

不同土壤物理属性空间分布对水文过程模拟的影响

李相虎¹, 张 奇¹, 叶许春²

(1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

摘 要: 基于不同空间分辨率的土壤物理属性数据(土壤田间持水量、孔隙度和饱和水力传导度), 运用 WATLAC 分布式水文模型模拟了西苕溪流域 2005—2010 年的水文过程。对比评价了土壤物理属性空间分布对地下水补给、土壤蒸发、径流量及其组分的影响。结果显示, 利用不同空间分辨率土壤物理属性数据模拟的流量过程与实测值都匹配的很好, 模拟精度相当, 更详尽的土壤属性空间分布信息未能明显提高模型模拟的精度; 而对于地下水补给量, 高分辨率的土壤属性空间分布会使其模拟结果大幅减小, 但对土壤蒸发量则影响较小, 两种数据模拟的结果及其空间分布都很接近; 同时, 虽然土壤物理属性空间分布的分辨率对模拟的径流总量影响甚微, 但对基流与地表径流的分割却产生了较大影响。

关键词: 空间分布; 土壤物理属性; 水文模拟; 地下水补给; 土壤蒸发

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)05-0190-06

中图分类号: P942

Effects of Different Spatial Distributions of Soil Physical Properties on Hydrological Process Modeling

LI Xiang-hu¹, ZHANG Qi¹, YE Xu-chun²

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Different spatial resolutions of soil physical properties, including field capacity, soil porosity and saturated hydraulic conductivity, were used as input data for water flow model for lake catchment (WATLAC) model to simulate the hydrological processes of the Xitiaoqi catchment from 2005 to 2010 and evaluate the effects of the spatial distribution of soil physical properties on groundwater recharge, soil evaporation, runoff generation and their components. Results show that the simulated stream flow hydrographs with different spatial resolutions of the soil physical properties reproduced the observed hydrographs well. There might be no significant increase in model accuracy as more precise information on the soil physical properties was used. The groundwater recharges simulated using the refined spatial information on soil physical properties were greatly lower than those using the conventional soil type data, but had a slight effect on soil evaporation values. The two soil data cases showed a similar simulated result and spatial distribution. Although different spatial resolutions of the soil physical properties did not cause apparent difference in overall stream flow, their effect on the partition of surface and subsurface water flows was distinct.

Keywords: spatial distribution; soil physical property; hydrological modeling; groundwater recharge; soil evaporation

分布式水文过程模拟基于流域地形、土壤类型及土地利用参数, 其准确性有赖于输入数据对流域特征的准确描述^[1]。流域下垫面特征(地形、植被、糙率等)在空间分布上具有很大的差异性, 且会影响降雨

的分配和产汇流过程^[2], 对正确理解和模拟产流、入渗、蒸散发、地下水补给、侵蚀等过程十分重要。相对来说, 地形与植被的空间变化可借助于高分辨率遥感影像方便的获取^[3], 而土壤物理属性的空间分布则较

收稿日期: 2012-10-25

修回日期: 2012-12-23

资助项目: 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目“变化环境下太湖湖泊—流域系统产汇流过程与致灾风险评估研究”(IWHR-SKL-201111); 国家自然科学基金项目“水情作用下鄱阳湖湿地典型下垫面水分传输过程及其驱动机制”(41101024)

作者简介: 李相虎(1980—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 博士, 助研, 主要从事水文过程模拟及其环境效应研究。E-mail: lxh8010@163.com。

难获得,需经过大量的土壤样品采集与实验分析,另一方面,普通的土壤调查与土壤制图又不能提供高分辨率的空间分布信息^[4],使其对模型模拟结果的不确定性也大于其他输入数据,这已经引起越来越广泛的关注。

针对土壤数据空间分辨率对水文过程模拟的影响,国内外诸多学者已做了大量研究。Muttiah 等^[5]利用 SWAT 模型研究了干旱半干旱地区土壤数据比例尺从 1:250 000 变为 1:24 000 时的影响效应,指出流域水量平衡和土壤水分储量会发生较大改变,但蒸散发基本保持不变。李润奎等^[6],文小平等^[7]分别利用 SWAT 模型和 BTOPMC 模型研究了径流模拟对高精度土壤信息的敏感性,发现径流模拟对土壤信息的敏感性较弱。Peschel 等^[8]基于美国州级土壤地理数据库 (STATSGO) 与土壤调查地理数据库 (SSURGO) 评价了其对于径流模拟的影响,认为由于高分辨率的 SSURGO 土壤数据模拟水量传输中的损失较少,其总径流比低分辨率的 STATSGO 数据大。然而,Levick 等^[9]在比较 FAO, STATSGO 和 SSURGO 的影响时得出了和 Peschel 正好相反的结论,他认为在大多数情况下,用 FAO 数据模拟的径流比 SSURGO 多但比 STATSGO 少。Mukundan 等^[10]发现在模型重新率定后,用不同分辨率的土壤数据模拟的径流基本相当,差别不大,这一结论也得到叶许春等^[1]研究的认同。此外,Cho 等^[11]研究发现,尽管空间分布信息能使水文模型反映空间上的异质性,但当流域面积较小时,这种空间差异性的考虑未必能提高模型的模拟精度。Maeda 等^[12]分析了土壤层厚度及物理属性的长期时空分布影响,指出其对土壤水分及径流会产生较大影响。而 Loague 等^[13]证明土壤饱和水力传导度的空间分布与入渗过程有较大关系。

综合以上研究发现,目前大多数研究都集中于土壤类型数据空间分辨率的水文效应方面,而对田间持水量、孔隙度及饱和水力传导度等土壤物理属性空间分布对水文过程模拟的影响方面涉及较少。虽然不同分布式水文模型利用不同的方式处理下垫面空间信息,但需要的土壤物理属性空间分布信息大多来源于传统的土壤类型分布图^[1],这种处理方式通常是假定土壤物理属性在同一土壤类型中是均一的。然而,这个假定在水文过程模拟中多大程度上可接受?它对产流、入渗、土壤水分及蒸散发过程有多大影响?这些疑问还没有明确的定论。本项研究正是基于这样的前提,分别以不同空间分辨率的土壤田间持水量、孔隙度和饱和水力传导度数据为水文模型输入,

对比评价其对水文模型模拟精度及地下水补给量、非饱和土壤蒸发、径流量及其组分的影响。

1 研究区概况及数据来源

西苕溪是太湖流域上游地区的重要支流,流域面积 2 200 km²,流域地势西南高,东北低,依次从山地过渡为丘陵平原,地面高程在 1~1 575 m。西苕溪流域属亚热带季风气候区,多年平均降雨量为 1 465 mm,气温为 15.5℃,降雨主要集中在 4—9 月,降雨量的空间分布差异也很大。西苕溪主河长约 143 km,源于天目山脉,向北流于湖州市杭长桥与东苕溪汇合入湖,是太湖的重要水源之一。流域内主要土地覆被类型为竹林 (67.3%),其次为耕地 (26.8%),主要分布在下游冲积平原区,其他如城镇 (2.35%)、草地 (0.66%) 及水体 (1.98%) 等所占面积都较小。

流域地形数据来源于美国国家航空航天局 (NASA) 和国家地理空间情报局 (NGA) 提供的 SRTM DEM 数据,空间分辨率为 90 m,并基于此数据,提取流域内水系及边界信息。土壤类型数据来自中国科学院南京土壤研究所的土壤调查数据,按中国土壤分类标准,流域内主要土壤类型为黄红壤 (47.6%) 和水稻土 (28.7%),其他还有黄壤 (5.7%)、酸性粗骨土 (5.6%)、棕色石灰土 (5.4%) 以及少量的棕红壤 (2.8%)、酸性紫色土 (2.6%) 和红壤性土 (1.6%)。土壤类型空间分布如附图 10 所示。

研究中用到的两种不同分辨率的田间持水量、孔隙度、饱和水力传导度空间分布,一种是基于传统的土壤类型图 (附图 10) 确定每类土壤的属性值 (记为 STMB 土壤数据),在同一类型内,土壤属性值均一。表 1 所示为每种土壤类型所对应的土壤属性值。由表 1 可见,田间持水量在 0.16~0.31,孔隙度在 0.52~0.69,饱和水力传导度在 0.31~5.78 m/d。另一种是由中国科学院南京土壤研究所经过加密采样和数值差值得到的 250 m×250 m 网格的土壤物理属性空间分布 (记为 RSIM 土壤数据),这一空间分布信息比之前应用的土壤类型数据精度更高,其空间分布信息更详尽。而降水数据来自流域内 10 个雨量站 2005—2010 年的逐日观测数据,这些数据的质量已经过检验并已应用于之前不同的研究中。同时,研究中曾试图确定降水量与高程之间的关系以校正山区与平原区的降水量,但在这一区域并未发现降水量随高程升高发生明显的变化,因此,在模型中直接将站点观测雨量用泰森多边形法直接差值到空间 250 m×250 m 的网格上,以满足分布式水文模型的需要。

另外,观测的范家村站日流量过程用于模型参数的率定和验证。

表 1 各土壤类型对应的属性值

土壤类型	田间持水量	孔隙度	饱和水力传导度/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
黄红壤	0.26	0.60	2.95
棕红壤	0.30	0.56	0.35
红壤性土	0.25	0.58	0.51
黄壤	0.16	0.69	1.88
棕色石灰土	0.25	0.62	5.78
酸性紫色土	0.31	0.52	0.31
酸性粗骨土	0.23	0.59	2.21
水稻土	0.29	0.56	1.17

2 分布式水文模型

目前,有许多水文模型如 IHDM, SWAT, BTOPMC 等分别采用不同的方法处理空间信息,但这些模型并不能直接把土壤的田间持水量、孔隙度、饱和水力传导度的空间分布信息作为输入,而是把基于多边形的土壤类型数据作为输入,然后再通过一些转换关系转换为土壤的物理属性信息,而 WATLAC 模型^[14]则不同,它可以把许多下垫面属性信息直接输入模型,可直接反映下垫面信息变化的水文效应,因此本研究基于该模型进行分析。

WATLAC 是一个基于网格的分布式水文模型,它可以在降雨和蒸发驱动下,模拟流域地表和地下径流过程,也可以反映地表水、土壤水及地下水的相互作用。该模型已在许多流域成功应用,包括西苕溪流域地表地下水相互作用分析^[15]、鄱阳湖流域未来气

候变化的水文响应^[16]以及信江流域的水文过程模拟研究^[17]等。模型的具体结构及其过程计算可参考文献^[14-17],本文不再赘述。模型参数采用 PEST 自动优化算法进行率定^[18],模型模拟精度采用纳西效率系数(E_{ns})、径流深相对误差(DE)以及确定性系数(R^2)来评价, E_{ns} 和 DE 分别由以式(1)~(2)计算:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - Q_{\text{sim}_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}_i} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \quad (1)$$

$$\text{DE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim}_i} - Q_{\text{obs}_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{\text{obs}_i}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_{obs_i} ——观测流量; Q_{sim_i} ——模拟流量; \bar{Q}_{obs} ——观测流量的平均值; n ——总时间步长。

3 结果与讨论

西苕溪流域被离散为 $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 的网格应用 WATLAC 分布式水文模型模拟 2005 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日的径流过程,其中 2005—2008 年为模型率定期,2009—2010 年为模型验证期。为保证模型参数的物理意义,研究中大部分参数包括土地利用、河流等的属性参数都由野外调查数据库或相关文献确定,剩余的几个经验参数如坡面流滞后系数 C_{lag} ,地下水补给和土壤水运移参数 β_1, β_2 以及马斯京根法汇流参数 e 和 k 则通过 PEST 算法进行自动优化。模型参数优化分 2 种情景:情景 1,先基于传统土壤类型图的土壤属性分布 STMB 进行参数率定,再保持参数不变,换为高分辨率的土壤属性分布 RSIM 运行模型;情景 2,先以高分辨率的土壤属性分布 RSIM 率定模型参数,再保持参数不变,换为传统土壤类型图的土壤属性分布 STMB 运行模型。2 种情景下模型模拟结果的精度对比如表 2 所示。

表 2 基于不同土壤属性空间分布下模型模拟精度对比

时 段	情景 1						情景 2					
	STMB 土壤数据			RSIM 土壤数据			STMB 土壤数据			RSIM 土壤数据		
	E_{ns}	DE/%	R^2	E_{ns}	DE/%	R^2	E_{ns}	DE/%	R^2	E_{ns}	DE/%	R^2
率定期 (2005—2008 年)	0.78	-8.60	0.84	0.63	-3.90	0.76	0.60	-7.90	0.66	0.79	-6.90	0.85
验证期 (2009—2010 年)	0.88	-10.80	0.91	0.82	-12.70	0.85	0.78	-14.20	0.81	0.91	-12.01	0.92

注: E_{ns} 纳西效率系数; DE 径流深相对误差; R^2 确定性系数。

由表 2 可看出,在情景 1 中,基于 STMB 土壤数据的模拟精度整体较好,率定期的纳西效率系数 E_{ns} ,径流深相对误差 DE,确定系数 R^2 分别为 0.78, -8.60% 和 0.84,验证期精度同样较高,分别达到 0.88, -10.80% 和 0.91,这说明 WATLAC 模型能较好地应用于西苕溪流域的水文过程模拟;当换为 RSIM 土壤数据时,模拟精度有所下降,尽管径流深相对误差 DE 较小,只有一 3.90%,但 E_{ns} 和 R^2 较低,

分别为 0.63 和 0.76。在情景 2 中,采用 RSIM 土壤数据经参数率定后,模拟精度有较大提高,率定期 E_{ns} , DE, R^2 分别为 0.79, -6.90% 和 0.85,验证期为 0.91, -12.01% 和 0.92,与情景 1 中 STMB 土壤数据模拟结果相比,二者精度相当,说明更高分辨率的土壤属性空间分布信息未能明显提高模型模拟的精度。图 1 为不同分辨率的土壤属性空间分布数据模拟的范家村站径流过程与观测值的对比。由图 1 可看

出,基于 STMB 土壤数据和 RSIM 土壤数据模拟的流量过程线较相似,并且与观测结果基本一致,较准确地模拟了研究区的水文过程,但对 2005 年的洪峰模拟偏小,另外在部分年份的枯水期模拟值也较实测值偏小。

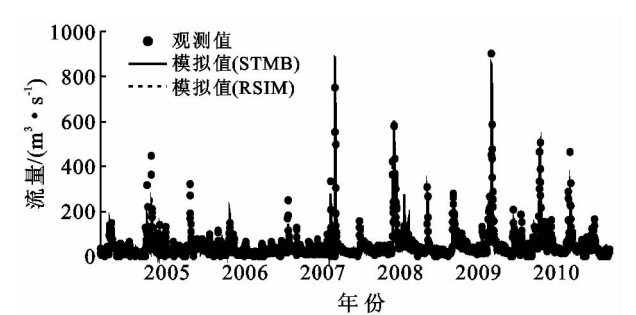


图 1 利用不同土壤属性分布数据模拟的范家村站径流过程与观测值的对比

土壤物理属性的空间分布对土壤水分影响较大,而土壤水分状况又决定了地下水补给、非饱和土壤蒸发等过程。本文分析了两种不同分辨率的土壤属性空间分布对地下水补给和土壤蒸发的影响,结果如表 3 所示。由表 3 可看出,基于 STMB 土壤数据模拟的年地下水补给量在 237~276 mm,平均每年 262 mm,年土壤蒸发量在 492~745 mm,平均每年 639 mm,而采用 RSIM 土壤数据模拟的年地下水补给量在 168~190 mm,平均每年 182 mm,年土壤蒸发量在 480~730 mm,平均每年 621 mm。土壤物理属性数据空间分辨率的提高,使模拟的地下水补给量有所减少,但对于土壤蒸发量则影响不大。

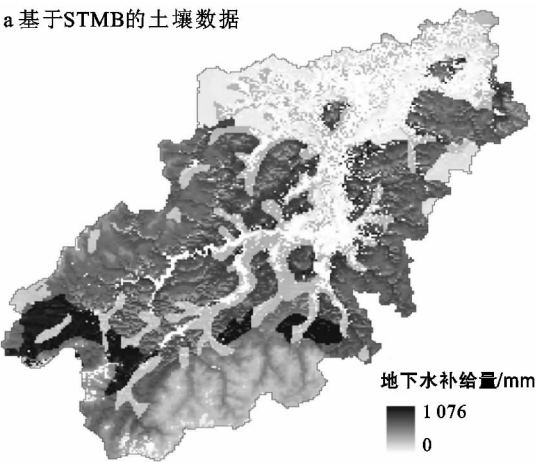
表 3 不同土壤属性分布数据模拟的地下水补给量及土壤蒸发量 mm

年份	STMB 土壤数据		RSIM 土壤数据	
	GWR	UE	GWR	UE
2005	272	745	187	730
2006	248	536	170	526
2007	237	625	168	607
2008	271	492	190	480
2009	268	697	186	674
2010	276	739	190	710
平均	262	639	182	621

注:GWR 为地下水补给量;UE 为土壤蒸发量。

图 2 和图 3 分别为基于 STMB 土壤数据和 RSIM 土壤数据模拟的平均年地下水补给量和土壤蒸发量的空间分布。由图 2 可见,不同的土壤属性空间分布数据模拟的地下水补给量空间分布在整体上有一定的一致性,北部的冲积平原区补给量较小而南部山区补给量较大,但也存在较大差异,图 2a 的中部区域除了河谷地区外其他地方的补给量都较大,而在图 2b 中,中部地区补给量都较小;另外,虽然基于 STMB 土壤数据模拟的地下水补给量最大值(1 076 mm)比基于 RSIM 土壤数据模拟的补给量小 300 mm,但高补给量所占的区域面积比后者大。由图 3 可见,2 种不同分辨率的土壤属性空间分布数据模拟的土壤蒸发量空间分布较相似,仅在流域西南部存在一定的差异。因此,土壤属性空间分辨率不同对地下水补给量影响较大,而对土壤蒸发的影响较小。

a 基于STMB的土壤数据



b 基于RSIM的土壤数据

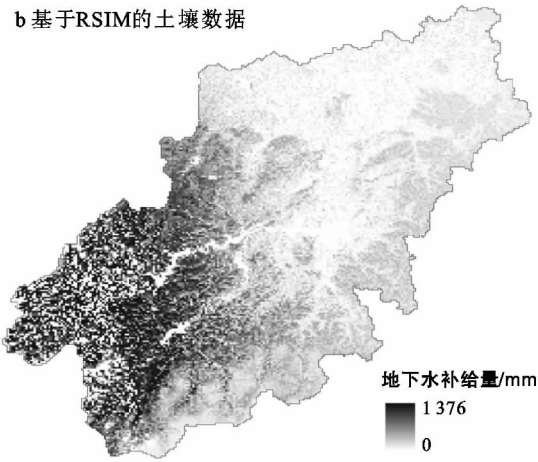


图 2 年地下水补给量空间分布

基于 STMB 土壤数据和 RSIM 土壤数据模拟的径流总量及其各组分所占百分比如表 4 所示。由表 4 可知,在采用 STMB 土壤数据时,模拟的基流量为 155~214 mm,平均 191 mm,占径流总量的 30.1%,

地表径流量的贡献在 324~624 mm,占到径流总量的 70%。

采用 RSIM 土壤数据时,模拟的基流量大幅减少,在 52~150 mm,平均 110 mm,仅占径流总量的

15.8%，而地表径流量贡献率则相应增大。这主要是由于 RSIM 土壤数据模拟的地下水补给量较小，进而造成基流量的比率也相应减小，另外，模型在参数优化时，仅以河道断面的总径流过程进行参数率定，可

能会使中间过程如地下水补给、蒸发及径流分割等出现一定的偏差。表 4 表明，虽然两种不同的土壤属性空间分布对模拟的径流总量的影响很微弱，但对基流与地表径流的分割比例却会产生较大影响。

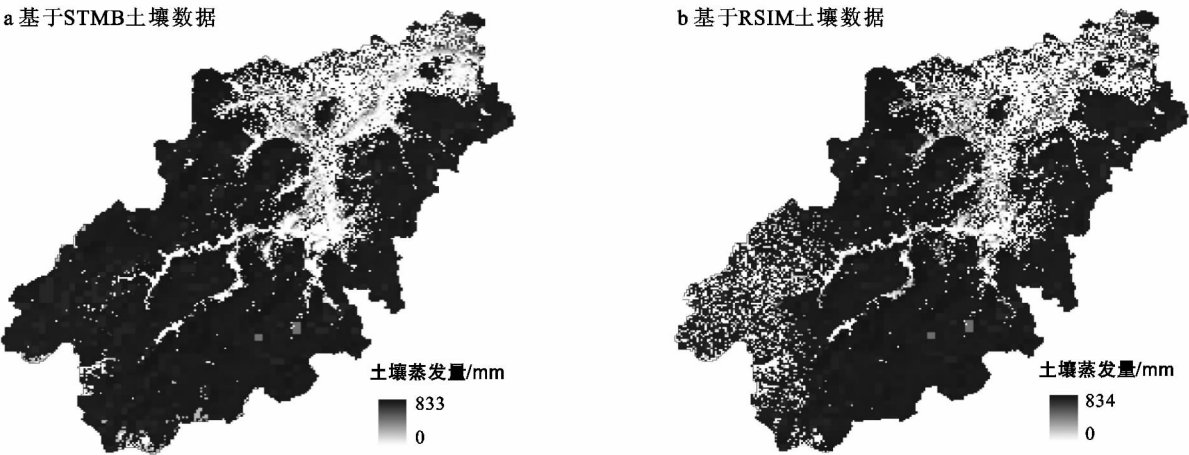


图 3 年土壤蒸发量空间分布

表 4 不同土壤属性分布数据模拟的径流量及其组分对比

年份	STMB 土壤数据					RSIM 土壤数据				
	基流		地表径流		总径流量/mm	基流		地表径流		总径流量/mm
	V/mm	P/%	V/mm	P/%		V/mm	P/%	V/mm	P/%	
2005	155	32.2	329	67.8	484	52	10.8	428	89.2	480
2006	190	37.0	324	63.0	514	89	17.4	420	82.6	509
2007	173	30.5	395	69.5	568	99	16.0	521	84.0	620
2008	203	24.5	624	75.5	827	128	14.6	754	85.4	882
2009	210	27.0	566	73.0	776	141	16.7	703	83.3	844
2010	214	29.6	509	70.4	723	150	19.0	637	81.0	787
平均	191	30.1	458	69.9	649	110	15.8	577	84.2	687

注：V 为年总径流量；P 为占总径流量的百分比。

4 结论

基于 WATLAC 分布式水文模型，分别以不同空间分辨率的土壤田间持水量、孔隙度和饱和水力传导度数据为输入，对比评价了其降雨径流过程中地下水补给量、非饱和土壤蒸发、径流量及其组分的影响。

(1) 基于传统土壤类型图的土壤属性空间分布的模拟精度整体较好，率定期的纳西效率系数 E_n ，径流深相对误差 DE，确定系数 R^2 分别为 0.78，-8.6% 和 0.84，验证期分别达到 0.88，-10.8% 和 0.91，当采用高分辨率的土壤属性分布时，经再次参数率定后，模拟精度也很好，率定期 E_n ，DE， R^2 分别为 0.79，-6.9% 和 0.85，验证期为 0.91，-12.0% 和 0.92，两次模拟精度相当，说明更高分辨率的土壤属性空间分布信息未能明显提高模型模拟的精度。

(2) 基于 STMB 土壤数据模拟的年地下水补给

量在 237~276 mm，采用 RSIM 土壤数据模拟的年地下水补给量则大幅减小，同时其空间分布也存在较大差异，然而对于土壤蒸发，其影响则相对较小，除个别小区域外两次模拟的土壤蒸发量空间分布较相似。

(3) 尽管不同分辨率的土壤属性空间分布输入对模型模拟的总径流量影响很小，但对基流与地表径流的分割比例却产生了较大影响。

[参 考 文 献]

[1] 叶许春,张奇,刘健,等. 土壤数据空间分辨率对水文过程模拟的影响[J]. 地理科学进展,2009,28(4):575-583.

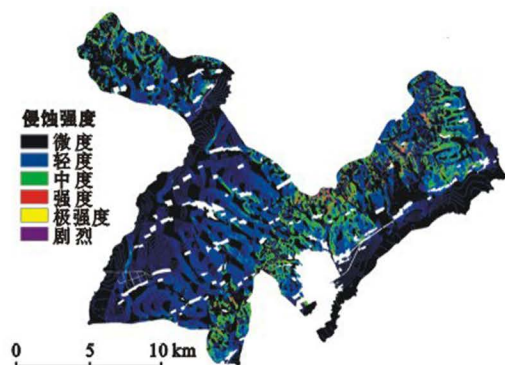
[2] Price K, Jackson C R, Parker A J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA [J]. Journal of Hydrology, 2010,383(3):256-268.

[3] Quinn T, Zhu Axing, Burt J E. Effects of detailed soil spatial information on watershed modeling across differ-

- ent model scales [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(4):324-338.
- [4] Zhu Axing, Mackay D S. Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 248(1/4):54-77.
- [5] Mutiah R S, Wurbs R A. Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 256(3):264-285.
- [6] 李润奎, 朱阿兴, Peter, 等. SWAT 模型对高精度土壤信息的敏感性研究[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(3):72-90.
- [7] 文小平, 万育安, 敖天其. 土壤空间分辨率对 BTOPMC 模型径流模拟的影响[J]. *人民黄河*, 2010, 32(11):45-48.
- [8] Peschel J M, Haan P K, Lacey R E. Influences of soil dataset resolution on hydrologic modeling [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(5):1371-1389.
- [9] Levick L R, Semmens D J, Guertin D P, et al. Adding global soils data to the automated geospatial watershed assessment tool(AGWA) [C]. *Proceedings of Second International Symposium on Transboundary Waters Management*. Tucson, Arizona: Routledge, 2004:1-9.
- [10] Mukundan R, Radcliffe D E, Risse L M. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 65(2):92-104.
- [11] Cho H, Olivera F. Effect of the spatial variability of land use, soil type, and precipitation on streamflows in small watersheds [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(3):673-686.
- [12] Maeda K, Tanaka T, Park H, et al. Spatial distribution of soil structure in a suburban forest catchment and its effect on spatio-temporal soil moisture and runoff fluctuations [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 321(1):232-256.
- [13] Loague K, Kyriakidis P C. Spatial and temporal variability in the R-5 infiltration data set: Déjà vu and rainfall-runoff simulations [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(12):2883-2895.
- [14] 张奇. 湖泊集水域地表—地下径流联合模拟[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(5):1-10.
- [15] Zhang Qi, Li Lijiao. Development and application of an integrated surface runoff and groundwater flow model for a catchment of Lake Taihu watershed, China [J]. *Quaternary International*, 2009, 208(1/2):102-108.
- [16] Ye Xuchun, Zhang Qi, Bai Li, et al. A modeling study of catchment discharge to Poyang Lake under future climate in China [J]. *Quaternary International*, 2011, 244(2):221-229.
- [17] Li Xianghu, Zhang Qi, Xu Chongyu. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 426/427:28-38.
- [18] Li Xianghu, Zhang Qi, Shao Min, et al. A comparison of parameter estimation for distributed hydrological modelling using automatic and manual methods [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 356/360:2372-2375.

(上接第 155 页)

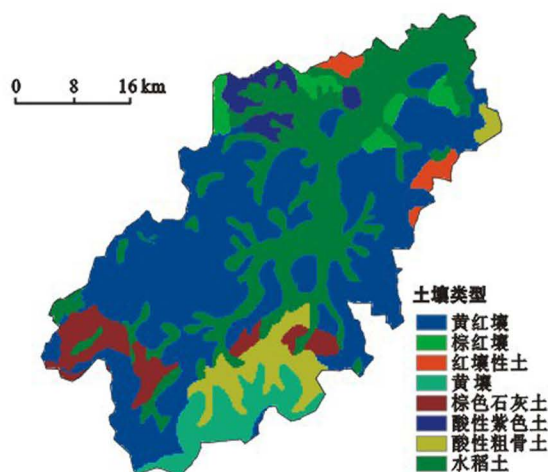
- [15] 基础地理信息数字产品 1:10 000, 1:50 000 生产技术规程(第 2 部分):数字高程模型(DEM) CH/T 1015.2-2007[Z]. 北京:标准出版社.
- [16] 基础地理信息数字产品 1:10 000, 1:50 000 数字高程模型 CH/T 1008—2001[Z]. 北京:标准出版社.
- [17] 杨勤科, 师维娟, Tim R M V, 等. 水文地貌关系正确 DEM 的建立方法[J]. *中国水土保持科学*, 2007(4):1-6.
- [18] Hutchinson M F. ANUDEM Version 5. 1 User Guide [Z]. The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Canberra. 2004.
- [19] Yang Qinke, McVicar T R, Niel T G, et al. Improving a digital elevation model by reducing source data errors and optimising interpolation algorithm parameters: An example in the Loess Plateau, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, 9(3):235-246.



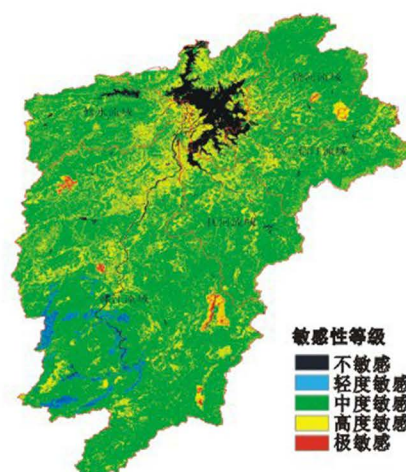
附图8 黑龙江省克山县古城小流域2010年土壤侵蚀强度



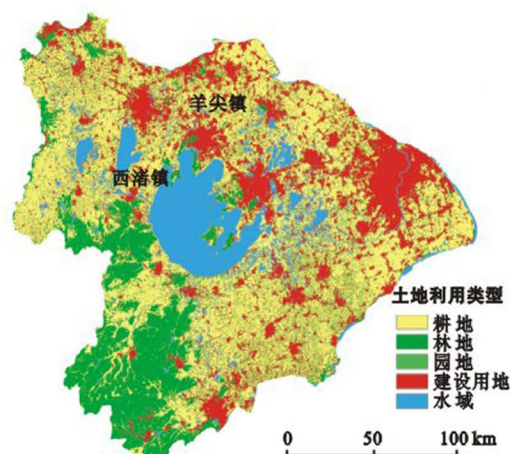
附图9 黑龙江省克山县古城小流域2010年土地利用状况



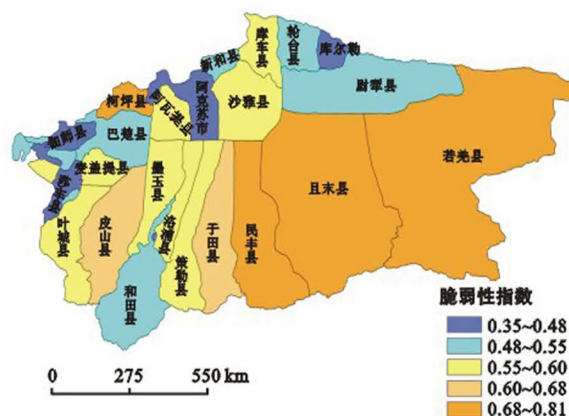
附图10 西荇河流域土壤类型分布



附图11 鄱阳湖流域土壤侵蚀敏感性综合评价



附图12 太湖流域土地利用类型



附图13 2010年塔里木河流域水资源脆弱性指数分布



附图14 1989,1999和2007年四川省甘孜州道孚县甲斯孔林场土壤侵蚀强度分布