

基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法

——概念与理论框架

王晓学^{1,2}, 李叙勇^{1,*}, 莫菲¹, 江燕¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085;

2. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:模型方法是定量评价森林水源涵养的重要途径。根据元胞自动机的基本理论,结合森林水源涵养效应的多尺度特征,提出了一个新的基于元胞自动机的森林水源涵养量计算模型。该模型将森林“水文响应单元”网格化作为元胞空间的基本单元,邻域定义为摩尔(Moore)型,元胞“水库”水量状态变化范围定义在一个连续的实数空间上。将元胞单元对不同降雨事件的响应分为不产生径流和产生径流两种情况,通过对蒸散发、邻域元胞间水量传输、深层渗漏等制定转换规则,模拟森林在不同尺度上的水源涵养动态特征。这种新模型方法将为森林水源涵养由小尺度(水文响应单元)向流域、景观尺度上推提供有效的定量研究途径,从而进一步推动森林水源涵养功能研究的深入。

关键词:元胞自动机;森林水源涵养量;水文响应单元;森林水文模型

Exploration of a new modeling method for forest water conservation based on cellular automata: concept and theoretical framework

WANG Xiaoxue^{1,2}, LI Xuyong^{1,*}, MO Fei¹, JIANG Yan¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: As forest water conservation has become one of critical ecosystem service issues in context of global water shortage, the exploration for its quantitative methods has increasingly gained more attention. The relationship between forests and water is complex. Different geographical characteristics and forest types have various effects on the interception of rainfall redistribution in forest, surface runoff and evapotranspiration. There exist interactions among the complex hydrological and ecological processes in forest ecosystems, thus causing the spatial and temporal variations in water cycles and water balance at the watershed and landscape scales. However, the dominant factors and driving mechanisms of forest water conservation key processes at these different scales are not yet clear, making it difficult to evaluate forest water conservation at these scales and develop a scale-up method for quantifying forest water conservation. The modeling method is an efficient route towards quantitative evaluation of forest water conservation. Over the past decades, most of the quantitative researches concerning forest water conservation have focused on one dimension methods (e.g. methods of water balance, soil water storage capacity, precipitation storage, canopy interception surplus and so on). Scaling-up remains as a challenging issue in quantifying forest water conservation. In this study, the author employs the basic theories of cellular automata to developing a new modeling method for quantifying forest conservation. The model, we integrate the hydrological characteristics of rainfall redistribution by canopy, water retention of litter and water conservation of soil and define a cell as an elementary spatial unit that is rasterized from a hydrologic response unit, with every cell interior having relatively consistent characteristics of the vegetation, soil and terrain attributes. A cell neighborhood is defined as the Moore type.

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2009CB421104);城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-1-05);国家自然科学基金项目(40971271)

收稿日期:2010-01-25; **修订日期:**2010-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@rcees.ac.cn

The range of quantitative change of water is measured in continuous real numbers. The water quantity in each cell is affected by neighboring cells and status of the previous time step. Based on the response characteristics of the underlying surfaces on different rainfall intensity and duration, the cellular responses to different rainfall events is classified by two scenarios: generation of runoff and without generation. The transformation rules of forest hydrological processes are also defined, including evapotranspiration, intercellular water transmission and deep seepage. And the hydrological processes with both horizontal and vertical directions are also considered. Taking main factors affecting forest water conservation and its spatial heterogeneity into consideration, the model overcomes the defects of most traditional methods which focus on one dimension. This new modeling will provides a useful way for solving forest water conservation scaling-up issues from small-scale (hydrological response unit) to watershed, or landscape scale; and thus improves quantitative evaluation of forest water conservation at different spatial scales. The model also provides an effective quantitative way of quantifying forest water conservation with different spatial distribution patterns of different forest types. This paper is the theoretical framework of the model described above. A case study will be presented in a follow-up paper.

Key Words: cellular automata; forest water conservation; hydrological response unit; forest hydrological model

随着近年来区域水资源短缺问题的凸显和生态系统服务功能研究工作的深入,森林涵养水源功能的定量研究越来越受到关注^[1-2]。由于森林与水的关系极其复杂,不同自然地理环境、不同森林类型对大气降水的截留、林内降雨的再分配、地表径流以及蒸散发的影响不尽相同,而且这些复杂的局部过程彼此间存在着紧密的联系,进而造成了流域和景观尺度水分循环和水量平衡的时空分异;另一方面目前对影响不同尺度森林水源涵养功能关键过程的主导因子、驱动机制认识尚不清晰,这就为准确评价流域、景观尺度森林水源涵养价值和不同尺度森林水源涵养效应的尺度转换方法带来困难,而这些问题的解决通常需要采取自上而下或自下而上的方法来解决^[3]。对森林水源涵养功能的研究已由过去的简单定性和个别因素评价,发展到了现在的定量、多因素综合计量评价^[4]。目前对流域、景观尺度森林水源涵养量评价主要是通过水量平衡法、土壤蓄水能力法、降雨储存量法、林冠截留剩余量法、综合蓄水能力法、年径流量法、地下径流增长法、多因子回归法等,这些方法都有一定的局限性:(1)上述方法都是从一个维度去考量森林水源涵养功能,其核算结果不是过大就是过小,难以准确的核算流域或景观尺度的水源涵养量。(2)上述方法对下垫面因素的空间异质性考虑不足。

元胞自动机(CA)是由 Ulam 和 Von Neumann 在 20 世纪 50 年代提出的一种灵活的数学工具,它可以通过制定一些简单的局部规则来模拟复杂系统,其“自下而上”的研究思路充分体现了系统的局部个体行为产生复杂全局、有秩序模式的理念^[5-6],非常适用于复杂系统时空演化过程的模拟和预测。CA 自 20 世纪 90 年代开始逐步引入到分布式水文过程的研究中,并广泛应用于降水侵蚀和坡面径流^[7-8]、河道汇流^[9-10]、坡面细沟侵蚀过程^[11]、流域汇流^[12]、平原地区地表径流^[13]的模拟,展现了其强大的复杂过程的模拟和预测能力。CA 不再是早期的游戏模型,它将在生态水文学领域内作为一个基础模型平台发挥其强大的作用。

本文提出定量研究森林水源涵养量的 CA 模型方法,与其他传统的 CA 模型不同的是,该模型对元胞状态“水量”进行累积处理,将其变化范围定义在一个连续的实数空间上,而并非传统 CA 模型对于元胞状态的离散处理方式。本模型模拟森林在特定时间、空间尺度上的水源涵养量变化,旨在为森林水源涵养由小尺度(水文响应单元)向流域、景观尺度转化提供有效定量研究方法,提高流域、景观尺度森林水源涵养的定量评估水平,深化对森林水源涵养量的空间异质性特征的认识,探索不同森林类型空间格局对森林水源涵养效应的影响,推动森林水源涵养功能研究的深入研究。

1 基于元胞自动机的森林水源涵养量评价模型的基本框架

1.1 森林的水源涵养效应

森林水源涵养功能主要是指森林生态系统特有的水文生态效应,是森林生态系统通过林冠层、枯落物层

和土壤层拦截滞蓄降水^[14],具有蓄水、调节径流、削洪补枯和净化水质等功能^[15-16]。林冠层的截留作用首先对降水进入土壤的过程产生影响,不同林型、不同生长阶段的森林生态系统冠层对不同强度的降水截留量是不同的,我国主要森林生态系统的林冠平均截留量变动在 134.0—843.4 mm,截留率平均值变动在 11.4%—36.5% 之间,各类森林生态系统林冠截留量和截留率的变动系数分别是 14.27%—40.53% 和 6.86%—5.05%^[17]。对于一次小降雨事件,植被截留量占整个降雨总量的比重较大,只有一小部分降雨能够渗入到土壤中(树干茎流、林内穿透雨)。对于大降雨事件来说,植被截留只占降雨总量的一小部分,而土壤入渗是森林涵养水源的主要形式。一般情况下,如果近地面温度不是太低,那么冠层截流的降雨会在几天之内通过蒸发作用返回到大气层中。枯落物截留降雨的能力受枯落物含水率、蓄积量、降雨量、降雨历时等因素的影响^[18-20],而枯落物层厚度和储量因主要物种的凋落节律、土壤动物、微生物分解等作用的不同而发生相应变化,与林下草本植物的物种多样性相关不大^[21],一般枯枝落叶持水可达自身干重的 2—4 倍。在降水截流作用发生后,土壤入渗率和地表径流量又决定了降水的净土壤入渗量,土壤的入渗能力受多种因素的影响,其中土壤表面渗透性、水分停留时间、降水持续时间及降水强度等因素起着主要的控制作用^[22]。由于土壤水分的下渗过程较缓慢,因此降水下渗作用的变化发生在更长的时间尺度上,如小时或者天。植物根系的水分再分配作用可以对土壤水分的分布情况进行调节,如使得某些土层内的含水量增加,某些土层内的含水量降低等,这种作用与土壤中的水势梯度有关^[23-25]。土壤水分的变化是森林水源涵养功能研究中最活跃的因素,它与土壤蒸发、植物蒸腾、叶面蒸发、渗漏到地表深层等水分再分配过程有关。由于土壤蒸发和植物的生理作用,土壤水分会在几天或几周内耗尽,土壤蒸发作用只发生在较浅的土层内,一般为 15 cm 的土壤表层,与土壤接收的太阳辐射能量和土壤本身的含水量有关。植物蒸腾作用具有昼夜变化的周期性,其速率与土壤含水量有关,植物的蒸腾速率会随着土壤含水量的增大而增大,但当土壤水分增大到一定程度时,土壤水分将不再是蒸腾速率的限制因素,蒸腾速率增加的速度变的缓和。渗漏水量在整个水分平衡中所占比重非常小(小于 5%),并且这种作用一般在降水事件发生后的几天后才会发生^[26]。

1.2 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型的基本构成

1.2.1 森林水源涵养元胞自动机的表述形式

森林水源涵养元胞自动机由四个部分组成,表述形式为 G, Q, N, f , 其式中各变量的说明如下:

$$G = \{c(x_c, y_c) | c \in Z^2, 0 \leq x_c \leq M, 0 \leq y_c \leq N\}$$

其中, Z^2 为二维欧氏空间, G 表示森林水源涵养元胞自动机的元胞空间, M, N 为 Z^2 空间的行列数, x_c, y_c 均取自然数;

Q 代表元胞“水库”在 t 时刻的水源涵养量,是一个在实数范围内的连续变量;

N 为中心元胞 $c(x, y)$ 的邻域,根据元胞水量传输特征,将其定义为摩尔(Moore)型,是有限的序列子集 $N = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_8)$;

f 为 $Q_{(t)} \rightarrow Q_{(t+1)}$ 的转换规则, Q 为所模拟空间尺度的元胞水源涵养总量,根据 t 时刻的元胞水源涵养量和 $t+1$ 时刻元胞间水量传输、降雨、深层渗漏、蒸散发来确定 $t+1$ 时刻的元胞“水库”水量。

1.2.2 森林水源涵养元胞自动机的元胞及其元胞空间

森林水源涵养功能是多时空尺度水文过程综合作用结果,在模型运行之前,首先确定元胞的大小(空间尺度)和邻域范围(元胞间水文效应的空间相关性)。元胞单元大小的选择对结果的空间格局有明显的影响,而邻域范围对空间格局和系统稳定性都有影响^[27]。元胞的大小既要反应出影响森林水源涵养功能的空间细节特征,又要考虑对数据的可获取性以及模型运行的效率。

根据 Flügel 的自然地理划分概念将流域划分为“水文响应单元(HRU)”^[28],HRU 是下垫面特征相对单一和均匀的区域,在这个区域中的网格是具有相似水文特性的面积单元,如相同的坡向、坡度、土地利用类型等。森林植被通过林冠层截留、地被物层对降水的再分配、对土壤水文的促进作用、蒸散发等来影响森林水源涵养过程^[29-30];土壤理化性质对土壤导水率、土壤最大持水量等都有影响,从而影响着森林土壤水源涵养量。由

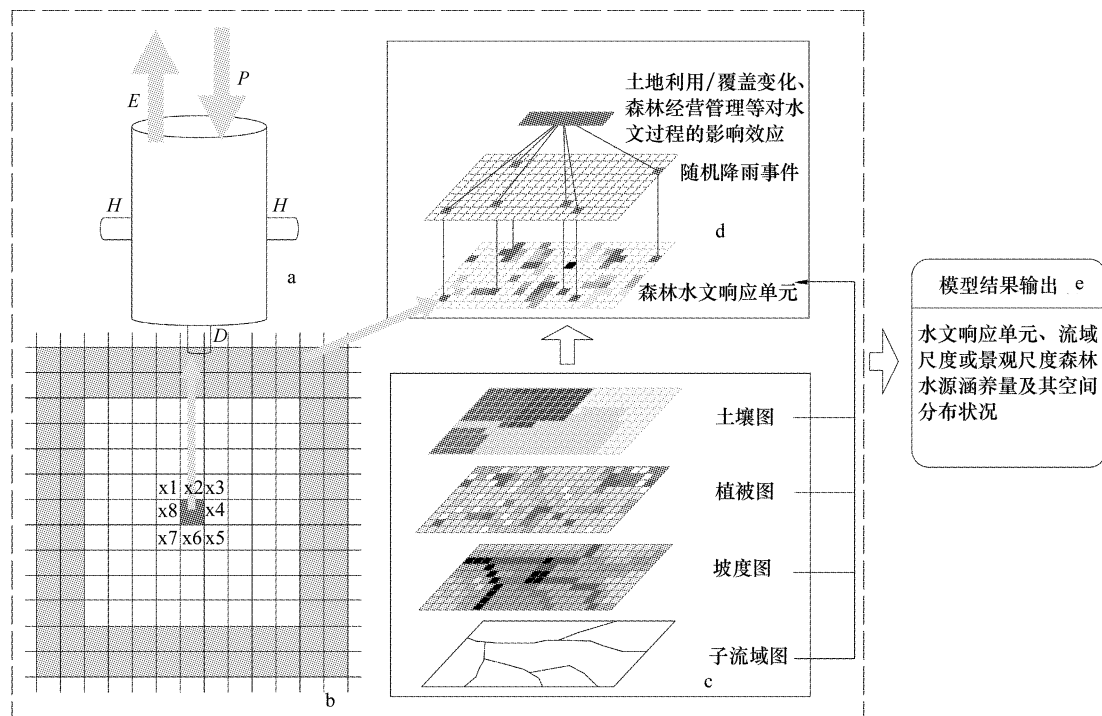


图1 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型概念图

Fig. 1 The concept model of forest water conservation based on cellular automata

P 表示降雨量, E 表示蒸散发, H 表示与邻近元胞的交换水量, D 表示深层渗透量; (a) 为元胞单元的水库水量平衡概念图; (b) 元胞空间及元胞邻域; (c) 元胞单元的确定方式; (d) 模型与微观、宏观尺度影响因素耦合方式; (e) 本模型输出结果

于在每个自然子流域中都具有复杂的地形、多种土壤类型、多种植被类型等特征,不同坡度、坡向、土壤类型和植被类型的组合会有不同的水文响应,因此,为了进一步反映这种子流域内部的水文差异,通过子流域内部植被类型、土壤类型和地形的叠加统计分析,网格化为具有一种单一的土壤类型、植被类型和地形的元胞单元(图1(c)、(d))。

CA模型空间定义为二维欧式空间,每个元胞形状为规则的四方网格,有利于直接利用GIS软件生成的栅格数据。在模型运行过程中,将所模拟的元胞空间实际区域上再新添加多行列元胞单元(图1(b)),保证边界元胞可以同样执行转换规则,同时有利于对模型运行结果验证。为了避免模拟区域以外新添加元胞水库水量的长时间累积,并且不影响到实际模拟范围的元胞水量变化,在每个模拟时间步长上都将其清空。

1.2.3 森林水源涵养元胞自动机的邻域构型

为了探索森林水源涵养功能的空间分异规律,不同森林格局对同一降水事件的响应特征,森林水源涵养量的动态变化特征,就必须加入“动态”演化规则。在元胞自动机中,这些规则是定义在空间局部范围内的,即一个元胞下一时刻的状态取决于本身状态和它的邻域元胞的状态。因而,在制定规则前,明确哪些元胞属于该元胞的邻域,按照侧渗的特点,将邻域定义为摩尔型。

1.2.4 森林水源涵养元胞自动机的元胞状态及模型运行需要的输入参数

将每个元胞单元假设为一个“水库”,元胞水库的水量变化由降雨、横向流、蒸散、下渗过程决定,而下渗、土壤蒸发、叶面蒸发和植被蒸腾作用等又随着水库水量的变化而变化。突破了传统CA模型对元胞状态的离散处理方式,对元胞水库“水量”实现累积处理,将CA模型状态变量定义在一个连续的实数空间上。

森林水源涵养元胞自动机模型需要的实测参数主要包括:研究区实际观测的降雨、气温、风速、太阳辐射和相对湿度;土壤容重、土壤颗粒组成、土壤饱和和导水率、土壤饱和和持水量;不同林地类型(落叶阔叶林、针叶林、常绿阔叶林等)根系层的平均深度、枯落物饱和和持水量;各河口监测站断面的流量等。

森林水源涵养元胞自动机模型需要输入的模拟参数:包括土壤水分的深层渗漏系数、土壤水压力势、 α (与坡度、元胞本身蓄水量等有关的决定元胞间侧渗速率的系数)、Penman-Monteith 公式所需的参数、自由穿透降雨系数、树干径流系数等。

1.2.5 森林水源涵养元胞自动机模型的时间步长

在每个模拟时间步长上,元胞空间的所有元胞单元要同时根据相同的转换规则来改变状态。森林水源涵养功能的空间尺度与时间尺度是紧密对应的,因此,在实际模拟过程中,可以根据模拟的空间尺度和元胞大小来决定模拟的时间尺度,当然从森林水源涵养功能的角度考虑的话,每次降水事件才是森林水源涵养功能的直接驱动者,因此也可以根据降水事件时长来决定模型模拟时长。

1.3 森林水源涵养元胞自动机模型的转换规则

转换规则是 CA 的最核心部分,模拟过程完全由转换规则来确定。因此有必要将本部分内容单独出来作为一节来论述森林水源涵养元胞自动机模型的转换规则。将元胞单元对降雨的响应分为两种情况分别阐述。

1.3.1 降雨事件不产生径流

本模型中把每个元胞的土壤、植被、地形作为其属性值,即元胞状态变量的参数与其属性值有关。从水量平衡的角度考虑,即在每个时间步长上元胞单元的涵养水源量 W 变化计算如下:

$$W_{(t+1)} = W_{(t)} + P_{(t+1)} + H_{(t+1)} - D_{(t+1)} - E_{(t+1)} \quad (1)$$

式中, $W_{(t+1)}$ 表示 $t+1$ 时刻元胞单元水库涵养水源量; W_t 表示 t 时刻的元胞含水量; $P_{(t+1)}$ 表示 $t+1$ 时刻降雨量,无降雨时其值为 0; $H_{(t+1)}$ 表示 $t+1$ 时刻中心元胞与周围 8 个方向元胞单元的净交换量; $D_{(t+1)}$ 表示 $t+1$ 时刻向深层土壤的渗漏量; $E_{(t+1)}$ 表示 $t+1$ 时刻的“水库”的蒸散量。

(1) 侧渗净交换量

$$H = \sum_{i=1}^8 \alpha_i v_h \Delta T \quad (2)$$

式中, v_h 是侧渗速率, α 是与土壤、坡度、元胞本身蓄水量等有关的系数, Δt 表示模型模拟的时间步长。

(2) 渗漏

不管在是否产生径流情况下,将向深层土壤的渗漏系数 v_v 其作为常数项输入模型。在模拟时间步长上,渗漏损失量可表示为:

$$D = v_v \Delta t \quad (3)$$

(3) 蒸散发

蒸散发过程数值模拟要比降雨过程复杂很多,蒸散发的机理过程发生于土壤-植物-大气系统 (SPAC) 内,是一个相当复杂的连续过程^[31],它即受元胞水库水量的影响,又与林区的热量供应量有关系^[32]。用 Penman-Monteith 方程计算蒸散量^[33]:

$$Es_0 = \frac{sRn + \rho C_p D_a / r_a}{\lambda s + \lambda \gamma (1 + r_v / r_a)} \quad (4)$$

式中, Es_0 为潜在蒸散量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); s 为饱和水汽压-温度曲线的斜率 ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); λ 为水的汽化潜热 ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); Rn 为净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); ρ 为空气密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); C_p 为空气比热 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); D_a 为冠层上部的空气饱和水汽压差 (kPa); γ 为干湿表常数 ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); r_a 为冠层表面空气动力学阻力 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); r_u 为冠层表面气孔阻力 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)。Katerji 和 Perrir^[34] 通过大量的试验研究发现, r_a 与 r_u 以及气象变量之间存在相关关系:

$$\frac{r_u}{r_a} = n \frac{r^*}{r_a} + l \quad (5)$$

式中, n 和 l 都是参数,且 $n > 0$, r_a 为空气动力学阻力,代表平衡蒸散时的表面阻力,可通过气象变量计算:

$$r^* = \frac{\Delta + r}{\Delta} \cdot \frac{\rho c_p (e_a^* - e_a)}{\gamma (R_n - G)} \quad (6)$$

对于土壤蒸发,当表层土壤风干时,土壤蒸发速率为0;当表层土壤湿润时表面阻力 ru 设为0。在计算植被潜在蒸腾时,假设冠层截留降水全部蒸发掉,然后从总的净辐射中扣除冠层截留水蒸发需要的能量,计算冠层和地表获得的净辐射,应用公式(4)分别计算植被的潜在蒸腾和土壤蒸发,最后通过比较土壤水分和潜在的蒸发和蒸腾来计算土壤水分对蒸散的限制作用,具体计算如下:

$$E_s = \min(ES_0, (SW_t - SW_r)) \quad (7)$$

$$E_p = \min(E_{p_0}, (SW_{rt} - SW_{rt_0})) \quad (8)$$

式中, E_s 、 E_{s_0} 分别为实际土壤蒸发速率和潜在蒸发速率($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); SW_t 为 t 时刻表层土壤(一般为地表到土层15cm处深度的土层)含水量(mm), SW_r 为表层土壤风干时的含水量; E_p 、 E_{p_0} 分别为植被的实际蒸腾和潜在蒸腾速率($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); SW_{rt} 为 t 时刻根系层的土壤含水量(mm); SW_{rt_0} 为萎蔫点时根系层的含水量, SW_t 、 SW_r 、 SW_{rt_0} 均可由土壤水在不同深度土壤剖面的运动和分配公式(9)求得。

对于土壤水在土壤剖面上的运动和分配用 Richard 方程计算:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\left(K - \frac{dU}{dz}\right)}{dz} \quad (9)$$

式中, θ 为 t 时刻深度 z 处的土壤含水量($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); t 为时间, z 为地表起算的土层深度(m); K 为土壤导水率($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$); U 为 Kirchoff 转换变量:

$$U = \int_{-\infty}^{\Psi} K d\Psi \quad (10)$$

式中, Ψ 为土壤水压力势(m水柱)。

则每个元胞蒸散量为:

$$E = E_s + E_p \quad (11)$$

1.3.2 降雨事件产生径流

对降水事件满足产生径流的情况界定为降雨量达到元胞的最大持水量才产流(这里假设降水过程中径流对元胞水量的再分配不产生影响,同时也不考虑地下水回流形成的地表径流及其对元胞水量的影响),即降雨量 \geq 林冠截留饱和 + 枯枝落叶饱和持水量 + 土壤饱和含水量所需的必需降雨量,其中林冠达到饱和和所必需的降雨量 P_c 由下式确定^[35]:

$$P_c = \left(-\frac{RS}{E}\right) \ln\left[1 - \frac{\bar{E}}{R}(1 - P_s - P_t)^{-1}\right] \quad (12)$$

式中,饱和林冠的平均蒸发速率 \bar{E} 由公式(4)来计算, \bar{R} 为平均降雨强度($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); P_s 表示自由穿透降雨系数; P_t 为树干径流系数,可由过往研究结论得到^[36-38]。

枯落物持水 K 和土壤饱和持水量 S_s 可根据实地数据或过往研究经验确定^[19-20, 39-41]。对侧渗净交换量和渗漏的计算跟不产生径流的方程一致。在降水产生径流状态下,因为大气相对湿度接近饱和,此时大气净辐射量很小,蒸发量非常小,在这种情况下林区蒸散发极小,可以假定为0。

这样,径流产生情况下的森林水源涵养量为:

$$W_{(t+1)} = Pc + K + S_s + H_{(t+1)} - D_{(t+1)} \quad (14)$$

这里需要说明的是,尽管水分深层渗漏促进了局部元胞“水库”对同一降水事件的响应不同,但从森林水源涵养功能的角度的话,水分的深层渗漏也应该算作森林的涵养水源量。因此, $t+1$ 时刻模拟区域的森林总涵养水源量 Q 就可以表示为:

$$Q = \sum_{i=1}^m W_{(t+1)} i + D_{(t+1)} \bar{E} \cdot n \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中, Q 表示 $t+1$ 时刻森林涵养水源总量, m 表示所模拟区域的元胞单元的总数, n 为模拟次数。

2 元胞自动机的开发平台与实现工具

森林水文过程极其复杂,模型在设计的时候同时需要考虑与其他软件嵌套使用,并允许与其他模型在某

些优势功能模块上实现耦合,比如利用本模型对景观尺度的森林水源涵养量模拟,就可将水热梯度变化的模拟用其他模型的相关模块集成进本模型。表 1 为目前 CA 的开发平台以及 CA 的实现软件例子。

表 1 关于 CA 的开发平台及几个已开发实现 CA 的软件

Table 1 CA development platforms and softwares

研发平台 Development platforms	目前应用的主要领域 Main application fields	主要特点 Main characters
C	http://cell-auto.com/links/ 上就有 80 多种基于这两种语言的免费的 CA 软件,主要用于 life games、自我复制现象、3D 等	完全面向对象的编程语言,可易维护行强,开发效率高,扩展性强,可与其他软件实现对接等。
JAVA		
R	生态学 ^[42] 、社会学、经济学等领域的统计应用	强大的拓展与开发能力,提供了有弹性的、互动的环境来分析和处理数据,最重要的它是免费的平台。
GIS 软件	土地利用变化 ^[43-44] 、城市动态演化 ^[45-46] 、荒漠化演化 ^[47-48] 等	利用 GIS 软件的栅格数据处理优势,经过 2 次开发来实现 CA 模型模拟。实现 GIS 软件与 CA 的优势互补 ^[49] 。
MATLAB	城市情景模拟 ^[50] 、土地利用 ^[51] 、农业景观格局空间优化 ^[52] 、大尺度系统模拟 ^[53] 等	利用 MATLAB 编程简易,完备的数学工具函数集,以及其可提供外部数据接口的特点(如调用 C 语言编写的程序),来编写 CA 程序,其潜在优点在于其可以和其他语言编写的模型的优秀模块实现无缝结合 ^[54] 。
CA 实现软件示例 Software packages of cellular automata	CELLLAB http://www.fourmilab.ch/cellab/ BABYLOV http://www.riks.nl/ IDRISI http://www.verycd.com/topics/132440/ GeoSOS http://www.geosimulation.cn/	允许用户用 java、C 等面向对象的语言定义自己的转换规则。 操作简单,现用于土地利用动态模拟。 该软件具有 200 多个模块,有强大的栅格数据分析功能,其中的 CA-Mrakov 模块,集成了 CA 和 Mrakov 的优点。 该软件包含了常用的 CA 模型,包括 MCE-CA, Logistic-CA, PCA-CA, ANN-CA, , Decision-tree CA 等。

3 元胞自动机在流域、景观尺度森林水源涵养量评价中的优势

3.1 不同时空尺度的森林水源涵养量的尺度上推

本模型方法考虑了不同植被、地形、土壤要素对森林水源涵养功能的影响,将流域、景观划分的森林水文生态响应单元网格化为具有单一植被、地形、土壤要素的元胞单元,将每个元胞假设为一个“小水库”,通过林冠截留、林下次降雨、枯枝落叶持水、土壤蓄水、横向流、下渗、蒸散发等过程来模拟元胞水库水量变化,突破了传统 CA 模型在模型模拟时间步长上对元胞状态的离散处理方式,而对每个元胞状态“水量”实现累积处理。灵活的输入不同时空分辨率的参数,设置不同的时间步长,该模型就可以为森林水源涵养量由小尺度(水文响应单元)向流域、景观尺度研究提供有效的尺度上推方法。本模型方法考虑了影响森林水源涵养量的主要驱动因子,克服了传统上只是从单一维度定量研究森林水源涵养的不足,从森林水文过程整体耦合的角度来认识森林水源涵养量的变化。

3.2 模拟不同森林类型空间格局对森林水源涵养量的影响

随着对水源涵养林研究的逐步深入,对其经营管理策略应该考虑不同森林类型的数量结构和空间配置格局对森林水源涵养功能的影响,从而最大限度的发挥森林水源涵养效应的正功能。从支撑决策方面考虑,通过模拟不同林分格局情景下森林水源涵养效应的差异,为实现预期目标的区域水资源调控管理政策提供指导建议,同时也可制定宏观上国家层面的森林管理政策提出统筹性的框架建议。CA 模型通过模拟局部尺度上的元胞间相互作用再现了全局尺度上的复杂格局,通过改变元胞植被属性的初始状态,可以模拟不同森林类型空间格局的变化对森林水源涵养效应的影响,即不同的林型元胞间的水分侧渗、渗漏、蒸散发影响到元胞水库水量变化,进而造成对同一降雨事件的元胞所蓄水量的不同。

4 几个问题的进一步考虑

本模型没有考虑植被生长过程,在实际的应用中可以只模拟降水季节(如7—8月份)的水源涵养量及其变化特征,但从研究内容的对政策的导向作用来考虑的话,应该在未来研究中将植被生长做为一个重要的变量考虑进去,以便能更加准确的模拟森林水文过程。

为了模型高效运行,本模型框架忽略了一些森林水文细节特征,简化了模型以降低模拟难度,但是仍需要率定一些参数。有研究表明,类似复杂现象的CA模拟,通常模拟结果受模型参数的影响很大^[55],由于森林水源涵养功能是多个过程在不同尺度下的相互作用的过程或复杂的水文现象的结果,这种简化可能忽视了某些影响要素,从而影响模拟的效果。有研究人员开始利用智能式的方法来提取转换规则,如:遗传算法、Fisher判别、非线性核学习机、神经网络等,这种方法的好处是转换规则无需通过数学公式表达,能更准确的描述自然界的复杂关系^[56]。因此,本模型方法在转化规则方面还需进一步优化。

References:

- [1] Huang R Z, Li F, Xie J S, Yue Y J, Yang Y S. Dynamic change of soil reservoir storage in different forest land types in Minjiang River upper reaches of Fujian. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 50-53.
- [2] Zhao C Y, Feng Z D, Liu Y. Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 157-161.
- [3] Shands W E, Sample V A, LeMaster D C. *National Forest Planning: Searching for a Common Vision*. Washington DC: U. S Department of Agriculture Forest Service, 1990.
- [4] Teng Z J J, Zhang J J. The review of metrological evaluation on water conservation functions. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 1994, 4: 30-32.
- [5] Wootton J T. Local interactions predict large-scale pattern in empirically derived cellular automata. *Nature*, 2001, 413: 841-844.
- [6] Zhao W J, Liu Z L. The application of cellular automata in environmental sciences. *Journal of Northeast Normal University*, 2003, 35(2): 87-92.
- [7] Ma T, Zhou C H, Cai Q G. Modeling of hillslope runoff and soil erosion at rainfall events using cellular automata approach. *Soil Science Society of China*, 2009, 19(6): 711-718.
- [8] Chase C G. Fluvial landsculpting and the fractal dimension of topography. *Geomorphology*, 1992, 5(12): 39-57.
- [9] Murray A B, Paola C. A cellular model of braided rivers. *Nature*, 1994, 371: 54-57.
- [10] Murray A B, Paola C. Properties of a cellular braided-stream model. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(11): 1001-1025.
- [11] Mortlock D F. A self-organizing dynamic systems approach to the simulation of rill initiation and development on hillslopes. *Computer and Geosciences*, 1998, 24(4): 353-372.
- [12] Wu H. *HydroCA: A watershed routing Model based on GIS and cellular automata*. Beijing: Peking University, 2003.
- [13] Pablo R Rinaldi P R, Dalponte Diego D, Véenere M J, Clausse A. Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007, 15: 315-327.
- [14] Sun L D, Zhu J Z. *Metrological evaluation on synthetical efficiency of water resource conservation forest*. Beijing: Science and Technology of China Press, 1995.
- [15] Jin F, Lu S W, Yu X X, Rao L Y, Niu J Z, Xie Y Y, Zhang Z M. Forest ecosystem service and its evaluation in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1531-1536.
- [16] Deng K M, Shi P L, Xie G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of YANGTZ river and its benefits. *Resources Science*, 2002, 24(6): 68-73.
- [17] Wen Y G, Liu S R. Quantitative analysis of the characteristics of rainfall interception of main forest ecosystems on China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(4): 289-298.
- [18] Ye J, Hao Z Q, Jiang P. Studies on rainfall holding process of the bryophyte and litter layer in coniferous forest of Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2859-2862.
- [19] Ji D, Guan W B, Xie C H. Litters interception capability of dark coniferous in Gongga Mountain. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(2): 86-90.
- [20] Mo F, Yu P T, Wang Y H, Wang J, Xiong W, Xu L H. The water-holding capacity of litter layers in the forests of *Larix principis-rupprechtii* and *Betula albo-sinensis* in Liupan Mountain and their rainfall interception process. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2868-2876.
- [21] Zhao Y Y, Hu X M, Cheng J M, Wan H E. Characteristics of forest floor in Liupan Mountain. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4): 60-65.
- [22] Dingman S L. *Physical hydrology*. New York: Macmillan Publishing Company, 1994: 243-246.
- [23] Caldwell M M, Dawson T E, Richards J H. Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia*, 1998, 113: 151-161.

- [24] Ryel R J, Caldwell M M, Leffler A J, Yoder C K. Rapid soil moisture recharge to depth by roots in a stand of *Artemisiatridentata*. *Ecology*, 2003, 84: 757-764.
- [25] Fan J, Hao M D, Shao M A. Water consumption of deep soil layers and eco - enviromental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 61-64.
- [26] Wilcox B P, Breshears D D, Allen C D. Ecohydrology of aresource-conserving semiarid woodland: effects of scale anddisturbance. *Ecologica Monographs*, 2003, 73: 223-239.
- [27] Chen Q W, Mynett A E. Effects of cell size and configuration in cellular automata based prey-predator modelling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2003, 11: 609-625.
- [28] Wan R R, Yang G S. Discussion on some issues of hydrological effects of watershed land use and land cover change. *Progress in Geography*, 2005, 24(3): 26-33.
- [29] Liu S R. *Ecohydrological functions of forest ecosystems in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996: 149-164.
- [30] Peng L, Su C J, Xu Y, Man Z C. Research advance in effect of forest on hydrological process of watershed. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2007, 19(4): 94-97.
- [31] Tang D Y, Cheng W X, Hong J L. Review: evaporation study in China. *Geographical Research*, 1984, 3(3): 84-97.
- [32] Zhou G Y, Pan W C. Method of estimating evapotranspiration from forest ecosyste. *Journal of Central South Forestry University*, 1988, 1: 22-27.
- [33] Dong X H, Yu P T, Wang Y H, Wang J Y, Wang S L, Liu X D, Xu L H, Wu X D. The application of the distributed eco-hydrological model TOPOG in a mountainous small watershed of Temperate zone: a case study in the small watershed of Pailugou in Qifian mountains. *Forset Reasearch*, 2007, 20(4): 477-484.
- [34] Katerji N, Perrier A, Renard D, Oulid Aissa A K. Modélisation de l'évapotanspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: role d'un coefficient cultural. *Agronomie*, 1983, 3(6): 513-521.
- [35] Wang X, Zhang Y P, Liu W J. Modeling canopy rainfall interception of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 722-729.
- [36] Song J H, Zhang H J, Sun C, Wang Z C. Canopy interception of different forest types in the Three Gorges Region of Yangtze River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(3): 71-75.
- [37] Pei T F, Zheng Y C. The simulation and model of rainfall process distribution in forest canopy I. the models of throughfall, stemflow and canopy interception under constant rainfall intensity. *Science Silvae Sinicae*, 1996, 32(1): 1-9.
- [38] Wan S Q, Chen L Z. Characteristics of precipitation and forest stemflow of Dongling Mountainous area. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 61-67.
- [39] Cheng J H, Zhang H J, Yu X X, Zhang D S, Zhao Y T. Water holding capacity characteristic of ground cover and soil under pure *Abies fabri* forest on the Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(3): 45-49.
- [40] Wang Y, Wang B, Zhao G D, Guo H, Ma X Q, Deng Z F. Soil moisture physical characteristics of three forest types in Dagangshan mountain in Jiangxi Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1): 151-153.
- [41] Sun Y H, Zhang H J, Cheng J H, Wang Y J, Shi J, Cheng Y. Soil Characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 106-109.
- [42] Petzoldt T, Rinke K. simecol: An object-oriented framework for ecological modeling in R. *The Journal of Statistical Software*, 2007, 22(9): 1-31.
- [43] Li X, Yeh A G O. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks. *Geographical Reasearch*, 2005, 24(1): 19-27.
- [44] Yeh A G O, Li X. A constrained CA model for the simulation and palnning of sustainable urban forms by using GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28(5): 733-753.
- [45] Li X, Yeh A G O. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14: 131-152.
- [46] Batty M, Xie Y C, Sun Z L. Modeling urban dynamics through GIS-based cellulaautomata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 1999, 23(3): 205-233.
- [47] Chen J P, Ding H P, Wang G W, Li Q, Feng C. Desertification evolution modeling through the integration of GIS and cellular automata. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(3): 254-260.
- [48] Ding H P, Chen J P, Wang G W. A model for desertification evolution employing GIS with cellular automata. *Computer Modeling and Simulation*, 2009, 39: 324-328.
- [49] Wagner D F. Cellular automata and geographic information systems, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 219-234.
- [50] Ratti C, Richens P. Raster analysis of urban form. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004, 31: 297-309.
- [51] Kocabas V, Dragicevic S. Coupling bayesian networks with GIS-based cellular automata for modeling land use change. Berlin: Springer, 2006: 217-233.
- [52] Wang X G, Tang H, Wang L J, Du L J. Establishment and application of agriculture landscape pattern spatial optimization model based on GIS-MATLAB-CA. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(14): 6770-6773.

- [53] Ioakeim G. Georgoudas//Cellular Automata. Berlin: Springer, 2006: 88-93.
- [54] Jin X G. The simulation of cellular automata based on Matlab. Computer Simulation, 2002, 19(4): 27-30.
- [55] Wu F, Webster C J. simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. Environment and Planning B: Planning and Design, 1998, 25: 103-126.
- [56] Li X, Yeh A G O, Liu X P. Geographical simulation systems: multi-agent systems and the cellular automata. Beijing: Science Press, 2007: 62.

参考文献:

- [1] 黄荣珍, 李凤, 谢锦升, 岳永杰, 杨玉盛. 福建闽江上游不同林地类型土壤水库蓄水量动态变化. 水土保持学报, 2006, 20(6): 50-53.
- [2] 赵传燕, 冯兆东, 刘勇. 干旱区森林水源涵养生态服务功能研究进展. 山地学报, 2003, 21(2): 157-161.
- [4] 藤枝基久, 张建军. 水源涵养机能量化的研究现状. 科学和水土保持技术信息, 1994, 4: 30-32.
- [6] 赵文杰, 刘兆理, CA 在环境科学中的应用. 东北师范大学学报(自然科学版), 2003, 35(2): 87-92.
- [12] 吴欢. 基于 GIS 与 CA 的流域汇流模型研究. 北京: 北京大学, 2003.
- [13] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [15] 靳芳, 鲁绍伟, 余新晓, 饶良懿, 牛建植, 谢媛媛, 张振明. 中国森林生态系统服务功能及其评价. 应用生态学报, 2005, 16(8): 531-1536.
- [16] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究. 资源科学, 2002, 24(6): 68-73.
- [17] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析. 林业科学, 1995, 31(4): 289-298.
- [18] 叶吉, 郝占庆, 姜萍. 长白山暗针叶林苔藓枯落物层的降雨截留过程. 生态学报, 2004, 24(12): 2859-2862.
- [19] 季冬, 关文彬, 谢春华. 贡嘎山暗针叶林枯落物截留特征研究. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 86-90.
- [20] 莫非, 于澎涛, 王彦辉, 王晶, 熊伟, 徐丽宏. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程. 生态学报, 2009, 29(6): 2868-2876.
- [21] 赵艳云, 胡相明, 程积民, 万惠娥. 六盘山林地地被物分布特征. 水土保持通报, 2008, 28(4): 60-65.
- [25] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
- [28] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨. 地理科学进展, 2005, 24(3): 26-33.
- [29] 刘世荣. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996: 149-164
- [30] 彭立, 苏春江, 徐云, 满正闯. 森林对流域水文过程影响的研究进展. 江西农业学报. 2007, 19(4): 94-97.
- [32] 周国逸, 潘维涛. 森林生态系统蒸发散计算方法的研究. 中南林学院学报, 1988, 1: 22-27.
- [33] 董晓红, 于澎涛, 王彦辉, 王金叶, 王顺利, 刘贤德, 徐丽宏, 吴旭东. 分布式生态水文模型 TOPOG 在温带山地小流域的应用——以祁连山排露沟小流域为例. 林业科学研究, 2007, 20(4): 477-484.
- [35] 王馨, 张一平, 刘文杰. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用. 生态学报, 2006, 26(3): 722-729.
- [36] 宋吉红, 张洪江, 孙超, 王智超. 缙云山自然保护区不同森林类型林冠的截留作用. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 71-75.
- [37] 裴铁璠, 郑远长. 林冠分配降雨过程模拟与模型 I. 常雨强下穿透降雨、树干径流和林冠截留模型. 林业科学, 1996, 32(1): 1-9.
- [38] 万师强, 陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流. 生态学报, 2000, 20(1): 61-67
- [39] 王燕, 王兵, 赵广东, 郭浩, 马向前, 邓宗富. 江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究. 水土保持学报, 2008, 22(1): 151-153.
- [40] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 王玉杰, 石健, 程云. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
- [43] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统. 地理研究, 2005, 24(1): 19-27.
- [47] 陈建平, 丁火平, 王功文, 厉青, 冯春. 基于 GIS 和 CA 的荒漠化预测模型. 遥感学报, 2004, 8(3): 254-260.
- [52] 汪雪格, 汤洁, 王立军, 杜立志. 基于 GIS-MATLAB-CA 的农业景观格局空间优化模型的建立及应用. 安徽农业科学, 2009, 37(14): 6770-6773.
- [54] 金小刚. 基于 Matlab 的元胞自动机的仿真设计. 计算机仿真, 2002, 19(4): 27-30.
- [56] 黎夏, 叶嘉安, 刘小平, 杨青生. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社, 2007: 62.