



分布式生态水文模型 EcoHAT 系统开发及应用

刘昌明^{*}, 杨胜天^{*}, 温志群, 王雪蕾, 王玉娟, 李茜, 盛浩然

北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

^{*} E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

收稿日期: 2008-07-28; 接受日期: 2009-02-13

国家科技支撑计划(批准号: 2006BAB06B07)、国家自然科学基金(批准号: 40671123)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2005CB422207, G19990436)和国家高技术研究发展计划(“863”计划)(批准号: 2006AA12Z145)资助项目

摘要 水循环模拟系统(HydroInformatic Modeling System, 简称 HIMS)的开发已为水循环模拟提供了综合的模拟工具. 本文为扩展 HIMS 系统的应用, 紧密集成 RS/GIS 技术, 自主开发了生态水文模拟系统(Ecohydrological Assessment Tool, 简称 EcoHAT), 对生态水文过程进行模拟. 该系统以基本的生态水文过程为基础, 集成了参数管理、RS 参数反演、模型定制工具、GIS 分析等工具, 实现了区域尺度的分布式生态水文模拟, 为水资源可持续利用提供了新的思路. 通过 EcoHAT 在我国黄河流域典型地区、贵州酸沉降地区及北京官厅水库库岸带等地区的应用, 表明 EcoHAT 系统能有效模拟和分析区域生态水文过程, 为流域水资源综合管理提供技术支撑.

关键词

EcoHAT 系统
生态水文
分布式模型
遥感

1 引言

水是生态系统中最重要单元要素之一. 随着人类活动的加剧, 传统的水资源管理方式已经难以解决淡水资源短缺、水质恶化和生物多样性减少等生态问题. 综合考虑水文学和生态系统要素的关联, 研究生态过程与水文过程相互作用的物理化学机制, 寻求对生态有利、水资源可持续利用的管理方式是当前亟待解决的重要问题^[1]. 生态水文是当今许多国际全球研究项目进行合作的热点, 如国际地圈生物圈计划——生物圈方面(IGBP-BAHC)^[2]、联合国教科文组织国际水文计划(UNESCO IHP)^[3]等, 都把生态水文学作为一个重要的研究课题. 生态水文学发展为水资源可持续利用研究提供了新的开拓.

生态水文过程影响因素众多, 而且具有明显的时间和空间变异性. 随着 RS、GIS 和计算机技术的发

展, 计算机模拟成为生态水文时空过程研究的重要手段. 以 GIS 为平台, RS 技术为获取空间信息的手段, 建立区域尺度的分布式生态水文模型, 成为当今水文水资源研究的新方向. 美国农业部(USDA)农业研究局(ARS)开发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)流域尺度模型, 用于模拟预测在大流域复杂多变的土壤类型、土地利用方式和管理措施条件下, 土地管理对水文、泥沙和化学物质的长期影响^[4]. 德国的波斯坦气候影响研究所开发的 SWIM(Soil and Water Integrated Model)模型用于模拟和预测全球气候变化和土地利用方式改变下流域的水循环、植被生长、营养与污染物质迁移、泥沙运动等生态水文过程^[5]. 我国的生态水文过程研究主要侧重在干旱区、湿地、森林生态系统局部尺度上土壤-植被-大气传输中水与植被的相互影响, 尚缺乏区域尺度的生态和水文过程

相互融合的生态水文模拟系统^[6-8].

结合国家 973 黄河项目(G19990436-01), 中国科学院地理科学与资源研究所开发的 HIMS 系统具有分布式模拟水文过程的功能^[1]. 但 HIMS 尚缺乏水循环过程中营养元素循环, 以及水分和营养元素与生态系统的模拟, 特别是与植被的相互作用的模拟. 因此本文进行了扩展. 随着遥感技术的进步, 遥感已经成为水文模型的重要数据源, 不仅可以提供丰富的大尺度信息, 还可以提供许多常规传统方法难以观测到的水循环要素数据^[9]. 因此, 为扩展 HIMS 系统的应用, 充分利用遥感数据源, 耦合具有物理化学机制的生态水文过程模型, 模拟土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 水分运行过程中水分和营养元素循环、植被生长间的相互影响, 我们研发出了区域尺度的分布式生态水文模拟系统 EcoHAT.

2 EcoHAT 系统的模型结构及原理

EcoHAT 系统以生态水文过程机理研究为基础, 从基本的土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 水分运行过程入手, 在水分循环过程加入营养元素迁移转化过程, 综合考虑生态系统中植被生长与土壤水分、营养元素的相互影响. EcoHAT 系统的生态水文过程如图 1 所示, 其模型构建主要基于国内外具有物理化学机

制的生态水文过程算法, 经过对模型参数调整, 采用适合研究区域自然条件的参数, 建立本地化的模型参数库. EcoHAT 系统通过区域空间网格参数的输入, 实现基于象元的模型运算.

EcoHAT 系统主要由水分循环、营养元素循环和植物生长三大部分组成, 其中水分循环是系统的核心, 并贯穿其他两部分的始终. EcoHAT 系统中水分循环过程包括冠层截留、降雨入渗、根系吸水、土壤水分、蒸散发等, 通过耦合 HIMS 模型增加了地表径流、壤中流、地下水补给、基流、坡面汇流、河道汇流等过程; 营养元素循环过程主要包括大气沉降、风化、矿化、土壤硝化、反硝化、氨化、微生物腐化分解; 植物生长过程包括植被营养元素吸收、植被 NPP(净第一性生产力)、生产力分配和凋落物. 土壤水分是土壤-植被-大气连续体中水分物质循环中的重要环节, 影响蒸散发、营养元素循环、植被的生长^[10]. 在 EcoHAT 系统中, 通过土壤水分平衡模型, 模拟得到土壤水分含量, 作为蒸散发、营养元素循环、植被的生长等过程的参数输入. 同时植被也会通过蒸散、营养元素吸收、凋落物等过程, 影响土壤水分和营养元素循环. EcoHAT 系统中生态水文过程的子模块组成和主要方程如表 1 所示.

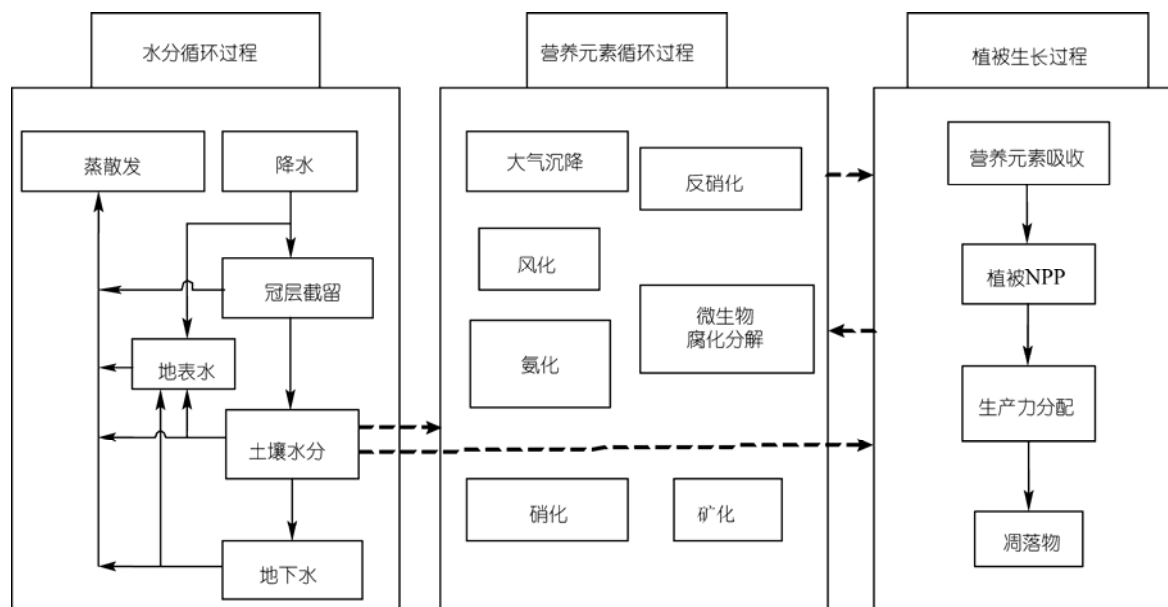


图 1 EcoHAT 系统的生态水文过程(虚线的箭头表示过程间的相互作用)

表 1 EcoHAT 系统生态水文过程的主要方程

过程模型	模型描述	主要方程	理论基础
冠层截留	模拟冠层截留量	$I_{vA} = \min(d_c \cdot P, I_v, W_{cd})$ $I_v = K_c \cdot d_c \cdot LAI$	HIMS ^[1]
降雨入渗	模拟降水后各层土壤水分增量	$\Delta D_i = \begin{cases} P - \sum_{i=1}^{i-1} \Delta D_i, & \left(P > \sum_{i=1}^{i-1} \Delta D_i \right) \\ 0, & (\text{other}) \end{cases}$	土壤入渗水再分配 ^[11]
蒸散发	模拟植被覆盖情况下的地表水分蒸发	$ET_p = K_c \cdot ET_0$ $ET_a = K_s \cdot ET_p$	FAO 推荐方法
根系吸水	模拟植物根系的吸收量	$S_{root,z} = K_s \cdot T_p \cdot \left[1 - \exp\left(-\beta_t \cdot \frac{z}{z_{root}}\right) \right]$	DeJong 吸水函数 ^[12] , SWAT 模型 ^[4]
土壤水分	依据水分平衡原理, 模拟不同深度土层土壤湿度的日变化	降水条件(有棵间蒸发): $SW^{j+1} = SW^j + \Delta D^j - E_a^j - S_{root}^j$ 非降水条件: $SW^{j+1} = SW^j - E_a^j - S_{root}^j$	土壤水分均衡模型 ^[13-15] , SWAT 模型 ^[4]
地表径流	依据水量平衡方程, 地表径流量等于 降水量减去下渗量	$Q_d = P - \sum_{i=1}^{i-1} \Delta D_i$	HIMS ^[1]
壤中流	经验公式, 壤中流与土湿和降水入渗量成正比	$Q_l = L_a \cdot (SW / SW_m) \cdot \sum_{i=1}^{i-1} \Delta D_i$	HIMS ^[1]
地下水补给量	经验公式, 地下水入渗补给与 土湿和降水垂向入渗量成正比	$REC = R_c \cdot (SW / SW_m) \cdot \left(\sum_{i=1}^{i-1} \Delta D_i - Q_l \right)$	HIMS ^[1]
基流	简单基流系数方法	$Q_b = K_b \cdot (GW_s + REC)$	HIMS ^[1]
坡面汇流	简化的动力学方法	$V_s = m S_1^x h^y$	HIMS ^[1]
河道汇流	马斯京根模型	$Q_{out,2} = C_1 Q_{in,2} + C_2 Q_{in,1} + C_3 Q_{out,1}$ $D_a = D_p f_N f_s f_T f_{pH}$	HIMS 马斯京根模型 ^[11]
土壤反硝化	模拟土壤硝态氮转化成氮气的速率	$D_p = \frac{4}{5} \frac{\alpha_{om}}{365} C \frac{14}{12} 10^6$	简单反硝化模型 ^[16-20]
土壤硝化和氨化	模拟土壤硝化速率和铵根离子转化成氮气的速率	$N_{nit/vol} = NH_4 \cdot (1 - \exp(-\eta_{nit} - \eta_{vol}))$	SWAT 模型 ^[4,21]
凋零物矿化	模拟凋零物在土壤微生物的作用 下分解为盐基阳离子的量	$\frac{dL_{dec}}{dt} = L_{ff} (1 - e^{-k_\delta})$	ForNBM 模型 ^[22,23]
土壤与土壤溶液盐 基阳离子交换	模拟土壤胶体吸附的盐基阳离子的量和 土壤溶液中盐基阳离子浓度	$\frac{\{Ca^{2+}\}^3 E_{Al}^2}{\{Al^{3+}\}^2 E_{Ca}^3} = S_{Al/Ca}$ $\frac{\{Na^+\}^2 E_{Mg}}{\{Mg^{2+}\} E_{Na}^2} = S_{Mg/Na}$ $\frac{\{Ca^{2+}\} E_H^2}{\{H^+\}^2 E_{Ca}} = S_{H/Ca}$ $\frac{\{K^+\} E_H}{\{H^+\} E_K} = S_{H/K}$ $\frac{\{Na^+\}^2 E_{Ca}}{\{Ca^{2+}\} E_{Na}^2} = S_{Ca/Na}$ $\frac{\{Na^+\} E_K}{\{K^+\} E_{Na}} = S_{K/Na}$ $\frac{\{Mg^{2+}\} E_H^2}{\{H^+\}^2 E_{Mg}} = S_{H/Mg}$ $\frac{\{Na^+\} E_H}{\{H^+\} E_{Na}} = S_{H/Na}$	MAGIC 模型 ^[24]
植被净第一性 生产力	模拟植被净第一性生产力	$GPP = \varepsilon \times APAR \times f_1(T) \times f_2(\beta)$ $\times f_3(NU)$ $NPP = GPP - R_a$	光能利用率模型, ForSVA 模型 ^[23,25]
生产力分配	模拟生产力在叶片、枝干、根系的分配量	$\frac{dNPP_{leaf}}{dt} = R_{leaf} \frac{\mathcal{E}_{LA}}{dt}$ $\frac{dNPP_{wattle}}{dt} = K_r \left(\frac{dNPP}{dt} - \frac{dNPP_{leaf}}{dt} \right)$	ForNBM 模型 ^[26]
植被营养元素吸收	模拟植被对营养元素的吸收量	$X_{uptake} = \min(X_{avail}, X_{dem})$	ForSVA 模型 ^[23,25] , ForNBM 模型 ^[26]

在表 1 中, I_{vA} 为冠层截留量/mm; d_c 为植被覆盖度/%; P 为净降雨量/mm; I_v 为冠层截留能力/mm; W_{cd} 为冠层缺水量/mm; K_c 为作物系数; LAI 为叶面积指数; ΔD 为降水或灌溉导致的土壤水分增量/mm; ET_p 为潜在蒸散量/mm; ET_0 为局地潜在蒸散量/mm; ET_a 为实际蒸散量/mm; K_s 为土壤水分胁迫系数; $S_{root,z}$ 为 Z 土层深度的根系吸水量/mm; T_p 为植物的潜在蒸腾量/mm; β_t 为有效水分配系数; $Z_{root,z}$ 为根在土层中的深度/mm; SW^j 为第 j 层土壤含水量/mm; E_a 为土表实际棵间蒸发量/mm; L_a 为壤中流系数; SW_m 为土壤最大持水量/mm; R_c 为地下水补给系数; K_b 为基流系数; GW_s 为地下水蓄量/mm; V_s 为坡面断面上平均流速/ $m \cdot s^{-1}$; m 为坡面平均糙率; S_l 为山坡坡面水力坡度; h 为水力半径/m; x, y 为指数; $Q_{in,1}, Q_{in,2}$ 为河段时段初和时段末的入流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$; $Q_{out,1}, Q_{out,2}$ 为河段时段初和时段末的出流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$; C_1, C_2, C_3 为系数; D_a 为实际反硝化速率/ $gN \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; D_p 为潜在反硝化速率/ $gN \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; f_N 为无维土壤硝酸盐衰减函数; f_s 为无维土壤水分衰减函数; f_T 为无维土壤温度衰减函数; f_{PH} 为无维土壤酸碱性衰减函数; α_{om} 为土壤有机质衰减率; C 为土壤中碳的含量/ $gC \cdot g^{-1}$; $N_{nit/vol}$ 为土层中硝化和氨气挥发释放的 N 总量/ $gN \cdot m^{-2}$; NH_4 为土壤中铵根的总量/ $mol \cdot m^{-2}$; η_{nit} 为铵根硝化因子; η_{vol} 为铵根挥发因子; L_{dec} 为凋零物的分解速/ $mol \cdot m^{-2}$; L_{ff} 为凋落物的量/ $gC \cdot m^{-2}$; K_θ 为温湿度影响因子; $\{Ca^{2+}\}, \{Na^+\}, \{K^+\}, \{Mg^{2+}\}, \{H^+\}, \{Al^{3+}\}$ 为土壤水中各种离子的活度/ $mol \cdot m^{-2}$; $E_{Ca}, E_{Mg}, E_{Na}, E_K, E_H, E_{Al}$ 为土壤可交换盐基百分比; $S_{Al/Ca}, S_{Ca/Na}, S_{Mg/Na}, S_{K/Na}, S_{H/Ca}, S_{H/Mg}, S_{H/K}, S_{H/Na}$ 为土壤可选择交换系数; GPP 为总第一性生产力/ $gC \cdot m^{-2}$; R_a 为植物呼吸消耗量/ $gC \cdot m^{-2}$; ε 为光能转化率/ $gC \cdot MJ^{-1}$; $APAR$ 为植物吸收的光合有效辐射量/ $MJ \cdot m^{-2}$; $f_1(T)$ 为温度对光合作用的影响函数; $f_2(\beta)$ 为土壤水分对光合作用的影响函数, 由土壤水分胁迫系数 K_s 计算; $f_3(NU)$ 为营养元素对 GPP 的影响函数; NPP 为植物净第一性生产力/ $gC \cdot m^{-2}$; NPP_{leaf} 为叶片的 $NPP/gC \cdot m^{-2}$; R_{leaf} 为单位面积(m^2)叶片的生物量/ g ; ε_{LA} 为叶面积月增加量/ m^2 ; NPP_{wattle} 为分配到枝干的 NPP/g ; K_r 为分配系数; X_{uptake} 为植物吸收盐基离子的量/ $gC \cdot m^{-2}$; X_{avail} 为植物对盐基离子的可利用量/ $gC \cdot m^{-2}$; X_{dem} 为植物对盐基离子的需求量/ $gC \cdot m^{-2}$.

3 EcoHAT 系统的构建

3.1 EcoHAT 系统的结构框架

EcoHAT 系统集成了参数管理工具、RS 参数反演工具、模型定制工具、GIS 分析工具, 在这些模块的辅助下实现区域尺度生态水文过程模拟, 从而为区域生态水文过程评估提供科学分析工具. EcoHAT 系统的结构框架如图 2 所示.

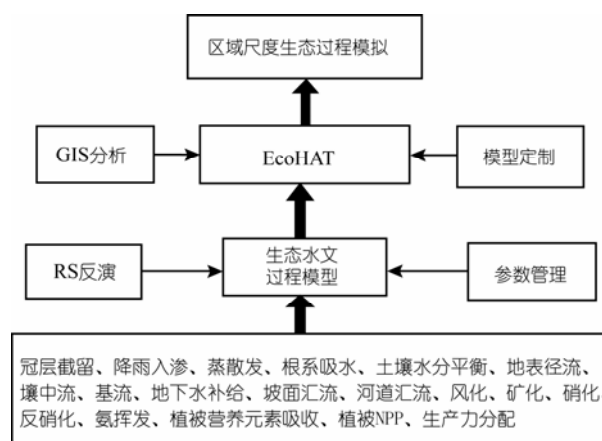


图 2 EcoHAT 系统的结构框架

3.2 EcoHAT 系统的功能开发

为适应空间参数管理、地表空间参数获取、生态水文过程模拟、分布式模型的网格运算、模拟结果可视化等问题, EcoHAT 系统的开发突出以下功能模块:

() 参数管理. 由于生态水文过程涉及到的参数众多, 数据类型包括文本数据, 点、线、多边形等矢量数据以及栅格数据, 因此 EcoHAT 系统采用文件管理方式, 把模型运算的所有输入参数放到同一个文件夹. 文件名和文件格式按模型的要求命名和组织, 在模型运算时自动读取对应参数, 实现模型参数管理.

() 地表参数遥感反演. 遥感资料作为重要的数据源之一, EcoHAT 系统集成了遥感反演地表参数的算法, 反演的基本地表参数包括各种植被指数、地表反照率、地表温度、叶面积指数、土壤水分、土壤温度、太阳辐射等地表参数. 通过遥感参数的反演, 为生态水文过程模拟提供了空间数据源.

() 生态水文过程模拟. EcoHAT 系统对生态水文的各个过程进行模拟, 包括多个水分循环过程, 如

上述表 1 与图 2 所列的过程. 通过模块化的模型界面, 方便用户选择不同的模型, 为生态水文过程模拟提供输入输出参数. 采用指定文件夹路径的数据输入方式, 读取模型所需的参数, 为模型计算提供所需参数. 在计算过程中, 利用栅格数据分块运算技术, 解决了分布式模型的网格运算速度慢和占用内存大的问题.

() 区域尺度生态过程模拟. 根据生态过程模拟需求, 以各个单独生态水文过程模拟为基础, 通过对模块化生态水文过程的模型定制, 实现区域尺度生态过程模拟.

() GIS 分析工具. EcoHAT 系统自主开发了 GIS 分析工具, 可以把模型模拟结果直接导入进行可视化显示、统计及制图输出, 方便模拟结果的分析.

3.3 EcoHAT 系统的技术开发

EcoHAT 系统的开发采用 IDL (Interactive Data Language) 语言. IDL 是可视化分析和应用系统开发的理想软件工具, 利用 IDL 语言进行开发具有快速高效、矩阵运算速度快的优点. 因此, 在 Windows 操作系统下, 以 IDL 为平台, 采用面向对象的编程方法, 对各个功能模块和过程子模型进行集成. EcoHAT 系统开发的技术思路与 HIMS 一样, 是模块化的模型界面开发与集成, 栅格数据处理包括了分块运算和影像金字塔技术. EcoHAT 系统的界面如图 3 所示.

() 模块化的模型界面开发与集成. 运用面向对象的编程方法, 分别把 EcoHAT 系统中的生态水文过程的各个子模块定义成类. 每个类里包含了该生态水文过程的属性和方法, 类的属性包括了输入输出参数, 类的划分包括了实现模型多种算法的方法. 通过类的创建, 可以实现对任何一个模块的调用和集成, 实现对不同生态水分过程进行综合模拟.

() 栅格数据分块运算和影像金字塔技术. 针对大区域高分辨率栅格数据的运算和结果可视化问题, 开发了栅格数据分块运算和影像金字塔技术^[27]. 栅格数据分块运算技术把参与模型运算的所有栅格数据分割为相同的小块, 分别把每一个小块作为参数输入参与运算. 一个小块运算结束后, 先存储到磁盘上, 再接着处理下一个分块. 通过数据分块, 解决了分布式模型的网格运算速度慢的问题. 影像金字

塔技术对大区域高分辨率栅格数据创建栅格金字塔, 在对模拟结果可视化时根据显示比例尺和区域范围读取相应的影像金字塔数据, 避免了重复采样耗时, 减少了占用内存, 提高了大区域高分辨率栅格数据的处理速度和系统的运行速度.

4 EcoHAT 系统应用的实例与验证

结合国家“973”项目(G19990436)与国家“十一五”项目(2006BAB06B07)等任务, EcoHAT 系统在黄河流域典型地区、贵州酸沉降地区、北京官厅水库库滨带等地区进行了应用和验证.

4.1 黄河流域典型地区生态耗水监测的应用与验证

黄河三门峡水库运行影响到渭河水文情势, 调节三门峡水库又有可能危害库区沿黄河地区已经形成的生态平衡, 因此开展三门峡库区植被生态耗水监测具有重要意义. 为此, 选择黄河三门峡水库为中心的 地区为研究区, 该地区位于 $110^{\circ}21'42''E \sim 112^{\circ}01'21''E$, $33^{\circ}31'24''N \sim 35^{\circ}05'48''N$, 面积 3754 km^2 , 处于中纬度内陆地区, 属暖温带大陆性季风气候, 多年平均年降水量约为 574 mm , 降水量年际变化很大, 年内分布不均, 水资源短缺. 利用 EcoHAT 系统中的降雨入渗、根系吸收、土壤水分、蒸散发过程, 估算植被的生态耗水量. 模型的参数输入包括气象参数和遥感参数. 气象参数主要包括降雨量、气压、相对湿度、地温、风速、太阳总辐射、气温; 遥感参数主要包括植被指数、叶面积指数、地表比辐射率、反照率、地表温度、植被覆盖度. 以 Landsat-5 TM 数据为主要数据源, 首先在 EcoHAT 系统上利用遥感参数反演工具, 从 Landsat-5 TM 影像反演获得植被指数、叶面积指数、地表比辐射率、反照率、地表温度、植被覆盖度等地表参数; 应用非监督分类与目视解译结合的解译方法, 将研究区植被类型分为林地、草地、灌丛、农用地(仅限于雨养农业)和未利用地 5 大类, 得到研究区土地利用空间分布; 利用 GIS 工具, 把气象站点的大气压、风速、气温、相对湿度等气象参数插值为栅格图, 并且选择其分辨率和 Landsat-5 TM 影像相一致. 在模型界面下, 输入参数, 运行模型, 得到黄河三门峡区域 2002 年 8 月植被生态耗水量模拟结果, 如图 4 所示.

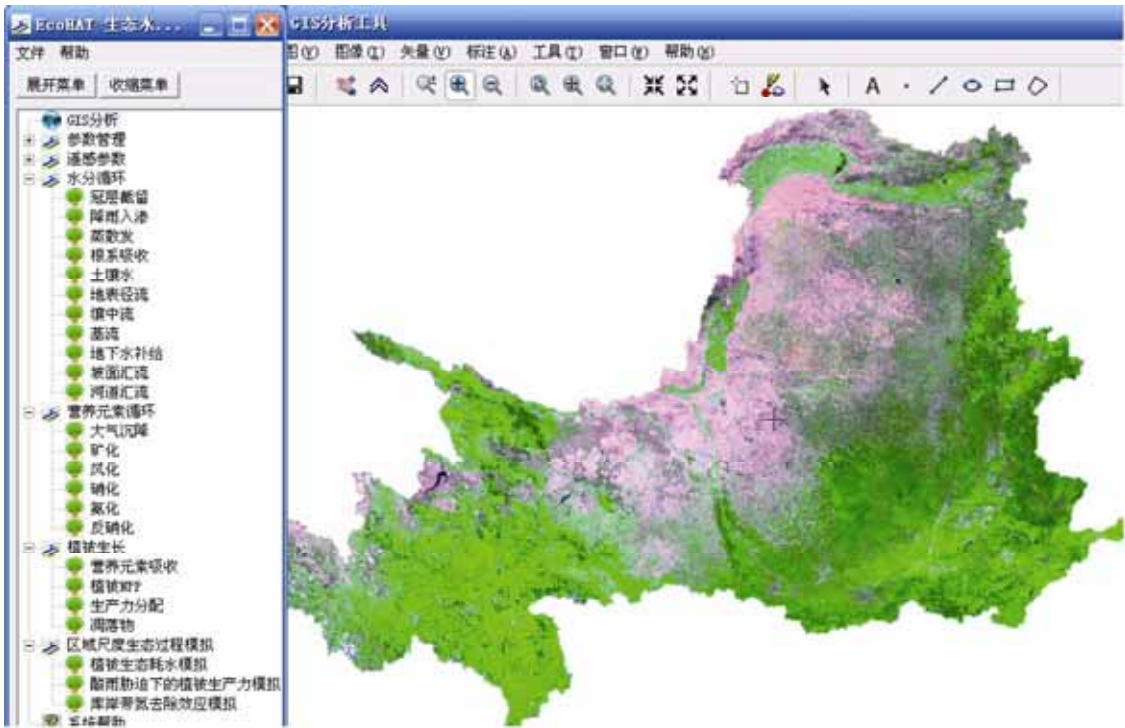


图 3 EcoHAT 系统界面



图 4 黄河三门峡地区的植被生态耗水量空间分布图(单位: mm)

为了验证 EcoHAT 计算精度, 采用研究区泾川气象观测站的大孔径闪烁仪观测的 2006 年 1 月日均显热通量值, 根据能量平衡, 得到观测点的日均蒸散发, 即植被生态耗水量; 同时, 利用 EcoHAT 模型, 用北京一号遥感数据模拟计算得到观测点同时期的日植被生态耗水量. 将观测值与模拟得到的结果进行验证分析(见图 5). 验证结果表明, 模拟值和实测值有较好的相关系数($R=0.9$), 平均相对误差仅为 9.4%, 验证了 EcoHAT 系统中植被生态耗水量模型模拟的

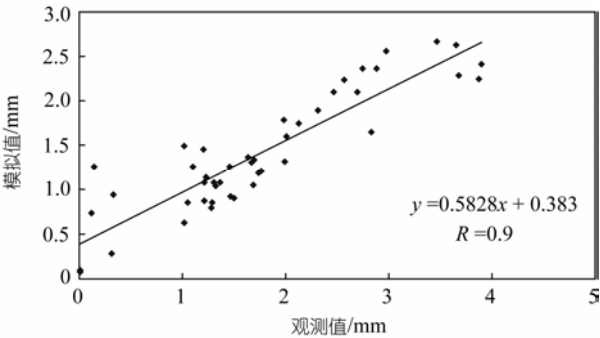


图 5 植被生态耗水量模拟值与实测值相关图

有效性.

4.2 贵州酸沉降对植被生长影响的应用与验证

贵州是受酸沉降较为严重的地区, 研究酸雨对植被生长的影响具有重要意义. 研究区位于 $106^{\circ}34'25''\text{E}\sim 107^{\circ}30'12''\text{E}$, $25^{\circ}53'45''\text{N}\sim 26^{\circ}45'28''\text{N}$, 面积 6850 km^2 , 该地区的土壤主要为黄壤土, 植被属阔叶林和针叶林混交地带, 但以阔叶林居多, 其主要树种有马尾松、杉树、梨、刺槐、栎树、毛栗等, 年均气温为 14.7°C , 年平均降雨量约为 1159 mm . 酸沉降到达地表后, H^+ 置换了土壤胶体所吸附的盐基阳离子, 导致土壤中的 N, P, Ca, Mg, K 等营养元素淋失, 使土壤贫瘠化, 从而导致植物长势衰退, 生产力下降. 通过 EcoHAT 可以研究酸沉降对植被生长的影响.

利用 EcoHAT 中土壤水分、大气沉降、风化、矿化、植被吸收、植被 NPP 等过程模型, 模拟酸沉降对植被生长的影响. 模型的主要输入参数有: 降水的 pH 值, 降水和土壤中 N, P, Ca, Mg, K 离子浓度, 不同

植被对 N, P, Ca, Mg, K 的胁迫系数、植被类型图、叶面积指数. 其中的植被类型图、叶面积指数等参数利用系统的遥感参数反演工具从 Landsat-5 TM 遥感数据得到, 其余的离子参数通过地面采样后在试验室内测得. 首先, 利用水分循环模块, 模拟土壤水分, 作为营养元素循环、植被生长的胁迫因子; 然后利用营养元素循环模拟酸沉降条件下土壤中营养元素含量的变化; 最后模拟土壤水分、土壤中营养元素含量胁迫的植被 NPP. 运行模型得到研究区酸雨条件下的每个月的植被 NPP, 模拟的时间步长为月, 累加后得到研究区全年植被 NPP 空间分布图(见图 6). 把模型的模拟结果与实测数据进行对比, 不同植被类型的平均相对误差为 8.5%.

为了模拟不同酸沉降条件下对植被 NPP 的影响, 考虑到研究区的降水 pH 值为 4.8, 设定降水 pH 值比现状降低 1, 即变化范围为 4.8 到 3.8, 得到不同酸沉降条件下植被 NPP 的相对变化情况(见图 7), 可以

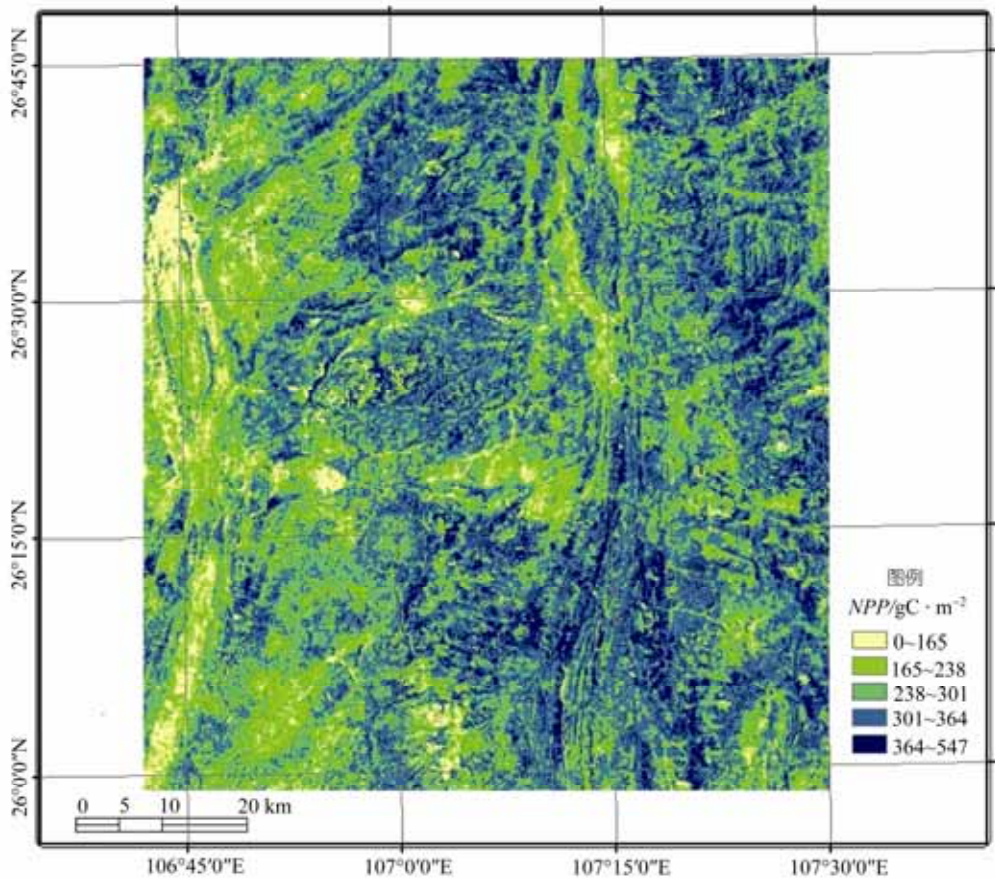


图 6 研究区 2006 年 12 月~2007 年 11 月植被 NPP 空间分布图

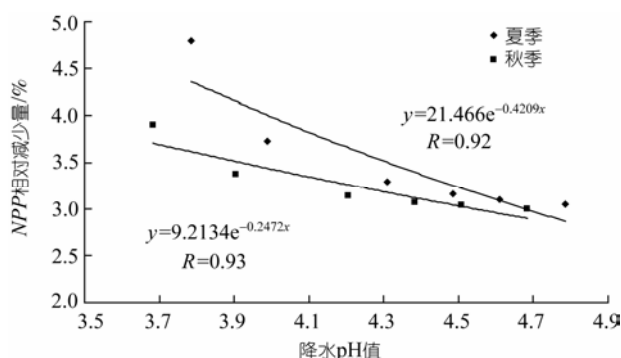


图 7 NPP 的相对变化量与降水酸碱度 pH 值的关系

看到研究区的植被受酸雨的胁迫影响显著。

4.3 北京官厅水库库滨带的应用与验证

官厅水库是北京的重要水源地之一, 其库滨带是防止非点源污染进入水库的最后一道缓冲地带。官厅水库库滨带处于 $115^{\circ}30'E \sim 116^{\circ}E$, $40^{\circ}N \sim 40^{\circ}30'N$, 涉及面积约 670 km^2 , 处于半湿润大陆季风型气候区, 多年平均气温约为 $2 \sim 8^{\circ}C$, 多年平均降雨量 406 mm , 年内降水量主要集中在 7, 8 月份。水库库滨带生态系统位于水陆交错带, 因此相对于单纯的陆地生态系统和水生生态系统, 库滨带生态系统在运行机制和生态功能方面都更具独特性。库滨带的生态功能主要体现在对营养元素截留, 例如通过土壤化学释氮和植被吸收去除环境中的氮元素, 在这两个过程中, 土壤水分作为土壤化学反应剂、植被吸收营养元素的介质, 是氮元素去除过程中一个不可缺少的环节。

利用 EcoHAT 系统对其库滨带去氮效应进行模拟, 包括土壤中氮的硝化、反硝化、氨化和植物对氮元素的吸收等过程模拟。模型的输入参数数据包括日气象数据, 土壤数据和遥感数据, 其中遥感数据为 Landsat-5 TM 和 SPOT5 影像数据, 前者主要用于地表参数的反演, 后者用于土地利用、土壤类型和植被类型的信息提取。我们首先应用 EcoHAT 系统中的遥感参数反演工具反演植被指数, 叶面积指数, 地表比辐射率, 植被盖度, 地表净辐射和土壤温度等基本地表参数; 然后应用水分循环过程模块估算库滨带蒸散发和土壤水分; 再应用营养元素循环模块模拟库滨带土壤的反硝化、硝化和氨化过程, 从而估算库滨

带系统土壤化学过程对氮元素的去除量; 最后应用植被生长过程模块, 从遥感估算 NPP 入手, 估算植物生长期间对氮营养元素的吸收量。模拟周期为 2007 年 3~9 月, 时间尺度为月, 全流域氮去除量空间分布图如图 8 所示。

为验证模型模拟的可靠性, 在官厅水库纳水河流域(延庆水保站)开展了同步的库滨带模拟试验^[28]。依据模拟试验监测结果, 采用总量平衡法对氮素截留的模拟结果进行检验, 检验采用以下公式:

$$TN_{s0} - TN_{sn} = TN_p + TN_{sr} + TN_{sl},$$

式中 TN_{s0} 为土壤中初始的总氮量/ $\text{gN} \cdot \text{m}^{-2}$, 即试验初期测定的土壤 TN 本底值; TN_{sn} 为 n 天后土壤中剩余的总氮量/ $\text{gN} \cdot \text{m}^{-2}$, 即 9 月份测定的土壤样品中 TN 的平均值; TN_p 为 n 天后植被吸收的氮量/ $\text{gN} \cdot \text{m}^{-2}$, 由植物生长期测定的 TN 浓度和植物生物量确定; TN_{sr} 为 n 天内土壤总的释氮量/ $\text{gN} \cdot \text{m}^{-2}$, 即为 6~9 月份, 土壤硝化和反硝化释放的含 N 气体量; TN_{sl} 为 n 天内土壤中的淋溶的氮量/ $\text{gN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

由于模拟实验采用半封闭系统, 隔绝了土壤与地下水的联系, 因此, 在淋溶量 TN_{sl} 为 0 的情况下, 将 6~9 月间土壤中总氮的减少量与植物吸收氮量的差值作为土壤释氮的实验值, 并与模型模拟得到的土壤释氮量进行相关分析(相关系数大于 0.7), 如图 9 所示。相关分析结果证明了模型的有效性。

5 结论与讨论

EcoHAT 在黄河流域典型地区、贵州酸沉降地区、官厅水库库岸带地区等区域的应用表明, 它能够用于区域尺度的生态水文过程模拟和分析, EcoHAT 系统是一个区域尺度的分布式生态水文模拟系统, 目前已经取得软件著作权(2008SR06938)。与国内外同类水文模拟系统相比, 该系统具有以下特色。

() EcoHAT 系统集成了生态水文过程中的水分循环过程、营养元素循环过程、植被生长过程, 把水分循环过程和营养元素循环、植被生长紧密结合, 能从物理化学机理上对区域生态水文过程进行综合模拟。

() EcoHAT 系统与 RS 紧密结合, 集成了遥感

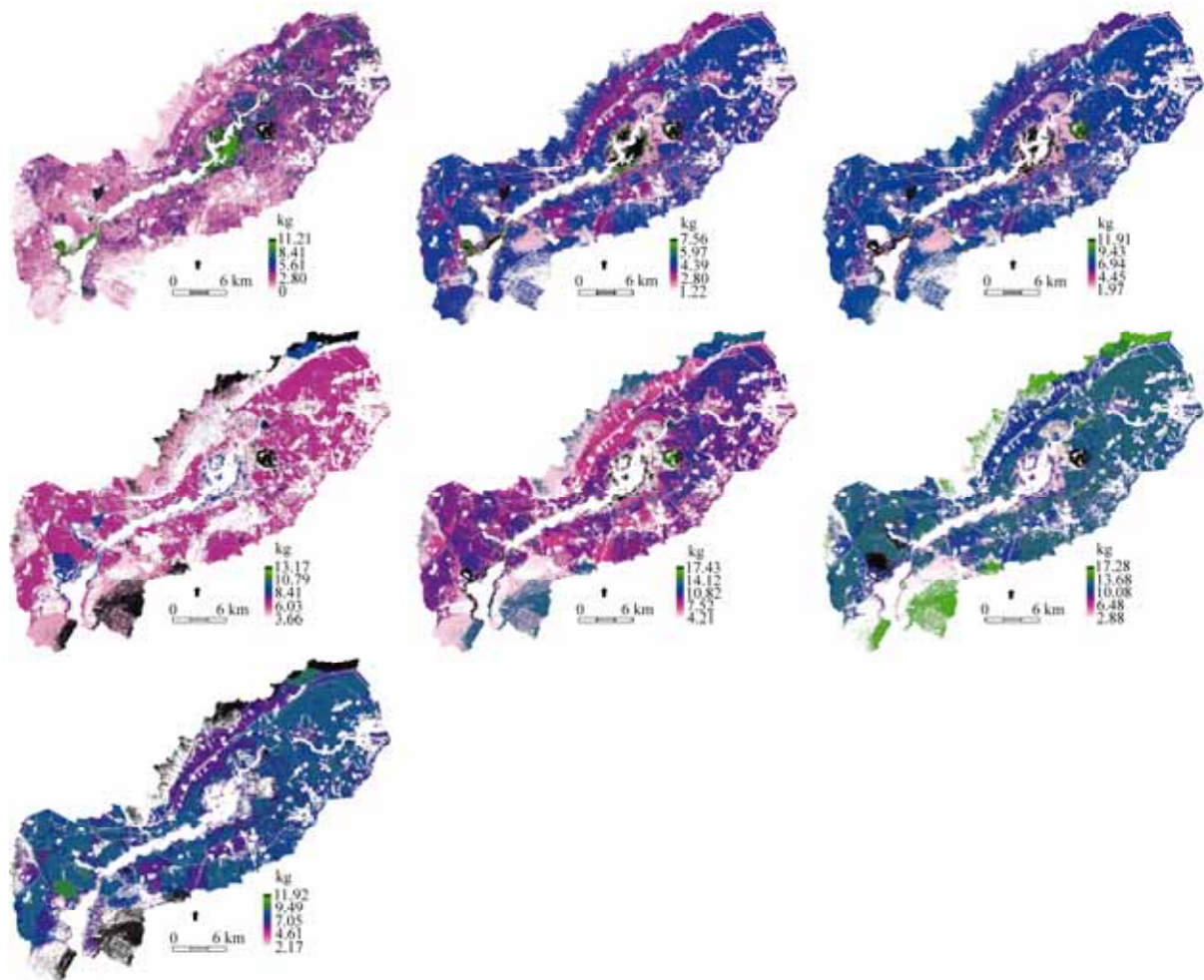


图 8 官厅水库库滨带流域 N 总去除量的空间分布(2007 年 3~9 月)(单位: kg)

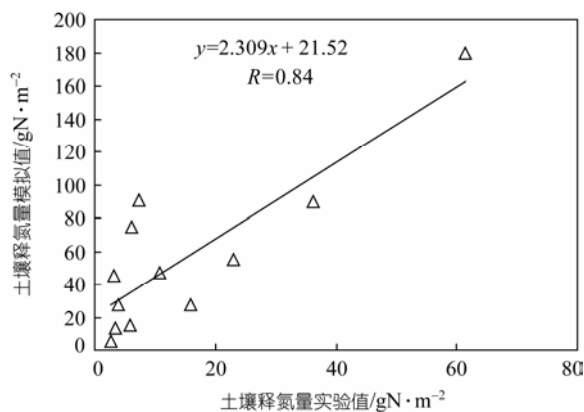


图 9 土壤总氮去除量同土壤化学释氮和植物吸收氮去除量的相关分析

反演算法, 实现了遥感数据与地表参数反演结合, 把遥感数据作为生态水文过程模拟的重要参数输入, 解决了分布式模型运算的地表空间参数问题.

() EcoHAT 系统与 GIS 紧密结合, 自主开发了 GIS 分析工具, 能对模拟结果进行空间可视化分析. 栅格数据分块运算和影像金字塔技术解决了分布式模型网格运算速度慢和处理效率低的问题.

虽然 EcoHAT 系统研发取得成功, 通过了应用的检验, 但是仍然需要进一步完善, 如在栅格象元间的生态水文过程, 以及人类活动对生态水文过程的影响方面, 需要在今后的研究中改进, 加强与 HIMS 系统的进一步耦合, 为水资源综合管理服务.

参考文献

- 1 刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(3): 350 - 360
- 2 IGBP. Predicting global change impacts on mountain hydrology and ecology. IGBP Report 43, 1997
- 3 Zalewski M. Ecohydrology—the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecol Eng*, 2000, 16(1): 1—8
- 4 Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. <http://www.brc.tamus.edu/swat/>
- 5 Krysanova V, Wechsung F, Arnold J G, et al. SWIM user manual. PIK Report No. 69, 2000
- 6 刘昌明. 土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究. *地理学报*, 1997, 52(4): 366—372
- 7 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展. *水科学进展*, 1999, 10(3): 251—259
- 8 王根绪, 刘桂民, 常娟. 流域尺度生态水文研究评述. *生态学报*, 2005, 25(4): 892—903
- 9 刘昌明, 杨胜天, 孙睿. 基于 RS/GIS 技术的黄河流域水循环要素研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2006
- 10 Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resour Res*, 2000, 36(1): 3—9
- 11 Rao N H. Field test of a simple soil water balance model for irrigated areas. *Hydrol*, 1987, 91(2): 179—186
- 12 DEJong R, Cameron D R. Computer simulation model for predicting soil water content profiles. *Soil Sci*, 1979, 128(1): 41—48
- 13 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 14 Jones C A. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas: TEXAS A and M University Press, 1986. 79—90
- 15 Molz F J, Irwin R. Models of water transport in the soil-plant system: a review. *Water Resour Res*, 1981, 17(5): 1245—1260
- 16 Marius H. Simplified denitrification models: overview and properties. *Geoderma*, 2006, 133(4): 444—463
- 17 Inamdar S P, Lowrance R R, Altier L S, et al. Riparian ecosystem management model (REMM): II. Testing of the water quality and nutrient cycling component for a coastal plain riparian system. *Trans ASAE*, 1999, 42(8): 1691—1707
- 18 Grundmann G L, Rolston D E. A water function approximation to degree of anaerobiosis associated with denitrification. *Soil Sci*, 1987, 144(6): 437—441
- 19 Xu C, Shaffer M J, Al-Kaisi M. Simulating the impact of management practices on nitrous oxide emissions. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, 62(6): 736—742
- 20 Kros H. Evaluation of Biogeochemical Models at Local and Regional Scale. Dissertation of Doctoral Degree. Netherlands: Wageningen Agricultural University Press, 2002. 284
- 21 Li C S, Aber J. A process-oriented model of N_2O and NO emissions from forest soils model development. *J Geophys Res*, 2000, 105(D4): 4369—4384
- 22 Zhu Z X, Arp P A, Meng F, et al. A forest nutrient cycling and biomass model (ForNBM) based on year-round, monthly weather conditions, II: Calibration, verification, and application. *Ecol Model*, 2003, 170(1): 13—27
- 23 Arp P A, Oja T. A forest soil vegetation atmosphere model (ForSVA), I: Concepts. *Ecol Model*, 1997, 95(2): 211—224
- 24 Cosby B J, Wright R F, Hornberger G M, et al. Modeling the effects of acid deposition: estimation of long-term water quality response in a small forested catchment. *Water Resour Res*, 1985, 20(11): 1591—1601
- 25 Arp P A, Oja T. A forest soil vegetation atmosphere model (ForSVA), II: Application to northern tolerant hardwoods. *Ecol Model*, 1997, 95(2): 245—247
- 26 Zhu Z X, Arp P A, Meng F R, et al. A forest nutrient cycling and biomass model (ForNBM) based on year-round, monthly weather conditions, part I: assumption, structure and processing. *Ecol Model*, 2003, 169(3): 347—360
- 27 谭庆全, 毕建涛, 池天河. 一种灵活高效的遥感影像金字塔构建算法. *计算机系统应用*, 2008, 4(1): 124—127
- 28 王雪蕾. 水源地岸边带非点源污染控制效应分析和数字模拟. 博士学位论文. 北京: 北京师范大学, 2008. 47—57