

气候和土地利用变化对径流变化影响研究 ——以伊洛河流域伊河上游地区为例

梁国付, 丁圣彦

(河南大学资源与环境研究所 河南大学环境与规划学院, 河南 开封 475001)

摘要: 在实际调查基础上, 利用遥感和地理信息系统技术, 分析伊洛河流域伊河上游地区气候和土地利用变化对径流变化的影响。结果显示, 在研究区域中, 林地面积最大, 1987~2008年, 林地、库塘和建设用地面积持续增加, 草地、河流和未利用地面积持续减少, 耕地面积则先增加后减少。20世纪80年代以来, 土地利用变化在不同阶段都使得年平均径流量减小; 80~90年代, 气候变化使得年平均径流量减小, 而90年代到2000年以后, 气候变化使得年平均径流量增加, 这与90年代年平均降水量减少, 而2000年以后年平均降水量增加密切相关。

关键词: 气候变化; 土地利用变化; 径流效应; SWAT水文模型; 伊洛河流域

中图分类号: P339.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2012)05-0635-06

气候和土地利用变化对流域水文过程会产生重要影响, 正确评估气候变化和人类活动对流域水循环、水资源的影响程度显得尤为重要。在流域尺度上, 许多学者研究土地利用变化与水文过程的关系, 进而预测未来土地利用变化对水文水资源的影响, 尤其是对径流变化的影响^[1-5]。研究方法上, 从早期的试验流域方法和后期的特征变量时间序列法, 逐渐发展到采用水文模型来模拟水文过程^[6-9]。SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文模型能够利用地理信息系统和遥感提供的空间信息, 模拟复杂流域中多种不同的水文物理过程, 适合于流域土地利用变化对流域地表径流及相关水文过程影响方面的模拟研究^[10-16]。伊洛河是三门峡大坝以下黄河最大的支流, 由伊河与洛河构成, 自然地理要素具有明显的过渡性。近年来, 该区域土地利用发生了较大变化, 研究多利用水文模型对流域产流、产沙和基流进行估算及评价^[17,18], 而进行气候和土地利用变化对径流变化影响研究的还比较少。本研究利用遥感和地理信息系统技术, 分析20世纪80年代以来, 伊洛河流域伊河上游地区气候和土地利用变化过程, 结合实测数据, 构建适合与该地区的分布式水文模型——SWAT模型, 以期理解气候和土地利用变化

及其水文过程效应。

1 研究区域概况

伊洛河流域位于黄河中游南部(图1), 北以华山、崤山与黄河干流为界, 南以伏牛山与长江水系分水, 东以外方山与淮河为邻, 流域面积18 881 km²。伊洛河是黄河小浪底大坝以下最大的一级支流, 对黄河下游的洪淤有重要的影响^[28]。伊河发源于熊耳山南麓的栾川县, 流经嵩县、伊川、洛阳, 至偃师杨村注入洛河, 全长368 km。

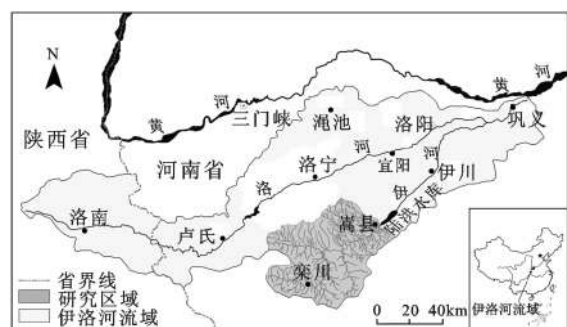


图1 研究区域

Fig. 1 Location of the study area

本研究区为伊洛河流域伊河上游地区, 地理坐标在33°39'~34°17'N, 111°20'~112°11'E之间,

收稿日期: 2011-06-13; 修订日期: 2011-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071118)、河南省教育厅自然科学基金项目(2009B170002)资助。

作者简介: 梁国付(1973-), 男, 河南林州人, 博士, 副教授, 在站博士后, 主要研究方向为景观生态学。E-mail: lianguofu@126.com

总面积 3 276.8 km²。研究区域属于暖温带大陆型季风性气候,冬季干燥寒冷,夏季潮湿炎热。年平均气温 12℃,年降水量 700~900 mm,50%左右的降水量集中在 7~9 月。区域地貌类型齐全,具有伊洛河流域典型的地貌形态特征。

2 研究方法

2.1 数据源和数据处理平台

本研究数据源:1987 年 Landsat-5 TM、1999 年 Landsat-7 ETM 和 2008 年中巴地球资源卫星 02 星 CCD 遥感影像数据;栾川和嵩县气象站点日气象观测数据,栾川、嵩县、陶湾、庙子、潭头、东湾、白狮和河西等水文站日降雨数据;陶湾、庙子、潭头和东湾 4 个水文站年、月径流数据;研究区 25 m 分辨率的数字高程(DEM)数据;研究区 20 世纪 80 年代 1:5 万土壤调查数据。数据处理平台包括 ArcView 3.2、Erdas 8.5、ArcGis 9.2 和 Spss 16.0。

2.2 气候变化分析

在选取嵩县和栾川两气象站点进行温度和降水的年、月时间序列(1981~2008 年)分析,1981 年以来划分为:20 世纪 80 年代(1981~1990 年)、90 年代(1991~2000 年)和 2000 年以后(2001~2008 年)3 个阶段,分析不同时段温度和降水变化规律。

2.3 土地利用变化分析

在 Erdas 8.5 软件支持下,参考研究区地形图、土地利用现状图、GPS 野外调查获取的研究区土地利用状况资料。采用监督分类方法,建立训练区,然后进行分类,初始解译后于 2009 年 10 月进行了全面的土地利用调查工作。利用 Erdas 8.5 软件的精度评价功能,对三期遥感影像分类结果进行精度检验,结果为:1987 年的总精度为 83.1%,Kappa 指数为 0.78;1999 年的总精度为 85.1%,

Kappa 指数为 0.81;2008 年的总精度为 86.1%,Kappa 指数为 0.81。然后对解译的数据进行修改、编辑,由于研究所用的图像分辨率不一致,通过图像重采样,制成分辨率都为 30 m 的研究区土地利用专题类型图(图 2)。将三个时期土地利用类型图进行叠加分析,获得相应的土地利用变化属性数据。

2.4 径流变化分析

将数据按照 SWAT 模型需要格式输入模型,按水系分布情况将研究流域划分为 21 个子流域(图 3),每个子流域再按土地利用状况和土壤特性划分为 2~5 个水文响应单元 HRUs,共划分了 98 个水文响应单元 HRUs。蒸发计算采用 Hargreaves 法,地表产流计算采用 SCS 曲线法,河道汇流计算采用变动存储系数法。

SWAT 的校准期选用东湾水文站 1981~1990 年的年、月径流和 1987 年的土地利用数据,将 1991~2000 年的年、月径流和 1999 年的土地利用数据作为验证期,以提高模型的准确性。

模型的校准和验证选用线性回归系数(R^2)和 Nash-Suttcliffe 模拟系数(E_{ns})来评估模型在校准和验证过程中的模拟效果。线性回归系数(R^2)应用线性回归法求得, R^2 用于实测值与模拟值之间的数据吻合程度评价, $R^2=1$ 表示非常吻合,当 $R^2<1$ 时,其值越小反映出数据吻合程度越低。Nash-Suttcliffe 系数(E_{ns})的表达式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_P)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_{avg})^2}$$

式中, Q_0 为实测值; Q_P 为模拟值; Q_{avg} 为实测平均值; n 为实测数据个数。当 $Q_0=Q_P$ 时, $E_{ns}=1$;如果 E_{ns} 为负值,说明模型模拟平均值比直接使用实测平均值的可信度更低。

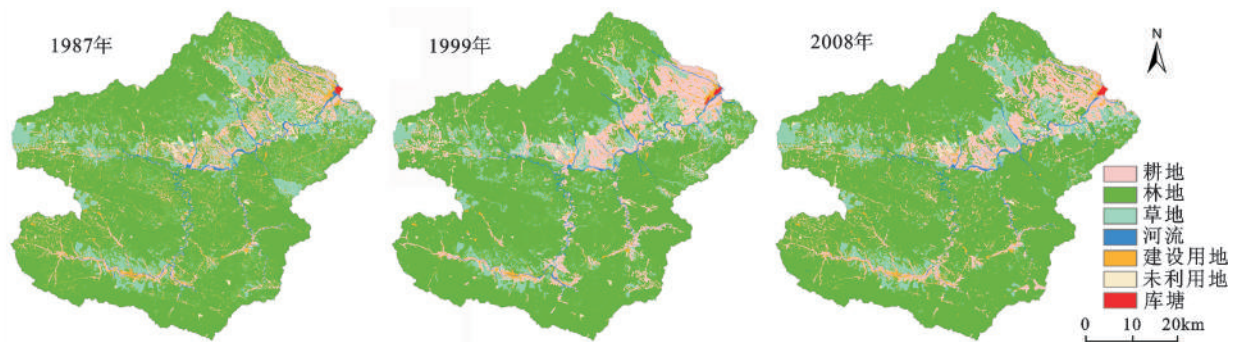


图 2 研究区域土地利用

Fig. 2 The land use in the study area

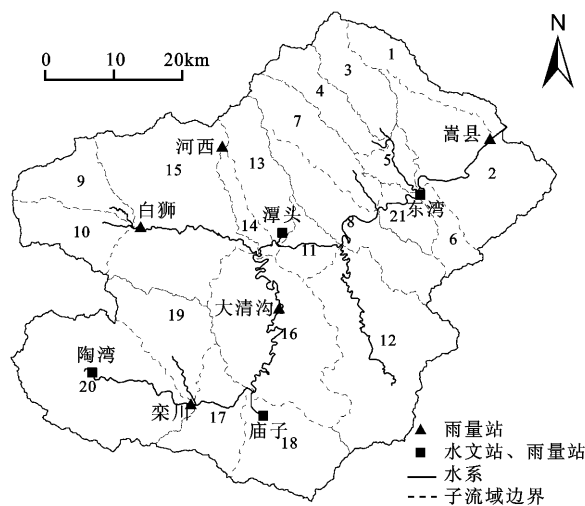


图3 研究区子流域划分

Fig. 3 Division of the sub-basins in the study area

3 结果与分析

3.1 气候变化

20 世纪 80、90 年代和 2000 年以后 3 个阶段中, 流域中栾川和嵩县气象站点的年平均温度分别为: 栾川, 11.81、12.17 和 12.49℃, 嵩县, 13.72、14.54 和 14.93℃。可以看出, 20 世纪 80 年代, 年平均气温相对较低, 80 年代以来, 流域多年平均气温呈现上升趋势, 气温升高明显。栾川和嵩县站点的年平均降水量分别为: 栾川, 863.78、776.44 和 871.41 mm, 嵩县, 743.70、620.66 和 676.48 mm。说明 20 世纪 80 年代降水量比较丰富, 90 年降水量有所减少, 2000 年以后降水量又逐渐增多。月降水分布上, 降水主要集中在 6~9 月份, 3 个阶段中, 6~9 月份平均降水总量分别占年平均降水总量的 62.95%、57.45% 和 66.73%。

3.2 土地利用变化

1987~2008 年, 流域土地利用变化明显(图 2 和表 1), 林地、库塘和建设用地面积持续增加, 草

地、河流和未利用地面积减少, 耕地面积在 1987~1999 年间增加, 而在 1999~2008 年间减少。1987、1999 和 2008 年, 林地面积分别为 2 390.65、2 397.90 和 2 429.74 km², 增加 0.30% 和 1.33%; 库塘面积分别为 2.58、2.76 和 3.10 km², 增加 7.08% 和 12.02%; 城镇建设用地面积在两个阶段分别增加了 2.90% 和 9.25%; 草地面积在 1987、1999 和 2008 年分别为 339.39、315.81 和 298.02 km², 减少 6.95% 和 5.63%; 耕地面积从 1987 年的 378.77 km² 增加到 1999 年的 398.90 km², 到 2008 年面积减少到 389.30 km²。

3.3 SWAT 模型校准和验证

SWAT 模型涉及的产汇流参数有 30 多个, 研究主要率定对流域水量平衡和径流过程有较大影响的变量, 其他变量只进行微调或根据流域状况赋值。最终参数率定的结果如下: CN₂(SCS 曲线方法的径流曲线系数, AGRL 80, FRST 60, PAST 70), SOL_AWC(土壤有效含水量, 0.02~0.19), ESCO(土壤蒸发补偿系数, 0.10), CH_K(河道有效水力传导率, 0.92)。

模型参数率定期(1981~1990 年), 年径流模拟值与实测值拟合度较高, R^2 达到 0.923, Nash-Suttcliffe 模拟系数 E_{ns} 为 0.89; 模型验证期(1991~2000 年), 年径流模拟值与实测值拟合度 R^2 减小到 0.899, Nash-Suttcliffe 模拟系数 E_{ns} 为 0.87, 模型运行结果较好。月尺度上, 模型参数率定期, 月径流实测值与模拟值拟合度 R^2 达到 0.801, Nash-Suttcliffe 模拟系数 E_{ns} 为 0.72; 模型验证期, 月径流 R^2 为 0.669, E_{ns} 为 0.64。图 4 中, 尽管 SWAT 对月径流模拟的效果没有年径流好, 模型预测的评价系数满足评价标准, 模型模拟结果能够为研究区域水资源合理利用提供有效的参考价值。

3.4 气候和土地利用变化对流域径流变化影响

3.4.1 土地利用变化对流域径流变化影响

(1) 实际情景 1 和模拟情景 1。实际情景 1:

表 1 1987~2008 年研究区土地利用类型面积变化

Table 1 Landuse changes in the study area from 1987 to 2008

土地利用类型	1987 年 (km ²)	1999 年 (km ²)	2008 年 (km ²)	面积变化 (1987~1999 年)	面积变化 (1999~2008 年)
耕地	378.77	398.90	389.30	5.31%	-2.41%
林地	2390.65	2397.90	2429.74	0.30%	1.33%
草地	339.39	315.81	298.02	-6.95%	-5.63%
河流	44.21	43.95	39.61	-0.60%	-9.87%
库塘	2.58	2.76	3.10	7.08%	12.02%
建设用地	79.75	82.06	89.65	2.90%	9.25%
未利用地	41.53	35.39	27.32	-14.79%	-22.81%

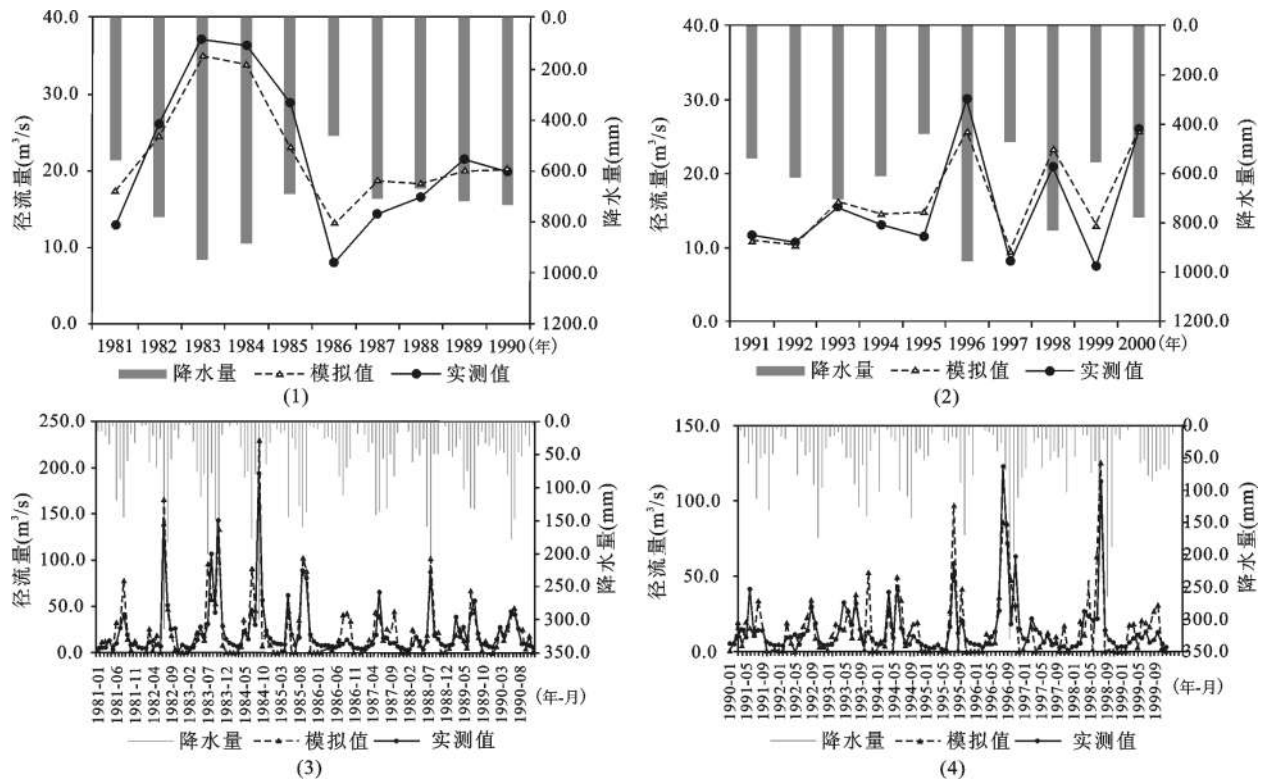


图4 年平均径流量模拟值与实测值(校准期1、验证期2)、月平均径流量模拟值与实测值比较(校准期3、验证期4)

Fig. 4 Comparison between the simulated and observed annual average runoff in the calibration period (1) and the validation period (2) and between the simulated and observed monthly average runoff in the calibration period (3) and in the validation period (4).

第一阶段1981~1990年,采用1981~1990年的气候数据和1987年土地利用数据,模拟该情境下的径流变化情况,称为实际情景1(表2)。模拟情景1:和实际情景1相比,气候因子固定不变,土地利用数据为1999年,此情形与实际情景1下模拟的径流相比,二者差值可以看作是在20世纪80年代气候不变情况下,土地利用变化对径流变化的影响。模拟可知,20世纪80年代,年实测径流平均值为 $22.23 \text{ m}^3/\text{s}$,实际情景1下模拟的年平均径流量为 $22.98 \text{ m}^3/\text{s}$,而模拟情景1模拟的年平均径流量为 $22.89 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表明在固定80年代气候不变的情况下,土地利用变化使得年平均径流量减小。

(2) 实际情景2、模拟情景2和模拟情景3。实际情景2:第二阶段1991~2000年,采用1991~2000年的气候数据和1999年土地利用数据,模拟该情境下的径流变化情况,称为实际情景2(表2)。模拟情景2、3:和实际情景2相比,气候因子固定不变,土地利用数据分别为1987和2008年,此情形与实际情景2下模拟的径流相比,二者差值可以看作是在90年代气候不变情况下,土地利用变化对径流变化的影响。模拟可知,20世纪90年代,

年实测径流平均值为 $15.51 \text{ m}^3/\text{s}$,实际情景2下模拟的年平均径流量为 $16.46 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟情景2模拟的年平均径流量为 $16.53 \text{ m}^3/\text{s}$,模拟情景3模拟的年平均径流量为 $15.54 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表明在固定90年代气候不变的情况下,1987~2008年,由于土地利用变化,年平均径流量一直在减小。

(3) 实际情景3和模拟情景4。实际情景3:第三阶段2001~2008年,采用2001~2008年的气候数据和2008年土地利用数据,模拟该情境下的径流变化情况,称为实际情景3(表2)。模拟情景4:和实际情景3相比,气候因子固定不变,土地利用数据为1999年,此情形与实际情景3下模拟的径流相比,二者差值可以看作是在2000年以后气候不变情况下,土地利用变化对径流变化的影响。模拟可知,2000年以后,年实测径流平均值为 $15.38 \text{ m}^3/\text{s}$,实际情景3下模拟的年平均径流量为 $16.23 \text{ m}^3/\text{s}$,而模拟情景4模拟的年平均径流量为 $17.49 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表明在固定2000年以后气候不变的情况下,由于土地利用变化使得年平均径流量减小。

3.4.2 气候变化对径流变化的影响

(1) 实际情景1和模拟情景5。模拟情景5:

表2 土地利用变化对流域年径流变化的影响

Table 2 The impacts of landuse changes on the annual average runoff effects

	实际情景 1	模拟情景 1	模拟情景 2	实际情景 2	模拟情景 3	实际情景 3	模拟情景 4
气候数据	1981~1990	1981~1990	1991~2000	1991~2000	1991~2000	2001~2008	2001~2008
土地利用数据	1987	1999	1987	1999	2008	2008	1999
实测径流(m ³ /s)	22.23			15.51		15.38	
模拟径流(m ³ /s)	22.98	22.89	16.53	16.46	15.54	16.23	17.49

和实际情景 1 相比,土地利用固定不变,采用 1991~2000 年的气候数据,此情形与实际情景 1 下模拟的径流相比,二者差值可以看作是在 80 年代土地利用不变情况下,气候变化对径流变化的影响。模拟可知,20 世纪 80 年代,年实测径流平均值为 22.23 m³/s(表 3),实际情景 1 下模拟的年平均径流量为 22.98 m³/s,而模拟情景 5 模拟的年平均径流量为 20.16 m³/s。表明在固定 80 年代土地利用不变情况下,由于气候变化使得年平均径流量减小。

(2) 实际情景 2、模拟情景 6 和 7。模拟情景 6、7 和实际情景 2 相比,土地利用固定不变,分别采用 1981~1990 年和 2001~2008 年的气候数据,此情形与实际情景 2 下模拟的径流相比,二者差值可以看作是在 90 年代土地利用不变情况下,气候变化对径流变化的影响。模拟可知,20 世纪 90 年代,年实测径流均值为 15.51 m³/s(表 3),实际情景 2 下模拟的年均径流量为 16.46 m³/s,模拟情景 6 模拟的年平均径流量为 18.71 m³/s,模拟情景 7 模拟的年平均径流量为 22.85 m³/s。表明在固定 90 年代土地利用不变情况下,20 世纪 80~90 年代年平均径流量减小,2000 后年平均径流量增大。

(3) 实际情景 3 和模拟情景 8。模拟情景 8: 和实际情景 3 相比,土地利用固定不变,采用 1991~2000 年气候数据,与实际情景 3 下模拟径流相比,二者差值可看作是在 2000 年以后土地利用不变情况下,气候变化对径流变化的影响。模拟可知,2000 年以后,年实测径流平均值为 15.38 m³/s(表 3),实际情景 3 下模拟的年平均径流量为 16.23 m³/s,而模拟情景 8 模拟的年平均径流量为

11.32 m³/s。表明在固定 2000 年以后土地利用不变情况下,由于气候变化使得年平均径流值增大。

4 结论与讨论

本文利用 SWAT 模型,对伊洛河流域伊河上游地区径流量进行模拟,并进行不同气候和土地利用变化情景下水文响应分析,得到如下结论:

1987~2008 年,流域土地利用变化明显,林地、库塘和建设用地面积持续增加,而草地、河流和未利用地面积持续减少,耕地面积在 1987~1999 年间增加,而在 1999~2008 年间减少。20 世纪 80 年代以来,年尺度上,土地利用变化使得平均径流量减小,不同阶段由于气候的变化,减少的程度也不一样。80~90 年代,气候变化使得年平均径流量减小,而 90 年代到 2000 年以后,气候变化使得年平均径流量增加,这与 90 年代年平均降水量减少,而 2000 年以后年平均降水量增加一致。

利用 SWAT 水文模型来模拟气候和土地利用变化对流域径流的影响,虽然取得了一些成果,但 SWAT 水文模型需要的参数也很多,特别是需要大量、长时间序列、连续的日值资料等,由于受到数据可获取的限制,部分参数难于进行准确的设置,最终对模型的精度都会有一定的影响。本研究采用固定因子的情景假设方法,分析在同一气候或同一土地利用条件下径流的变化,此方法还不能完全区分气候与土地利用变化对流域径流的影响权重,单独区分气候和土地利用变化对流域径流变化的影响还需要深入探讨。模型参数确定时,如果能够通过野外实验资料辅助模型参数的确

表3 气候变化对年径流变化的影响

Table 3 The impacts of climate changes on the annual average runoff effects

	实际情景 1	模拟情景 5	模拟情景 6	实际情景 2	模拟情景 7	实际情景 3	模拟情景 8
气候数据(年)	1981~1990	1991~2000	1981~1990	1991~2000	2001~2008	2001~2008	1991~2000
土地利用数据(年)	1987	1987	1999	1999	1999	2008	2008
实测径流(m ³ /s)	22.23			15.51		15.38	
模拟径流(m ³ /s)	22.98	20.16	18.71	16.46	22.85	16.23	11.32

定,将会大大提高模型的模拟精度。此外,各种土地利用类型的变化对流域径流的影响还需要进一步分析。尽管模拟的水文过程变化存在不确定性,但研究表明,调整土地利用模式可有效调控水资源过程,特别是在山区流域,保护植被,提高植被覆盖度,合理耕作,是保护水资源的重要措施。

参考文献:

- [1] 王让会,张慧芝.生态系统耦合的原理与方法[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,2004.
- [2] 史培军,宫 鹏,李晓兵,等.土地利用/土地覆盖变化研究的方法与实践[M].北京:科学出版社,2000.
- [3] Bronstert A, Niehoff D, Bürger G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities[J]. *Hydrological Processes*, 2002, **16**(2): 509-529.
- [4] Bewket W, Sterk G. Dynamics in land cover and its effect on stream flow in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia [J]. *Hydrological Processes*, 2005, **19**(2): 445-458.
- [5] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等.泾河流域近 50 年来的径流时空变化与驱动力分析[J]. *地理科学*, 2011, **31**(6): 721~727.
- [6] 中野秀章.森林水文学[M].李云森,译.北京:中国林业出版社, 1983.
- [7] 邓慧平,李秀彬,张 明,等.气候与地表覆被变化对梭磨河流域水文影响的分析[J]. *地理科学*, 2001, **21**(6): 493~497.
- [8] 穆兴民,王 飞,李 靖,等.水土保持措施对河川径流影响的评价方法研究进展[J]. *水土保持通报*, 2004, **24** (3): 73~78.
- [9] 胡金明,邓 伟,夏佰成. LASCAM 水文模型在流域生态水文过程研究中的应用——模型理论基础[J]. *地理科学*, 2005, **25** (4): 427~433.
- [10] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. *地理科学*, 2003, **22**(1): 79~86.
- [11] 张银辉. Swat 模型及其应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2005, **24**(5): 121~129.
- [12] Hernandez M, Miller S N, Goodrich D C. Modeling Runoff Response to Land Cover and Rainfall Spatial Variability in Semi-Arid Watersheds[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, **62**(1): 285-298.
- [13] Weber A, Fohrer N, Möller D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors — effects on landscape structures and functions[J]. *Ecological Modelling*, 2001, **140**(1-2): 125-140.
- [14] Yu G, Xue B, Lai G Y, et al. A 2002 Year historical modeling of catchment nutrient changes in Taihu basin China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(2): 79-87.
- [15] 李道峰,刘昌明. 分布式流域水文模型水量过程模拟——以黄河河源区为例[J]. *地理科学*, 2005, **25** (3): 299~304.
- [16] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应——以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[J]. *生态学报*, 2008, **28** (2): 636~644.
- [17] 张雪松,郝芳华,杨志峰,等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2003, **10**(4): 38~42.
- [18] 杨桂莲,郝芳华,刘昌明,等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价——以洛河流域为例[J]. *地理科学进展*, 2003, **22**(5): 463~471.

The Impacts of Climate and Landuse Changes on The Runoff Effects: Case in The Upper Reaches of The Yihe River, The Yiluo River Basin

LIANG Guo-fu, DING Sheng-yan

(Institute of Natural Resources and Environmental Science Research, Henan University;
College of Environment & Planning, Henan University, Kaifeng, Henan 475001, China)

Abstract: This paper investigated the climate and landuse changes in the upper reaches of the Yihe River since the 1980s. Based on the field investigation, remote sensing and GIS technology, the distributed hydrological model, SWAT (the Soil and Water Assessment Tool) model, was constructed for the studied basin. The results showed that: in the study area, woodland was the dominant landuse type. In 1987-2008, the area of woodland, pond and construction land increased, while the area of the grassland, river and unused land decreased. The area of arable land increased at first, then reduced. Since the 1980s, landuse changes led to the annual average runoff decreased at different stages. From the 1980s to the 1990s, climate changes caused the annual average runoff to decrease, while increase after 2000. All these had a close relation with the annual average precipitation, which was low in the 1990s and increased after 2000.

Key words: climate change; landuse change; runoff effect; SWAT model; the Yiluo River basin