

降水入渗及土壤水分变化对产流过程影响研究进展

赵娜娜, 于福亮, 李传哲, 王浩

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 在概括和总结土壤水分入渗过程的研究概况的基础上, 从初始土壤含水率土壤水分的空间变异性及水文模型中土壤水分数据的应用等三个方面讨论了土壤水分变化对降雨产流过程的影响研究进展, 对土壤水分变化及降水产流过程研究中存在的问题及研究方向进行了概括和总结; 土壤水分的时空变异性研究是当前流域降水产流及水文模拟研究中的热点和难点, 而通过不同的试验观测和模拟方法来分析土壤水分的实时动态变化过程及对壤中流、优先流等产流的响应也是未来水文学研究的重点。

关键词: 土壤水分; 降水产流; 初始土壤含水率; 空间变异; 水文响应

中图分类号: S152; TV93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0111-05

Review on Effects of Rainfall Infiltration and Soil Moisture Variation on the Rainfall Runoff Process

ZHAO Nana, YU Fuliang, LI Chuangzhe, WANG Hao

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the current research situation of soil water infiltration characteristics, the research progress of impacts of soil moisture variation on rainfall runoff was discussed from three aspects, including the initial moisture content, spatial variation of soil moisture, and application of soil moisture data in hydrological model. The existing problems and research direction of soil moisture variation and rainfall runoff were discussed. The spatial and temporal variations of soil moisture were the hot and important research topics in the study of rainfall runoff and its model simulation. The real time variation of soil moisture obtained from different experimental measurements and model simulations and its response to subsurface flow and preferential flow are the important research aspects in future hydrology study.

Key words: soil moisture; rainfall runoff; initial soil moisture content; spatial variation; hydrological response

由于全球气候变化和人类活动影响的加剧, 全球水文循环过程受到扰动, 土壤水作为水文循环的重要组成部分越来越受到国内外学者的重视, 成为水文学科研究的重点内容之一。土壤水主要来源于大气降水(或灌溉水)入渗补给或地下潜水蒸发, 在包气带中储存分布, 是地表水和地下水之间相互联系的重要纽带, 在水资源的形成、转化和消耗过程中具有重要的作用^[1]。

一场降水是否产流是由降雨强度、历时、土壤含水率、土壤物理特性、土体构型、植被覆盖状况等几个关键因素决定的。霍顿产流理论认为, 产流受控于两个基本物理条件: 一是降雨强度超过土壤入渗容量, 二是包气带土壤含水量超过田间持水量, 即土壤含水量的变化与降水产流机制及降水产流过程密切相关。近几十年, 国内外开展了诸多关于土壤

水变化与流域水文响应的研究, 如初始含水量变化、地表结皮等因素对降水产流及入渗过程的影响等。本文主要从土壤入渗特性及土壤含水率变化入手, 总结了国内外对于降水产流与土壤水分变化关系过程的研究进展。

1 降水入渗过程及土壤水研究概况

天然条件下的土壤水分入渗过程非常复杂, 受到降雨强度、土壤质地、坡度、覆盖物及耕作条件等多种因素的综合影响。在入渗理论及模型研究方面, 1856年, Darcy通过试验提出了饱和土壤水分运动的基本规律, 即达西定律; Richards则对达西定律进一步修正并应用到非饱和土壤水分运动的研究。1911年, Green和Ampt对剖面上的入渗过程做了概化和假定, 认为初始干燥的土壤在薄层积水入渗过程中存在

收稿日期: 2013-04-19 修回日期: 2014-01-08 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.001.html>

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项(1232); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2011490511)

作者简介: 赵娜娜(1985-), 女, 河南灵宝人, 博士, 主要进行农田作物耗水规律及水文水资源研究。E-mail: annazhao2009@163.com

通讯作者: 于福亮(1963-), 男, 山东人, 教授, 博士生导师, 长期从事四水转化规律、联合运用与管理, 水资源开发利用评价等研究。E-mail: yufl@iwhr.com

一个界面(湿润锋)将入渗土柱分成干湿两个区域,即湿润区为饱和含水量,湿润锋前为初始含水量,建立了具有一定物理基础的 Greer Ampt 入渗模型^[2]; 1933 年, Horton 提出了经典的入渗理论,认为地表土壤都有其特定的入渗能力,当降水强度大于入渗能力时,土壤将按照其下渗能力入渗,多余降水将在坡面形成径流,当降水强度小于入渗能力时,降水将全部入渗,在观察研究地表径流后于 1940 年建立了下渗能力随时间呈指数变化的经验性入渗模型^[3-4]; 1957 年, Philip 根据垂直入渗的级数解认为在入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈现幂级数关系,以此建立了具有一定物理基础的 Philip 入渗模型^[5]。此外, Kostiakov^[6]、Smith^[7] 以及 Smith 和 Parlange^[8] 也提出了较为通用的入渗模型。土壤水分研究的发展过程可以归纳见图 1。

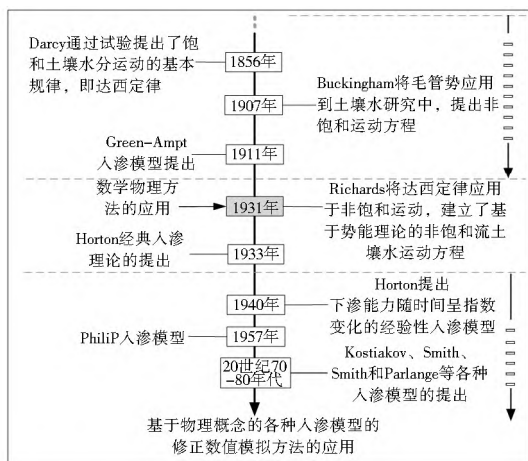


图 1 国外土壤水分入渗过程研究发展脉络

Fig. 1 The research progress of soil water infiltration in other countries

上述土壤水分入渗模型中, Greer Ampt 和 Philip 模型由于具有明确的物理意义,便于建立其特征参数与土壤物理特征间关系,在现阶段应用较为广泛。如 Mein 和 Larson 等^[9]将 Greer Ampt 模型应用于降水入渗研究中,对 Greer Ampt 入渗公式进行修正,推导出了可计算开始积水时间的函数关系式,之后 Chu (1978)在此基础上进一步修正,提出了各时段积水时间的计算方法^[10-11]。

我国在土壤水研究方面起步较晚,但是在 20 世纪 70 年代至 90 年代经历了一个快速发展时期。近十几年来,应用数值模拟方法求解土壤水运动参数,使 SPAC (Soil Plant-Atmosphere Continum) 水分传输的计算机模拟得以迅速发展,同时,地学统计技术的引入也使得不同尺度间的土壤水变化研究成为热点^[12-13]。我国土壤水分研究发展的概要历程见图 2。

在降水入渗模拟方面,许多学者根据实际情况对 Greer Ampt 等一些广泛应用的模型进行修正,推导出适用于实际研究区域的计算模型。如蒋定生等^[14]在分析 Kostiakov 和 Horton 入渗模型的基础上,结合黄土高原大量野外实测资料提出了积水条件下的入渗公式;范荣生和张炳勋等^[15]用水文参数取代 Meir Larson 方程中的土壤物理参数,提出了考虑了土壤特性和植被条件影响的黄土高原地区入渗计算模型;王文焰等^[16]根据 Darcy 定律与水量平衡原理推导出

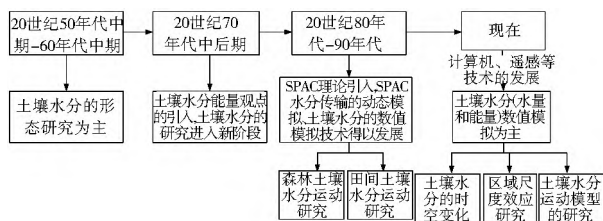


图 2 我国土壤水分研究概要历程

Fig. 2 The research progress of soil moisture in China

了适用于黄土区的 Greer Ampt 入渗模型;王全九等人^[17]根据土壤水一维垂直入渗实验对 Philip 入渗模型和 Greer Ampt 入渗模型进行对比研究,发现 Philip 入渗模型对参数精度要求较高,而 Greer Ampt 入渗模型对参数要求相对较低;赵伟霞等^[18]对恒定水头井入渗 Greer Ampt 模型改进与验证,建立了适用于恒定水头井入渗的 Greer Ampt 模型;马娟娟等^[19]建立了基于 Greer Ampt 模型的变水头积水入渗模型及其参数求解方法。雷廷武、刘汉等人根据前期试验提出了一种用产流积水法来测量土壤入渗动态过程,其精度相对较高^[20]。

目前,国内土壤水分入渗研究主要集中在 Greer Ampt 模型的修正及 Philip 和 Parlange 入渗方程的求解上,由于土壤水分入渗参数相对较多,时空变异性较大,且入渗参数的估算准确性通常会影响到土壤水流的模拟精度。因此,需要通过模型参数简化或者模型参数估算的方法建立不同条件下的入渗方程,提高模型模拟精度^[21]。

2 土壤水分变化的水文响应研究

土壤,特别是表层土壤在水文循环中起着极其重要的作用,而土壤水分的变化又会对地表径流的形成、降雨(灌溉)入渗以及地表蒸发等水文过程产生影响。以下从初始含水率以及土壤水分的空间变异性三方面讨论土壤含水率变化对降水产流过程的影响。

2.1 初始含水率对降水产流的影响

初始土壤含水率通过影响下渗率进而对地表产流的形成产生一定影响。一般情况下,初始含水率越大,初损值降低,土壤入渗率减小;土壤越干燥其初始入渗率越大^[22]。土壤初始含水率越高,产流越快,达到稳定入渗率的时间越短^[23]。当初始含水率均匀分布时,降雨入渗和再分布过程中湿润锋面平行坡面垂直向下整体运移;分布不均匀时,初始含水率越高,再分布过程中湿润锋的运移速率越大^[24]。

另外,研究区域主要的产流机制也会对降水产流产生重要影响:对于超渗产流机制来说,降水产流主要取决于雨强与土壤入渗率的比例,当雨强远远超过土壤入渗率时,初始含水率对产流的影响很小;对于饱和产流机制来说,降水产流受初始含水量的影响很大^[25-27]。需要说明的是,土壤含水率对降水产流过程的影响通常是与下垫面土地利用类型、土壤类型等综合因素实现的,与裸地相比,有植被覆盖的区域,初始含水率对产流过程起着非常重要的作用。

Blavet 分析了法国地中海沿岸葡萄园种植区不同的地表覆盖(干草、灌木丛)条件下前期土壤含水量对产流及土壤侵蚀的影响,研究表明:初始土壤含水率、土壤孔隙度、有机

物含量等与产流之间有明显的相关性^[28]。而农林混合种植系统下,产流随着季节和初始含水量的变化而变化:雨季产流量达到最大值,产流系数与前期土水势的倒数呈指数相关,旱季产流系数与前期土水势呈线性负相关^[29]。红壤土中前期含水率比较低时,土壤的径流系数和入渗率都与降雨时间呈线性关系,前期含水率比较高时,土壤的径流系数、入渗率及产沙速率与降雨时间关系符合 *Bohmann*(玻耳兹曼)方程^[23]。此外,前期含水量也会对流域水文过程中河道流量和水中溶质浓度之间的关系产生影响。*Biron* 等用加拿大魁北克地区小流域两年的实测数据对河道流量和化学物质浓度之间进行分析,发现由于流域初始含水量条件的变化,流量与浓度之间的关系也随之不断变化^[30]。

目前关于土壤初始含水率对降水产流的影响研究大多是在土壤含水率分布均匀的前提下,对不同初始含水率的水文响应进行研究。不同条件下,初始含水率对流域水文过程的影响不同。初始含水率水文响应的敏感性主要取决于降水特性,降水量越多,雨强越大,前期含水量的影响越小。而土壤水分分布具有极强的时空变异性,以及流域水文循环过程及其各要素之间的复杂性使得流域水文模型中如何更好的刻画和描述土壤水分运动过程成为水文模拟研究的难点和重点。

2.2 土壤水分的空间变异性对产流过程的影响

土壤水分的空间异质性对各种水文过程和土壤形成过程均有显著的影响^[31],尤其是在干旱、半干旱地区。这种空间变异通过影响下渗过程和土壤水分剖面的变化^[32]使流域产流发生空间变化。*Brocca* 等对意大利中部土壤水分的空间变异性研究表明,土壤水分的变异性随土壤含水量的增加呈减小趋势^[33]; *Qiu* 等通过对黄土高原土壤水分的空间变异性的研究认为:研究区域内土壤平均含水量较高时,土壤水分的空间变异性通常较弱,土地利用方式和地形等环境因子对土壤水分的空间变异性具有显著影响^[34];田间尺度上,土壤水分大多数都为中等或弱变异,但相关距离因研究区域和尺度的不同而差异较大(从几米到几百米)^[31,35,36]。*胡伟*等^[37]利用经典统计学方法对黄土高原退耕坡地土壤水分在空间三维不同方向和不同位置的空间变异性进行了研究,结果表明:土壤水分在垂直方向和水平方向(垂直于坡长方向)的平均变异程度为弱变异,沿坡长方向从坡顶到坡脚表现出先减小后增大的趋势,且在各坡位变异程度不一,呈现出变异程度为坡上> 坡中> 坡下的趋势;随采样幅度尺度和采样间距的变化,研究区域内土壤水分变异的特征参数呈现不同的变化规律^[31]。*袁建平*等^[38]对小流域土壤稳定入渗速率空间变异进行了研究,分析了坡度、坡向、坡位和土地利用等因素对土壤入渗特性的影响规律。而土壤稳定入渗率的空间变异性会受到研究尺度及测量面积的影响^[39];近年来,土壤水分空间变异性的研究开始注重田间水分的空间变异与环境因子的相互关系的研究,而使其成为国际上的研究热点之一^[37]。

土壤水分空间变异性研究多从土壤水分入渗特性及土壤水分的时空变异角度出发,而土壤水分的空间变异性对降水产流的影响研究则相对较少。*李长兴*等^[32]提出了用标定

理论方法建立考虑土壤特性空间变异性的流域产流模型,为从物理机制上模拟流域产流的空间变化,提供了一条途径,但仅是一种近似处理的经验方法;*Fitzjohn* 等^[40]对西班牙半干旱地区土壤水分的空间变异性进行分析发现,在旱季这种空间变化形式以干湿相间、水文响应对比明显的区域为主,且空间上相对独立不受地表径流的影响,这种土壤水分空间上的差异有利于降低流域大范围的产流和土壤侵蚀;*Brocca* 等^[41]分析和估算了降水产流模型中应用的从不同尺度测算的具有时空变异性土壤水分数据;土壤水分的空间变异性一般具有随机性和系统性,而这种空间变异的系统性可能是流域产流的主要影响因素,且土壤水分的空间变异性对产流的影响随着降雨类型的变化而变化,对中雨产生的影响很大,小雨和暴雨条件下这种空间变异性的影响可以忽略^[42]。

2.3 水文模型中土壤水分数据的同化和吸收

大量的研究表明,一场暴雨前,流域的平均前期含水率是提高洪水预报准确性的重要信息,在水文系统模拟中,这些状态变量受到气象动力要素的估算及实际测量误差的影响,导致流域状态条件和形式发生错误,从而影响产流的模拟。提高状态变量的条件和形式的方法很多,最传统的方法就是用前期降水量(前期降水指数 API)或者前期径流(*Prevent Runoff*)作为土壤水储量的指标^[43]。

但是,将一些状态变量,如土壤水分数据整合到概念性模型中,会存在一个实测尺度与模型尺度的之间的尺度问题,以及实测与模拟状态变量之间的不可公度性问题。一个点测量中观测的状态变量是几立方厘米的大小,而且由于变量的非线性并不能直接转换成比较大的量^[42,44]。由于这种非线性的动态变化过程和子流域中土壤、植被高度的非均匀性,不管采用哪种方法(固定一系列的传感器或测量方式),都没有简单可行的方法将一系列点上的观测数据扩展到流域尺度。统计插值,包括一些新的方法都需要假定趋势参数与土壤水分之间的稳定相关关系,或者在不同类别的可用软件信息中并没有足够的样本数据来获得有用的土壤水分后验概率分布。

虽然很复杂,但是还是有一些方法可以将实测土壤水分数据整合到水文模型中,这些方法包括从基于地面的测量数据到遥感数据系列的应用或者两者的结合,包括根据实测数据对土壤水分的初始化^[45,46]及通过同化技术对数据的更新^[47]。但 *Crow and Ryu*^[48]的研究表明,这对模型的性能有所改善,但是收效甚微。

尽管存在着上述争议,但是降水产流模型中土壤水分数据同化的限制和潜能仍需要进一步探索和研究,其中一个很重要的问题就是:如何使实测土壤水分数据与模型中的状态变量相关?一方面,这受制于模型框架(如集总式 VS 分布式,单次降水 VS 连续型的),另一方面,则由空间尺度及尺度变异性决定。

3 存在的问题及研究展望

(1) 受许多不确定因素影响,土壤水分分布和入渗特性具有较大的时空变异性,如何概化研究客体对象特点和开展由点到面的尺度转换尤为重要。

(2) 从流域降水产流及水文模型的角度, 如何利用实测土壤水分数据提高水文模型模拟精度, 以及水文模型中土壤水分分布和运动的物理机制描述, 定量评价土壤水分及土壤特性空间变异性对产流的影响并减少其影响仍是需要研究的重点。

(3) 土壤水的研究尤其是在农田土壤水分研究中, 多集中在对土壤水分的入渗过程、溶质运移等研究上, 且多以土壤水分的垂向运动为主, 而二维及三维土壤水分变化与降水产流之间的响应关系研究相对较少, 因此, 如何从机理上进一步分析土壤含水量的变化与产流之间的关系, 以及二维、三维土壤水分变化与降水产流之间的内在驱动机制等尚需深入的分析和研究。

(4) 在当今变化环境下, 气候变化及人类活动的频繁影响, 土地利用方式的改变等综合因素的影响下, 土壤水分的变化对降水产流机制的影响还需进一步的研究, 如不同的时空尺度下土壤水分的动态变化和形式以及尺度变异等对非饱和区壤中流、优先流的影响, 如何观测和模拟土壤水分对产流过程的响应等。

参考文献(References):

- [1] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318. (LEI Zhidong, HU Heiping, YANG Shixiu. Comments and Progress on the Soil Water Research [J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311-318. (in Chinese))
- [2] Green W H, Ampt G A. Studies on Soil Physics Part V: The Flow of Air and Water through Soil [J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1-24.
- [3] Horton R E. The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle [J]. Trans. Am. Geophys. Union, 1933, 14: 446-460.
- [4] Horton R E. An Approach Toward A Physical Interpretation of Infiltration Capacity [C]. Soil Science Society of America Proceedings: 1940.
- [5] Philip J R. The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations [J]. Soil Science, 1957, 84(3): 257-264.
- [6] Kostiaikov A N. On the Dynamics of the Coefficient of Water Percolation in Soils and on The Necessity for Studying It from a Dynamic Point of View For Purposes of Amelioration [C]. Paris: International Soil Science Society, 1932.
- [7] Smith R E. The Infiltration Envelope: Results from A Theoretical Infiltrometer [J]. Journal of Hydrology. 1972, 17(1-2): 1-22.
- [8] Smith R E, Parlange J Y. A Parameter Efficient Hydrologic Infiltration Model [J]. Water Resources Research, 1978, 14(3): 533-538.
- [9] Mein R G, Larson C L. Modeling Infiltration During A Steady Rain [J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384-394.
- [10] Chu S T. Infiltration during an Unsteady Rain [J]. Water Resources Research, 1978, 14(3): 461-466.
- [11] Chu S T. Generalized Meir Larson Infiltration Model [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1987, 113(2): 155-162.
- [12] 朱强, 孙敏, 陈秀芳. 基于动态数字地形模型的流域产汇流模拟方法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 14(2): 83-88. (ZHU Qiang, SUN Min, CHEN Xiurwan. A New Method for Rainfall Runoff Simulation Based on Dynamic Digital Terrain Model [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 14(2): 83-88. (in Chinese))
- [13] 康绍忠, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分运移力能关系的田间试验研究[J]. 水利学报, 1990, (7): 1-9. (KANG Shaizhong, XIONG Yunchang. Distribution of Hydraulic Resistance and Water Potential in Soil-Plant-Atmosphere Continuum [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, (7): 1-9. (in Chinese))
- [14] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299-305. (JIANG Dingsheng, HUANG Guojun. The Study on The Characteristics of Soil Infiltration in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(4): 299-305. (in Chinese))
- [15] 范荣生, 张炳勋. 黄土地区流域产流计算[J]. 西北农林科技大学学报: (自然科学版), 1980, (4): 1-12. (FAN Rongsheng, ZHANG Bingxun. Calculation of Watershed Runoff in Loess Area [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 1980, (4): 1-12. (in Chinese))
- [16] 王文焰, 汪志荣, 王全九. 黄土中 Green Ampt 入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2003, 34(5): 30-34. (WANG Wenyan, WANG Zhirong, WANG Quanjiu. Improvement and Evaluation of The Green Ampt Model in Loess Soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(5): 30-34. (in Chinese))
- [17] 王全九, 刘剑斌, 李毅. Green Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16. (WANG Quanjiu, LAI Jianbin, LI Yi. The comparison and analysis between the Green Ampt Model and Philip Model [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 13-16. (in Chinese))
- [18] 赵伟霞, 张振华, 蔡焕杰, 等. 恒定水头井入渗 Green Ampt 模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 465-470. (ZHAO Weixia, ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, et al. Improvement and Verification of The Green Ampt Model For Constant Head Well Permeameter [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 465-470. (in Chinese))
- [19] 马娟娟, 孙西欢, 郭向红. 基于 Green Ampt 模型的变水头积水入渗模型建立及其参数求解[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 61-67. (MA Juanjuan, SUN Xi huan, GUO Xiang hong. Varying Head Infiltration Model Based on Green Ampt Model and Solution to Its Key Parameters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 61-67. (in Chinese))
- [20] 雷廷武, 潘英华, 刘汗, 等. 产流积水法测量降雨侵蚀影响下坡地土壤入渗性能[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 7-11. (LEI Tingwu, PAN Yinghua, LIU Han, et al. Measurement of Rainfall Erosion Impacted Soil Infiltration Capability of Slope Land With Runoff Ponding Water [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 7-11. (in Chinese))
- [21] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 68-72. (HU Shunjun, TIAN Changyan, SONG Yurong, et al. Determination and Calculation of Soil Permeability Coefficient [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 68-72. (in Chinese))
- [22] Wangemann S G, Kohl R A, Molumeli P A. Infiltration and

- Percolation Influenced By Antecedent Soil Water Content and Air Entrapment [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1517-1523.
- [23] 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响 [J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 23-29. (ZHANG Xiang-yan, SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng, et al. Effects of Antecedent Soil Moisture on Hillslope Runoff Generation and Soil Erosion Over Red Soil Mantled Landscapes [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 23-29. (in Chinese))
- [24] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47. (Chen Hong-song, Shao Ming-an, Wang Ke-lin. Effects of Initial Water Content on Hillslope Rainfall Infiltration and Soil Water Redistribution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(1): 44-47. (in Chinese))
- [25] Castillo V M, Gomez Plaza A, Martinez Mena M. The Role of Antecedent Soil Water Content in the Runoff Response of Semiarid Catchments: A Simulation Approach [J]. Journal of Hydrology, 2003, 284(1): 114-130.
- [26] Martinez Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Hydrological and Erosional Response to Natural Rainfall in A Semi Arid Area of South East Spain [J]. Hydrological Processes, 2001, 15(4): 557-571.
- [27] Martinez Mena M, Albaladejo J, Castillo V M. Factors Influencing Surface Runoff Generation in A Mediterranean Semi Arid Environment: Chicamo Watershed, SE Spain [J]. Hydrological Processes, 1998, 12: 747-754.
- [28] Blavet D, De Noni G, Le Bissonnais Y, Et Al. Effect of Land Use and Management on The Early Stages of Soil Water Erosion in French Mediterranean Vineyards [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 124-136.
- [29] Wei L, Zhang B, Wang M. Effects of Antecedent Soil Moisture on Runoff and Soil Erosion in Alley Cropping Systems [J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1-3): 54-62.
- [30] Biron P M, Roy A G, Courschesne F, Et Al. The Effects of Antecedent Moisture Conditions on the Relationship of Hydrology to Hydrochemistry in A Small Forested Watershed [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(11): 1547-1555.
- [31] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11-16. (HU Wei, SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu. Scale Dependency of Spatial Variability of Soil Moisture on a Degraded Slope Land on The Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(8): 11-16. (in Chinese))
- [32] 李长兴, 沈晋. 考虑土壤特性空间变异的流域产流模型 [J]. 水利学报, 1989, 20(10): 1-8. (LI Chang-xing, SHEN Jin. Watershed Runoff Model Considering the Spatial Variability of Soil Characters [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 20(10): 1-8. (in Chinese))
- [33] L B, R M, F M, Et Al. Soil Moisture Spatial Variability in Experimental Areas of Central Italy [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2-4): 356-373.
- [34] Qiu Y, Fu B, Wang J, Et Al. Spatial Variability of Soil Moisture Content and Its Relation to Environmental Indices in A Semi Arid Gully Catchment of The Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(4): 723-750.
- [35] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39-44. (ZHANG Shu-juan, HE Yong, FANG Hui. Spatial Variability of Soil Properties in the Field Based on GPS and GIS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 39-44. (in Chinese))
- [36] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克里格估值 [J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 460-466. (HU Ke-lin, LI Bao-guo, TAO De-li, et al. Spatial Variability of Soil Water and Salt in Field and their Estimations by the CoKriging [J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 460-466. (in Chinese))
- [37] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74-81. (HU Wei, SHAO Ming-an, WANG Quan-jiu. Study on Spatial Variability of Soil Moisture on the Recultivated Slope Land on the Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 74-81. (in Chinese))
- [38] 袁建平, 张素丽, 张春燕, 等. 黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异 [J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 579-583. (YUAN Jian-ping, ZHANG Su-li, ZHANG Chun-yan, et al. Spatial Variation of Steady Water Infiltration Rates of Small Watershed in Hilly and Gully Loess Region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(4): 579-583. (in Chinese))
- [39] Haws N W, Liu B, Franzmeier D P, et al. Spatial Variability and Measurement Scale of Infiltration Rate on An Agricultural Landscape [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1818-1826.
- [40] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil Moisture Variability in A Semi Arid Gully Catchment: Implications For Runoff and Erosion Control [J]. Catena, 1998, 32(1): 55-70.
- [41] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Et Al. Spatial-Temporal Variability of Soil Moisture and Its Estimation Across Scales [J]. Water Resources Research, 2010, 46(2): W2516.
- [42] Merz B, Plate E J. An Analysis of the Effects of Spatial Variability of Soil and Soil Moisture on Runoff [J]. Water Resources Research, 1997, 33(12): 2909-2922.
- [43] Bronstert A, Creutzfeldt B, Graeff T, et al. Potentials and Constraints of Different Types of Soil Moisture Observations For Flood Simulations in Headwater Catchments [J]. Natural Hazards, 2012, 60(3): 879-914.
- [44] Vogel R M, Kroll C N. Estimation of Baseflow Recession Constants [J]. Water Resources Management, 1996, 10(4): 303-320.
- [45] Brocca L, Melone F, Moramarco T, et al. Assimilation of Observed Soil Moisture Data in Storm Rainfall Runoff Modeling [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(2): 153-165.
- [46] Zehe E, Becker R, B Rodosy A, Et Al. Uncertainty of Simulated Catchment Runoff Response in the Presence of Threshold Processes: Role of Initial Soil Moisture and Precipitation [J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1-4): 183-202.
- [47] Han E. Soil Moisture Data Assimilation at Multiple Scales and Estimation of Representative Field Scale Soil Moisture Characteristics [D]. West Lafayette, Indiana: Purdue University, 2011.
- [48] Crow W T, Ryu D. A New Data Assimilation Approach For Improving Runoff Prediction Using Remotely Sensed Soil Moisture Retrievals [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(1): 1-16.