

不同浓度浑水入渗试验研究

孙存喜, 吴发启, 王健, 刘庆新

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 黄土高原地区暴雨径流形成高含沙浑水, 其入渗特点直接影响着坡面产流产沙, 探求不同浓度浑水入渗规律, 对于坡面土壤侵蚀机理研究具有指导意义。以清水入渗为对照, 试验测定了不同浓度浑水入渗特征、入渗过程和浑水减渗率等项目。分析结果表明, 第 1 min 末的入渗速率、稳定入渗速率和累积入渗量均随浑水浓度增加呈指数函数关系递减, 而减渗率随浑水浓度增加呈对数函数关系递增。两种关系均随着浓度增加呈稳定趋势。清水的累积入渗量在相同时段内始终最大, 随着泥沙浓度增加, 累积入渗量减小, 说明浑水具有阻渗作用。

关键词: 浑水入渗; 特征值; 减渗率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)04-0057-04

中图分类号: S152.7⁺²

Experimental Studies on Muddy Water Infiltration with Different Concentrations

SUN Cun-xi, WU Fa-qi, WANG Jian, LIU Qing-xin

(College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Muddy water with high concentration often occurs in rainstorms on the Loess Plateau, which directly influences runoff and sediment yield on slope. Knowledge of muddy water infiltration with different concentrations is important to the study of soil erosion on slope. By taking clean water as control, infiltration characteristics, infiltration processes, and infiltration decay ratio of muddy water with different concentrations were measured. Results showed that the infiltration rate at the end of first second, the stable infiltration rate, and the cumulative infiltration amount decreased exponentially with mud concentration, while the infiltration decay ratio increased logarithmically with mud concentration. The two relationships appeared steady as mud concentration increased. In the same time interval, the cumulative infiltration amount of clean water was always the highest, but decreased as mud concentration increased. Muddy water had a decreasing effect on infiltration.

Keywords: muddy water infiltration; characteristic value; infiltration decay ratio

入渗是一个非常复杂的动态过程, 浑水入渗尤其特殊, 浑水中泥沙浓度的大小对入渗过程有很大的影响。国内外学者认为, 土壤的质地、结构、含水量、有机质、结皮、含盐量、温度及地下水埋深等都影响着大田土壤水分入渗^[1]。

王文焰^[2]研究认为, 在泥沙颗粒组成一定的情况下, 浑水的入渗能力随着水流含沙量的增大而逐渐减小。白丹等^[3]认为浑水中物理性黏粒含量越大, 累积入渗量就越小。樊惠芳等^[4]研究了浑水膜缝入渗, 建立了清水和浑水的入渗模型。王进鑫等^[5]研究了人工林地浑水入渗性能, 并建立了 3 种林分积水型浑水与清水入渗的通用模型。

然而, 针对黄土高原地区暴雨径流形成的高含沙浑水入渗规律的研究比较少。

黄土高原地区, 植被稀少, 土质疏松, 水土流失严重, 夏秋多雨季节暴雨集中, 极易形成地表高含沙径流, 地表高含沙径流的冲刷和入渗就成为黄土高原地区普遍存在的现象。地表含沙径流的入渗实质就是自然界形成的典型浑水入渗过程, 随暴雨强度和历时的不同而发生不同的变化。本研究以清水入渗作为对照, 通过双环法测定不同浓度浑水入渗的特征值和减渗率等指标, 进一步探讨了不同浓度浑水的入渗规律, 为深入探讨黄土高原地区土壤侵蚀发生机理及生态环境建设提供科学依据。

收稿日期: 2008-10-20

修回日期: 2009-03-10

资助项目: 国家“973”计划项目(2007CB407201); 陕西省青年基金项目(2007D13)

作者简介: 孙存喜(1969-), 男(汉族), 陕西省富平县人, 硕士研究生, 主要从事流域管理方面的研究。E-mail: scx5526165@sina.com。

通信作者: 吴发启(1957-), 男(汉族), 陕西省黄陵县, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与流域管理方面的研究。E-mail: wufaqi@263.net。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西省合阳县甘井镇大田内,地处陕西省渭北旱塬东部的黄河之滨,地理坐标位于 $34^{\circ}59' - 35^{\circ}26' N$, $109^{\circ}58' - 110^{\circ}27' E$,地势西北高东南低,呈倾斜状。该区位于黄龙山下,海拔 $800 \sim 1\,543.2$ m,年平均气温 10.5 $^{\circ}C$,年平均降水 596.3 mm,全年降水的 54.7% 集中在 7—9 月,属暖温带半干旱型大陆性季风气候。土壤侵蚀模数 $800 \sim 1\,000$ $t/(km^2 \cdot a)$ 。

1.2 试验区土壤基本物理性质

供试区土壤以垆土和半垆土为主,试验区土壤耕层深度一般为 $20 \sim 25$ cm,质地为半垆土,平均容重 1.29 g/cm^3 ,有机质平均含量为 8.39 g/kg 。采集的土样经自然风干后,过 1 mm 孔径的土筛后利用沉降法对土壤进行颗粒分析^[6],如表 1 所示。

表 1 供试区土壤的粒径组成

范围/mm	$0 < 0.002$	< 0.02	< 0.2	< 2	> 2
体积含量/%	3.96	47.21	44.19	4.64	0.00

1.3 供试水样

入渗水样分清水和浑水两种,清水作为对照(CK)。其中浑水的具体配置方法为:采集试验区耕层内($0 \sim 20$ cm)的土壤样品,混合均匀,风干,过 1 mm 筛,用烘箱在 105 $^{\circ}C$ 下烘干 $8 \sim 10$ h,用来配置浑水溶液。

浑水溶液浓度配置采用体积含量配置,即每立方米浑水中含有多少公斤泥沙。试验设计了 13 种浓度,分别为: 0 (清水), $10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 200, 300, 400$ 和 500 kg/m^3 。实验设计 2 个重复。

1.4 试验方法

入渗试验仪器采用双环入渗仪,双环高 35 cm,内环直径 30 cm,外环直径 60 cm,如图 1 所示。内环为入渗环,外环为保护环,配置溶液采用人工搅动。

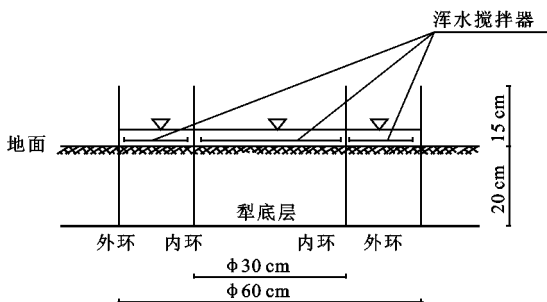


图 1 自制入渗双环示意图

供试大田是夏季休闲农田经过整地,休闲两个月以上,经过几场降雨,土壤的容重基本达到稳定之后开始试验。为了保证在等同条件下进行试验,采用人工灌水方式使在土壤含水量相同的情况下进行试验。先将地面整平,去除杂物,然后将双环平稳打入土中,下环深度 20 cm (到达犁底层),再人工灌等量的清水。具体做法在试验开始做之前 $5 \sim 6$ h 左右,对每一个预埋于试验小区域的双环进行人工灌等量清水,待内外环无明显表面积水时即可开始做入渗试验。即土壤含水量接近田间持水量的情况下进行不同浓度的浑水入渗试验,实地测得平均含水量为 22% , (测定方法为烘干法),各个试验含水量的平行误差均在 5% 以内,可消除水分等偶然因素对入渗的影响,提高试验准确性。

为了防止添加浑水时击溅打击环内土壤而引起浓度变化,在实验开始前,在环内平铺一层 2 cm 厚,直径 $2 \sim 5$ mm 的粗沙,同时在沙层上铺设孔径 2 mm \times 2 mm 的钢制沙网,保护沙层免受扰动。采用定量加水计时测量法。在整个试验过程中不停地人工搅动内环中的入渗水样,以免水样中泥沙的大量沉淀而影响实验效果^[7],同一实验重复 3 次取平均值。

2 结果与分析

2.1 不同浓度浑水入渗试验特征值分析

图 2 为大田土壤清水入渗过程。结果表明,大田土壤的清水入渗过程在 60 min 以后逐步趋于稳定,到 100 min 达到稳定。浑水入渗达到稳渗的时间比清水早,并且浓度越大达到稳渗的时间越早。解文艳等^[8]选择 90 min 累积入渗量作为反映土壤入渗能力的指标。为便于研究,本试验选择 100 min 内的入渗量作为反映土壤浑水入渗能力的参数进行分析。

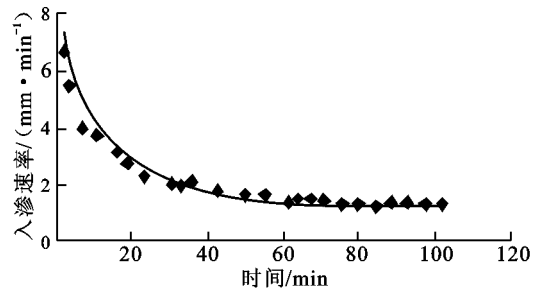


图 2 清水入渗过程

第 1 min 末入渗率、稳定入渗率和 100 min 时的累积入渗量是反映土壤入渗能力的重要参数。本研究以此 3 个参数作为土壤入渗特征值,并分析其与浑水浓度的关系。

2.1.1 第1min末入渗率变化分析 拟合浑水浓度与第1min末入渗率的关系,如图3所示。结果表明,浑水浓度和第1min末入渗率之间呈指数函数关系,关系式为:

$$y = 6.1572e^{-0.0032x} \quad (1)$$

式中: x ——表示浑水浓度; y ——第1min末的入渗率。

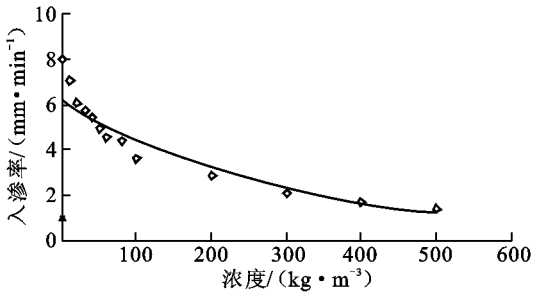


图3 浑水浓度与第1min末入渗率关系

由图3看,随着浑水浓度的增加,第1min末入渗率呈递减趋势,两者关系较好,复相关系数(r^2)达到0.9422。说明在其它条件不变条件下,浑水浓度对第1min末入渗率有显著影响。在最初浑水浓度较小时,第1min末入渗率递减较快,随着浑水浓度增大,第1min末入渗率递减减慢,大约在浓度超过300 kg/m³后,第1min末入渗率基本趋于稳定。

2.1.2 稳定入渗率变化分析 拟合浑水浓度与稳定入渗率关系,如图4所示。结果表明,浑水浓度和稳定入渗率之间呈指数函数关系,关系式为:

$$y = 0.8051e^{-0.0044x} \quad (2)$$

式中: x ——浑水浓度; y ——稳定入渗率。

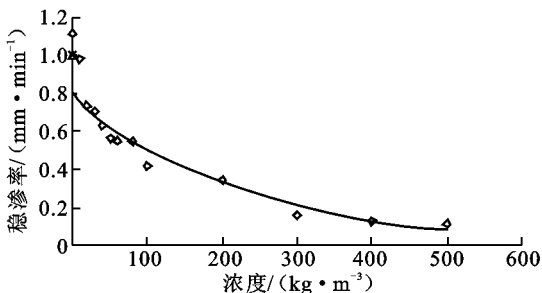


图4 浓度和稳定入渗率关系

从图4看出,随着浑水浓度的增加,不同浓度浑水的稳定入渗速率呈递减趋势,复相关系数(r^2)达到0.9396。从拟合曲线走势看,最初浑水浓度较小时,稳定入渗率递减较快,随着浑水浓度增大,稳定入渗率递减趋势减慢,浑水浓度约在300 kg/m³后,趋势趋于稳定。浑水浓度较大时,浑水中的泥沙颗粒以由大到小次序迅速沉淀,在入渗土体表面形成沉积层。

随着浑水中泥沙浓度不断增大,泥沙沉积作用也越强,沉积的泥沙量也越大,土体表面沉积层的密实度不断增加,对水分下渗的阻碍作用越强,土壤导水率越低,其稳定入渗率也越来越小^[9-10]。虽然在入渗过程中人工不停地搅动,但这种作用对于低浓度浑水入渗效果较好,但对高浓度入渗来说,所起的作用会越来越小。

2.1.3 累积入渗量的特征分析 拟合浓度和100min时的累积入渗量关系,如图5所示。结果表明,浑水浓度和累积入渗量之间呈指数函数关系,关系式为:

$$y = 143.81e^{-0.0044x} \quad (3)$$

式中: x ——浑水浓度; y ——累积入渗量。

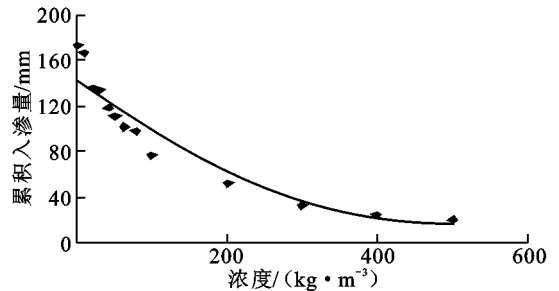


图5 浑水浓度与累积入渗量关系

图5表明,随着浑水浓度的增加,不同浓度浑水的累积入渗量呈递减趋势,复相关系数(r^2)达到0.9637。还可以看出,随着浑水浓度的增加,从清水到小浓度浑水的累积入渗量变化比较快,说明清水中含有泥沙后的累积入渗量减少较快,以后趋势逐渐变缓。当浑水浓度大约在超过300 kg/m³后,累积入渗量的变化趋于稳定。

2.2 不同浓度的浑水含量对入渗能力的影响

浑水可较大地消减水分入渗速率,王进鑫^[7]用浑水的减渗率来研究浑水浓度对入渗能力的影响。若以清水为对照,则浑水减渗率(η_n)可由下式表示:

$$\eta_n = \frac{I_0 - I_n}{I_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: η_n ——浑水浓度为 n 时的减渗率(%); I_0 ——历时100min的清水累积入渗量(mm); I_n ——历时100min的浑水累积入渗量(mm)。由公式(4)求出不同浑水浓度条件下的减渗率。分析不同浑水浓度与减渗率关系,如图6所示。

从图6知,浑水浓度对土壤入渗量有明显影响,随着浑水浓度的增加,减渗率数值逐渐增大,并呈现显著的对数函数关系,关系式为:

$$y = 22.58 \ln x - 50.089 \quad (5)$$

式中: y ——减渗率; x ——浑水浓度; 复相关系数(r^2)为0.9898。

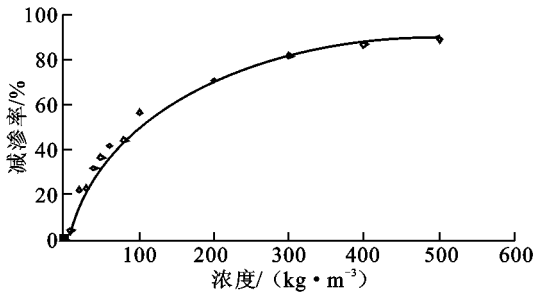


图 6 浑水浓度与减渗率关系

从曲线来看,刚开始的减渗率变化最快。即与清水对照,当由清水被处理为 20 kg/m^3 的浑水时,土壤入渗总量减少了近 22%,说明泥沙对入渗有很大影响。这仍然是由于浑水中含有泥沙时,泥沙沉积在入渗土壤表面形成一个沉积层,改变了土壤表面的机械组成^[10-11],影响了土壤的入渗过程。而且浑水中小的颗粒随着下渗水流涌入土体,随着浑水浓度增加,其数量也在增加,容易堵塞下渗通道,使入渗量减少。

浑水中细小的颗粒沉积在入渗土体的表面,易形成光滑的致密层,致密层的形成与发展改变了土体入渗的上边界条件及形状^[10];随着浑水浓度增加,致密层的密度在增加,孔隙度减少,导水能力明显降低。即不同含沙径流的入渗能力,将主要受控于相应含沙径流所形成的表土致密层的形状^[12]。

随着浑水浓度的增加,各个浓度对应的减渗率数值逐渐增大,减渗效果越来越强。当浑水浓度增加到 100 kg/m^3 时,减渗率达到 56.50%,即该浓度对应的入渗量比清水入渗量的一半还少。当泥沙含量达到 200 kg/m^3 时,入渗水量已经减少 70% 还多。当浑水浓度超过约 300 kg/m^3 后,浓度的变化引起的入渗量变化已经很小了。

2.3 不同浓度浑水累积入渗过程分析

比较 13 种浑水浓度的累积入渗量,表 2 所示。每个浑水浓度的入渗速率曲线均呈幂函数关系,并且相关性较好,复相关系数(r^2)均在 0.9 以上。

13 种浑水浓度的累积入渗量过程曲线如图 7 所示。从图中可知,清水的累积入渗量曲线始终位于最上面,在土壤入渗过程中,清水的累积入渗量始终最大。相同入渗时间内,含沙量较小的浑水入渗累积曲线始终位于含沙量较大的曲线之上,说明相同入渗时间内,含沙量小的浑水累积入渗量始终比含沙量大的浑水累积入渗量大。随着浑水泥沙含量增加,其累积入渗量曲线与清水的累积入渗量曲线分离得越早,且与清水曲线的距离越远。这是由于泥沙含量越大的浑水,入渗时在入渗土体表面形成的沉积层越厚,对

浑水入渗的阻碍越大,在相同的入渗时间内进入土壤的累积入渗量越少,在图中的累积入渗量曲线就越靠近下部。

表 2 不同浓度浑水入渗方程的特征值

序号	浓度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	拟合方程	r^2
1	清水(0)	$y = 0.7977x^{-0.4388}$	0.9837
2	10	$y = 0.6754x^{-0.4284}$	0.9551
3	20	$y = 0.6039x^{-0.4371}$	0.9001
4	30	$y = 0.5543x^{-0.4299}$	0.9240
5	40	$y = 0.5496x^{-0.4408}$	0.9000
6	50	$y = 0.4766x^{-0.4455}$	0.9013
7	60	$y = 0.4487x^{-0.4352}$	0.9043
8	80	$y = 0.4184x^{-0.4260}$	0.9001
9	100	$y = 0.3824x^{-0.4505}$	0.9019
10	200	$y = 0.3567x^{-0.4883}$	0.9109
11	300	$y = 0.3303x^{-0.5429}$	0.9077
12	400	$y = 0.3094x^{-0.5843}$	0.9288
13	500	$y = 0.2533x^{-0.5774}$	0.9703

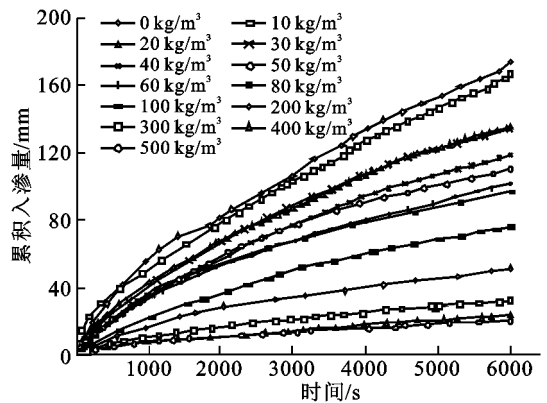


图 7 不同浑水浓度累积入渗过程

3 结论与讨论

(1) 浑水对入渗过程有明显的阻碍作用,浑水有显著的阻渗作用。第 1 min 末的入渗速率、稳定入渗率和 100 min 时累积入渗量 3 个特征值都随浑水浓度的增大而减小,均呈指数函数关系。且当浑水浓度超过约 300 kg/m^3 后,3 个特征值随浑水浓度的增加基本趋于稳定。

(2) 浑水浓度和减渗率之间呈显著的对数关系。随着浑水浓度的增加,减渗率的增加逐渐减缓。当浑水浓度超过约 300 kg/m^3 后,减渗率随着浓度的增加基本趋于稳定。

(下转第 83 页)

表3 不同处理下土壤蒸发昼夜变化

g

处理	2007年8月19日(晴天)			2007年8月21日(阴天)		
	白天蒸发量	夜间蒸发量	蒸发总量	白天蒸发量	夜间蒸发量	蒸发总量
CK	326.0	56.0	382.0	192.0	52.0	244.0
砾石覆盖	255.3	30.7	286.0	176.0	28.0	204.0
干草覆盖	180.0	26.7	206.7	168.0	31.0	199.0

4 结论

沙砾覆盖明显减少了土壤蒸发,不同粒径沙砾覆盖的土壤蒸发量不同,粒径越小,土壤蒸发越少,粒径2~4 mm处理的土壤蒸发仅为对照处理的81%。覆盖砾石可以减少土壤蒸发,5个处理中,对照土壤蒸发量最高。

不同程度的干草覆盖起到了很好的蓄水保墒作用,在蒸发过程中,没有任何覆盖的裸土累积蒸发量最大,其中100%盖度干草覆盖对土壤蒸发的抑制最大,可达48%。砾石、干草覆盖能有效地抑制土壤蒸发,相比对照而言,整个蒸发过程中,干草覆盖比砾石更能有效抑制土壤水分蒸发。

[参 考 文 献]

[1] 王改玲,郝明德,李仲谨.不同覆盖物和蒸发抑制剂对

土壤蒸发影响的研究初报[J].水土保持研究,2003,10(1):134.

- [2] 周凌云.秸秆覆盖对农田土壤物理条件影响的研究[J].农业现代化研究,1997,18(5):311-314.
- [3] 王荣堂,张竹青,王有宁.地膜覆盖对蒸腾蒸发的影响[J].湖北农学院学报,2002,22(2):101-103,114.
- [4] 门旗,李毅,冯广平.地膜覆盖对土壤棵间蒸发影响的研究[J].灌溉排水学报,2003,22(2):17-25.
- [5] 李旭辉,李立科,赵二龙,等.开发渭北旱塬农田蒸发水新技术[J].水土保持研究,2007,14(3):235-236.
- [6] 王进鑫,刘广全,王迪海.局部覆盖条件下土壤水分移动性能与蒸发力的关系[J].水土保持学报,2004,18(4):143-145.
- [7] 王进鑫.新型保墒材料对黄绵土水分运移的作用机制研究[J].西北林学院学报,2000,15(1):20-26.
- [8] 杨连利,李仲谨,邓娟利.保水剂的研究进展及发展新动向[J].材料导报,2005(6):42-44.

(上接第60页)

(3) 不同浑水浓度条件下的入渗速率曲线均符合幂函数关系。含沙量小的浑水始终比含沙量大的浑水累积入渗量大。浑水泥沙含量越大,其累积入渗量曲线与清水的累积入渗量曲线分离的越早,且与清水曲线的距离越远。

[参 考 文 献]

- [1] 李雪转,吴争兵.影响土壤入渗能力因素分析[J].山西水利,2006(4):69-71.
- [2] 王文焰,张健丰,王全九,等.黄土浑水入渗能力的试验研究[J].水土保持学报,1994,8(1):59-62.
- [3] 白丹,李占斌,洪小康,等.浑水入渗规律试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):59-62.
- [4] 樊惠芳,罗碧玉.浑水膜缝入渗规律试验研究[J].杨凌职业技术学院学报,2003,2(4):4-6,21.
- [5] 王进鑫,黄宝龙,王迪海.人工林地入渗性能与通用模型

[J].生态学报,2004,24(12):2841-2847.

- [6] 张振华,杨润亚,蔡焕杰,等.土壤质地、密度及供水方式对点源入渗特性的影响[J].农业系统科学与综合研究,2004,20(2):81-84.
- [7] 王进鑫,黄宝龙.人工林地含沙径流的入渗特性研究[J].中国水土保持科学,2004,2(2):74-79.
- [8] 解文艳,樊贵盛.土壤质地对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(5):537-540.
- [9] 费良军,王文焰.泥沙粒度组成对浑水间歇入渗特性的影响研究[J].农业工程学报,1999,15(1):139-143.
- [10] 王全九,王文焰,邵明安,等.浑水入渗机制及模型研究[J].农业工程学报,1999,15(1):135-138.
- [11] 王文焰.波涌灌溉试验研究与应用[M].西安:西北工业大学出版社,1994:73-80.
- [12] Ahuja L R. Applicability of the green and ampt type model for infiltration through surface crust[J]. Soil Sci., 1974, 118: 283-288.