对年侵蚀量作粗略估算, 难以模拟次降雨过程引起的流失情况; 尤其是模型缺乏对侵蚀物理过程的考虑, 其经验参数的适用范围有限, 模拟精度难以控制。随着经验统计模

型“先天性”缺陷的日益暴露, 人们不再满足于仅仅对多年平均侵蚀模数的估算, 逐渐将研究兴趣转向了对土壤侵蚀过程进行模拟和预测。基于侵蚀机理, 通过对降雨、径流作用下地形、地貌的演化来计算给定时段内的土壤侵蚀模数, 模拟侵蚀演化形态与格局, 成为侵蚀模型的发展趋势。

虽然物理过程模型较之经验统计模型来说, 成因清楚, 适用范围有一定拓展, 但总体上来说这些模型内部都是以质、能守恒定律为基础, 运用偏微分的手段来建立侵蚀产沙物理方程的, 由于现有的物理知识并不能够完整地描述复杂的侵蚀产沙过程, 所以这类

收稿日期: 2007-07-24

修回日期: 2007-10-18

资助项目: 南京邮电大学“攀登计划”项目 (N Y206075); 国家自然科学基金 (40301025); 国家科技攻关课题 (2005BA517A06)

作者简介: 原立峰 (1978—), 男 (汉族), 讲师, 山西省太原市人, 主要从事遥感技术和 GIS 应用研究。E-mail: yuanlifeng7833@126.com。

模型必须集成经验手段,进行参数标定。模型模拟程度越真实,其需要的参数输入量也就越大,这就不可避免地增加了模型应用的难度。土壤侵蚀模型的建立和完善,需要研究方法和建模手段的突破与创新。

元胞自动机 (cellular automata, 简称 CA) 作为研究空间复杂性现象的一个方法工具,具有模拟复杂地理系统时空演化过程的能力,国际上将 CA 应用于土壤侵蚀学科领域已有广泛研究。Simth^[1] 等人设计了一个元胞自动机模型模拟了地形侵蚀过程,并把结果同其它模型作了对比,展示了简单元胞自动机强大的模拟功能。Chase^[2] 开发了一个元胞自动机模型,利用简单的元胞规则定义,模拟了降雨溅蚀和坡面径流侵蚀过程。Murray 和 Paola^[3] 建立了一个用来模拟汇流过程的 CA 模型,在模拟现象的主要特征方面取得了成功。Favis—Mortlock^[4] 利用元胞自动机模拟了坡面细沟侵蚀发生、演化的基本形态和细沟间侵蚀演化所形成的地表几何形态,避免了传统坡面模型需要的大量参数标定。D. D. Ambrosio^[5] 等人基于元胞自动机开发了“SCAVATU”模型模拟了土壤水蚀过程,并将其应用于意大利南部卡拉布里亚区 Fiumara Armaconi 的一个小流域,取得了令人满意的效果。Wei Lou^[6] 等人利用 CA 模型模拟了降雨、入渗、侵蚀等地形演变过程,并开发了“LANDSAP”软件对侵蚀过程做了动态模拟。国内学者周成虎^[7] 等人在总结前人工作的基础上,提出了地理元胞自动机 (GeoCA) 模型,推动了 CA 模型在地学中的应用。陈建平^[8] 等人利用 GeoCA,建立了土地荒漠化动态演化预测模型,并对北京及邻区的土地荒漠化情况做出了对比分析,并提出一些有益建议。上述研究对于 CA 在土壤侵蚀研究中的应用起到了积极的促进作用。总体上来说,国内将 CA 模型应用于土壤侵蚀研究才刚刚起步,应用程度还比较浅,需要侵蚀学科领域内的专家给予必要的重视。本文利用 CA 理论和方法,提出将 CA 应用于小流域土壤侵蚀过程模拟的基本思想,以黄土高原丘陵沟壑区小流域为例,构建了基于元胞自动机的小流域侵蚀产沙过程模型——CASEM,对 CA 应用于土壤侵蚀过程模拟和建模进行了尝试性研究。

2 小流域土壤侵蚀过程 CA 模型

2.1 CA 的基本概念及原理

CA 是一种在时间、空间和状态上都离散的网格动力学模型^[8]。CA 最基本的组成单元就是元胞 (Cell)、元胞空间 (Lattice)、邻居 (Neighbor) 及规则 (Rule)。CA 可以视为由一个元胞空间和定义于该

空间的变换函数所组成。标准 CA 是一个四元组,可表示为: $A = \{d, S, N, f\}$ 。这里 A 代表一个 CA 系统; d 是一个正整数,表示 CA 的维数; S 是元胞有限离散的状态集合; N 表示一个所有邻居内元胞的组合 (包括中心元胞),即包含 n 个不同元胞状态的一个空间矢量,记为: $N = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$, n 是元胞的邻居个数, $s_i \in Z$ (整数集合), $i(1, \dots, n)$; f 表示将 S^n 映射到 S 上的一个局部转换函数。所有的元胞位于 d 维空间上,其位置可用一个 d 元的整数矢量 Z^d 来确定^[9]。

CA 的基本原理是利用大量元胞在简单规则下的并行演化来模拟复杂而丰富的宏观现象。该思想来源于复杂性科学的一个重要观点:局部规则导致系统宏观变化,即有序行为和自组织的出现。散布在规则格网中的每一个元胞取有限的离散状态,遵循同样的作用规则,依据确定的局部规则作同步更新。大量元胞通过简单的相互作用而构成动态系统的演化。不同于一般的动力学模型,CA 不是由严格定义的物理方程或函数来确定,而是由一系列简单的规则构成。凡是满足这些规则的模型都可以看作是 CA 模型。因此,确切地讲,CA 是一类模型的总称,或者说是一个方法框架。

2.2 建模思路

以分布式模型的建模思想为指导,以 CA 为核心,将流域按照规则格网元胞进行空间离散化,每个元胞都以一组参数来表示不同元胞特殊的地表下垫面状况,并以此作为流域侵蚀产沙的基本计算单元。将降雨引起的土壤侵蚀分成 2 个过程:一是土粒从土体中分离出来;二是分离出的土粒被冲走^[10]。因此,模型考虑分离和输移两种物理过程,每个元胞上的土壤侵蚀和泥沙输移遵循 Meyer 和 Wischmeier (1969) 提出的理论,即土壤侵蚀的输出量等于输入量与降雨径流产生的泥沙量之和,且输出总量不得超过降雨径流的输移能力。流域内径流分布,侵蚀与泥沙输移过程通过元胞及其邻居间的水、沙交换来实现,即在每一个元胞步长内,通过扣除每个元胞上的侵蚀量或加上沉积量不断更新元胞空间,从而实现流域侵蚀过程时空动态模拟。

2.3 模型假设

在黄土丘陵沟壑区内,由于黄土本身质地松软,抗蚀性差,一旦有侵蚀性降雨 (次降雨量 > 10 mm) 产生,大量的泥沙随径流进入沟道。研究表明^[11],该区内年侵蚀产沙量主要是由汛期 (一般为 6—9 月) 的几次大暴雨产生的,一次暴雨的降雨量有时可达到全年降雨量的 70%,侵蚀产沙量常常占年侵蚀产沙量的

40%~60%。因此,可以根据区内的降雨及侵蚀产沙特征假设植被截留、地表填洼和蒸散发对次暴雨产流的影响忽略不计,同时也不考虑地下径流的影响。

2.4 模型结构

CASEM 模型由正方形格网组成的元胞空间来对流域进行空间离散,其边界取自然流域边界(定值型);元胞邻居构型采用标准的 Moore 型邻居定义;

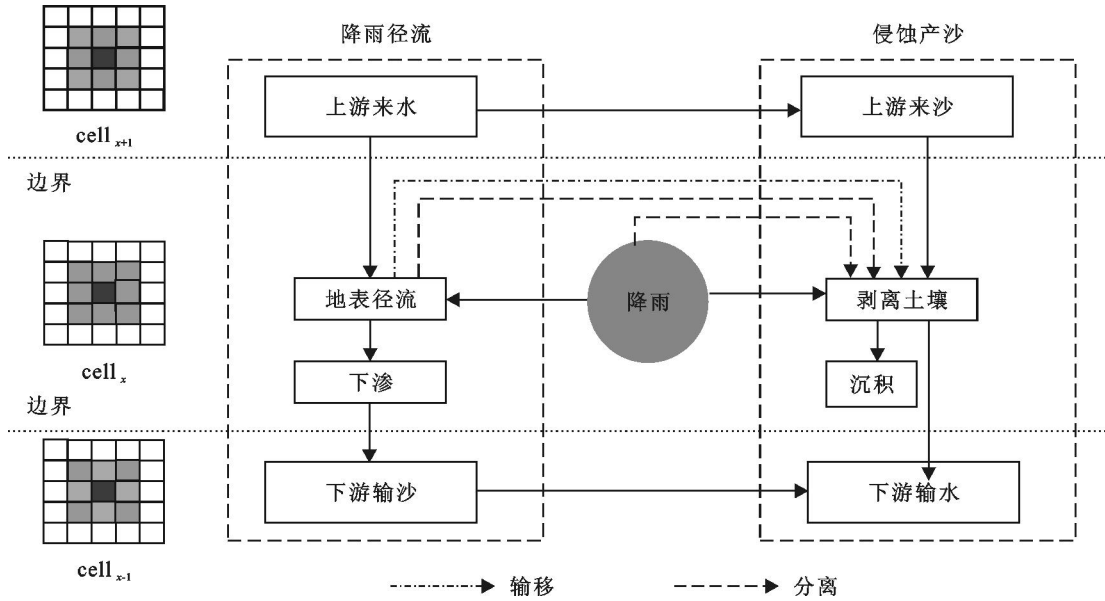


图 1 CASEM 模型结构框架

2.5 CASEM 模型演化规则

演化规则是 CASEM 模型的核心。模型的演化规则主要由降雨径流和侵蚀产沙两部分构成。在降雨径流规则中,主要的目的是推求地表产流量和为侵蚀产沙规则中的分离和输移计算提供输入参数。

2.5.1 降雨径流规则 降雨径流规则包括地表径流计算,地表汇流计算和单宽流速计算。

(1) 地表径流计算。采用美国农业部(USDA)土壤保持局提出的径流曲线数法(SCS)来计算地表产流量。本文将其经过参数修正后应用于黄土高原地区的地表产流计算。

SCS 径流曲线数(CN)方法基于如下假设:集水区的实际入渗量与实际径流量之比等于集水区该场降雨前的最大可能入渗量(或潜在入渗量)与最大可能径流量(或潜在径流量)之比,即

$$\frac{F}{Q} = \frac{S}{Q_m} \quad (1)$$

式中: F ——实际入渗量(mm); Q ——实际径流量(mm); S ——潜在入渗量(mm); Q_m ——潜在径流量(mm)。假定潜在径流量 Q_m 是降雨量 P 与初期损失 I_a (包括地面洼地蓄水、植物截留、蒸发和入渗)之差,即

元胞的状态变量包括核心变量和辅助变量 2 个部分,核心变量有:流量和高程;辅助变量影响核心变量的改变,包括元胞演化规则中涉及到的各种参数。CASEM 模型将元胞状态定义在一个连续的实数空间上,其状态变量是多维的和连续的。元胞演化规则由 2 大部分构成,一是降雨径流规则,二是侵蚀产沙规则。CASEM 模型的整体结构框架见图 1。

$$Q_m = P - I_a \quad (2)$$

实际入渗量为降雨量减去初损和径流量,即

$$F = P - I_a - Q \quad (3)$$

由公式 1—3 可以得出

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{S + P - I_a} \quad (4)$$

式中: I_a 是变化的,但根据许多天然小流域资料,可以用下面的经验公式近似确定

$$I_a = 0.2S \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4),可消去 I_a ,得

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (P > 0.2S) \quad (6)$$

式中:如果 $P < 0.2S$,则 $Q = 0$;参数 S 通过径流曲线数 CN 与土壤和流域覆盖条件建立关系,CN 的范围从 30 到 100, S 与 CN 的关系为

$$S = 254 \left[\frac{100}{CN} - 1 \right] \quad (7)$$

由公式(7)可知,CN 值越大, S 值越小,就越易产生径流;反之,则相反。

(2) 地表汇流计算。在地表汇流计算中,采用 D_8 算法对水流方向进行模拟。每个元胞上的径流量遵循水量连续平衡方程,即每个元胞在 t 时刻的径流量可以表示为

$$\frac{dQ}{dt} = Q_i - Q_0 \quad (8)$$

式中: Q ——当前元胞中的水量; t ——时间; Q_i ——进入当前元胞的水量; Q_0 ——流出当前元胞的水量, Q_i 包括降雨量和邻居元胞流入当前元胞的水量之和, 可表示为

$$Q_i = Q_{\text{center}} + \sum_{n=1}^k Q_{\text{up}} \quad (9)$$

式中: Q_{center} ——当前元胞的降雨产流量; k ——上游邻居元胞的数目; $\sum_{n=1}^k Q_{\text{up}}$ 为周围相邻元胞流入当前元胞的流量。流出元胞单元的水量包括下渗量和进入下游邻居元胞的水量, 可表示为

$$Q_0 = F + \sum_{n=1}^k Q_{\text{down}} \quad (10)$$

式中: F ——下渗量; $\sum_{n=1}^k Q_{\text{down}}$ ——进入下游元胞流量。

在确定水流方向后, 再利用上面提到的水量平衡原理就可以通过程序逐级递归, 计算出每个元胞的汇流数, 直至将所有汇入当前元胞的汇流单元都计算完毕, 再根据汇流数目的大小及汇流方向就可以确定元胞空间的水流汇集主流路。据此, 计算机可自动生成基于元胞单元的水流汇集网络图, 使小流域的各个元胞单元成为一个有机联系的系统。流域中坡面系统和沟道系统的地表径流通过生成的水流汇集网络联系起来计算, 可确定流域在空间离散的各元胞上的汇流过程。

(3) 单宽流速计算。地表单宽流速的计算主要是为后面的侵蚀产沙计算提供参数。单宽流速是指水流通过单位宽度横断面的流速, 单位为 m^2/min 。元胞单元上的地表水流, 其过水断面为矩形, 因此, 单宽流速是地表径流流速与水深的乘积, 即

$$q = V \times h \quad (11)$$

式中: q ——单宽流速 (m^2/min); V ——地表径流流速 (m/s); h ——每个元胞上的水深 (mm)。其中, 地表径流流速采用曼宁公式计算

$$V = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式中: n ——曼宁糙率系数, 根据流域下垫面和土地利用类型选取相应的值; S ——坡度比降; h ——元胞上水深, 即每个元胞上的流量除以元胞面积。

2.5.2 侵蚀产沙规则

(1) 地表侵蚀产沙。

侵蚀分离。在 CASEM 模型中, 对于土壤分离的计算, 不再区分雨滴击溅分离和降雨径流分离, 而是直接采用修正的土壤流失模型 RUSLE 方程来计算每一个元胞在次暴雨下的侵蚀分离量。RUSLE

模型的基本形式如下

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (13)$$

式中: A ——土壤年侵蚀量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$]; R ——降雨侵蚀因子; K ——土壤可蚀性因子; L ——坡长因子; S ——坡度因子; C ——作物管理因子; P ——土壤侵蚀防治措施因子。

泥沙输移。输移能力主要是指水流将泥沙向下游输送的能力。CASEM 模型采用 Beasley^[12] 等人基于改进后的 Yalin (1963) 公式并结合 Foster 和 Meyer 公式由大量数据推导出的以下计算公式

$$T_{RF} = 161 S q^{0.05}, \quad q \leq 0.046 \text{ m}^2/\text{min} \text{ 时} \quad (14)$$

$$T_{RF} = 16320 S q^2, \quad q > 0.046 \text{ m}^2/\text{min} \text{ 时} \quad (15)$$

式中: T_{RF} ——输移能力; S ——坡度比降; q ——单宽流量, 采用降雨径流公式 (11) 的计算值。

(2) 泥沙沿程演进。被侵蚀的土壤颗粒被水流挟带, 经由坡面、沟道、支流、干流汇集到流域出口断面, 构成流域产沙量, 但并不是所有侵蚀的土壤颗粒全部都能到达出口断面, 在汇集过程中, 部分甚至有可能大部分土壤颗粒会沉积在坡脚、沟谷中, 从而使到达出口断面的产沙量小于流域的侵蚀量。

泥沙汇集过程是随水流的运动过程, 与水流类似, 元胞上的泥沙量满足物质平衡方程

$$\frac{dW}{dt} = W_i - W_0 \quad (16)$$

式中: W ——当前元胞产沙量; t ——时间; W_i ——流入元胞的泥沙量; W_0 ——流出元胞的泥沙量。

在 CASEM 模型中, 由于侵蚀产沙过程是发生在每个元胞上的, 所以我们很容易反映泥沙的这种动态平衡关系, 并获得泥沙演进的沿程路径。因为各个元胞上的泥沙来源于降雨和径流的分散量, 以及上坡元胞来沙量, 将元胞上的泥沙量与输移能力比较, 如果可供沙量小于输移能力, 则可供沙量成为限制因子, 那么带到下坡元胞的泥沙量就等于当前元胞的现有泥沙量; 反之, 如果可供沙量大于输移能力, 则输移能力成为限制因子, 产沙量就等于输移能力, 并伴随元胞内泥沙淤积。基于这种思想可以实现泥沙从上游到下游, 从坡上部到坡下部, 直至流域出口泥沙量的计算和泥沙沿程演进的全过程。

3 结论

土壤侵蚀的发生、发育及演化过程是一个非常复杂的现象, 具有极大的不确定性和混沌特征, 虽然存在一定的规律, 但要通过数学模型精确预测它们的发展变化则是非常困难的。CA 提供了研究这一现象的有力工具。本文对于将 CA 理论和方法应用到黄

土高原丘陵沟壑区小流域土壤侵蚀过程模拟和建模进行了尝试性研究,构建了基于 CA 的侵蚀产沙过程模型——CASEM。该模型具有结构简单,动力机制明晰,模拟规则简单,所需输入参数少等优点。本研究仅仅是一个开始,下一步的工作将包括:(1)模型验证。(2)将模型同遥感和 GIS 技术、数据挖掘、模糊推理等紧密集成,建立智能化的土壤侵蚀过程模拟及侵蚀评价专家系统。(3)使 CA 在模拟侵蚀过程中自动调整模型参数和演化规则,实现侵蚀模型在时空尺度上的自由转换。

[参 考 文 献]

- [1] Smith R. The application of cellular automata to the erosion of landforms [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1991, 16:273—281.
- [2] Chase C G. Fluvial land sculpting and the fractal dimension of topography [J]. *Geomorphology*, 1992, 5:39—57.
- [3] Murray A B, Paola C. A cellular model of braided rivers [J]. *Nature*, 1994, 371, 54—57.
- [4] Favis-Mortlock D T, Quinton J N, Dickinson W T. The GCTE validation of soil erosion models for global change studies[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51(5):397—403.
- [5] Ambrosio D D, Gregorio S Di, Gabriele S, et al. A Cellular Automata Model for Soil Erosion by Water [J]. *Phys. Chem. Earth (B)*, 2001, 26(1):33—39.
- [6] Lou Wei. LANDSAP: a coupled surface and subsurface cellular automata model for landform simulation [J]. *Computer & Geosciences*, 2001, 27:363—367.
- [7] 周成虎,孙战利,谢一春.地理元胞自动机研究[M].北京:科学出版社,1999.
- [8] 陈建平,丁火平,王功文,等.基于 GIS 和元胞自动机的荒漠化演化预测模型[J].*遥感学报*,2004,8(3):254—260.
- [9] 孙战利.空间复杂性与地理元胞自动机模拟研究[J].*地球信息科学*,1999:32—37.
- [10] 黄秉维.谈黄河中游水土保持问题[J].*中国水土保持*,1988(1):12—15.
- [11] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀产沙和黄河输沙[M].北京:科学出版社,1996.
- [12] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning [J]. *Transaction of the ASCE*, 1981, 23(4):938—944.
- (上接第 53 页)
- [5] Chatzoudis G K, Rigas F. Macro reticular hydrogel effects on dissolution rate of controlled-release fertilizers [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, 46: 2830—2833.
- [6] Taylor K C, Halfacre R G. The effect of hydrophilic polymer on media water retention and nutrient availability to *ligustrum lucidum* [J]. *Hort Science*, 1986, 21(5):1159—1161.
- [7] Zhan Falu, Liu Mingzhu, Guo Mingyu, et al. Preparation of superabsorbent polymer with slow release phosphate fertilizer[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 92: 341—342.
- [8] Guo Mingyu, Liu Mingzhu, Hu Zheng, et al. Preparation and properties of a slow release N P compound fertilizer with superabsorbent and moisture preservation [J]. *Journal of Applied Polymer*, 2005, 96(6):2132—2138.
- [9] 员学锋,汪有科,吴普特. PAM 对土壤物理性状影响的实验研究及机理分析[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 37—40.
- [10] 张富仓,康绍忠. BP 保水剂及其对土壤与作物的效应[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(4):74—78.
- [11] Ben-Hur M, Keren R. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation[J]. *Soil Science. Soc. Am.* 1997, 61:565—570.
- [12] El-Amir S, Helalia A M, Shwaky M E. Effects of acryhope and aquastore polymers on water regime and porosity in sandy soil[J]. *Egyptian Journal of Soil Science*, 1993, 33(4):395—404.
- [13] Mikkelsen L R. Using hydrophilic polymers to control nutrient release[J]. *Fert. Res*, 1994, 38: 53—59.
- [14] 北京农业大学树脂应用协作组.高吸水性树脂在农业上的应用基础研究[J].*北京农业大学学报*, 1989, 15(1):37—44.
- [15] 龙明杰,张宏伟.高聚物土壤结构改良剂的研究[J].*土壤肥料*, 2000(5):13—18.
- [16] 吴增芳.土壤结构改良剂[M].北京:科学出版社, 1976.
- [17] 陈宗淇,张玉荣,曾利容.聚丙烯酰胺对蒙脱土絮凝的研究[J].*化学学报*, 1981, 39(7):672—676.
- [18] 侯万国,张春光,王果庭.聚丙烯酰胺对黏土悬浮体的絮凝与稳定作用[J].*高等学校化学学报*, 1989, 10(8): 848—858.
- [19] Van Olphell H 著,许冀泉,等译.黏土胶体化学导论[M].北京:农业出版社,1982:171—176.
- [20] 张庆忠,陈欣,沈善敏.农田土壤硝酸盐积累与淋失研究进展[J].*应用生态学报*, 2002(13):233—238.
- [21] 杜建军,苟春林,崔英德,等.保水剂对氮肥氨挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J].*农业环境科学报*, 2007, 26(4):1296—1301.