

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

宋艳华^{1,2}, 马金辉³

(1. 河南省科学院地理研究所, 河南 郑州 450052; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:生态环境问题受到了日益广泛的关注,生态恢复也在各地蓬勃开展,但生态恢复工程的开展迫切需要相关理论研究的指导。采用假定生态恢复情景的方法,在遥感和地理信息系统的支持下,利用分布式水文模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)对陇西黄土高原的典型流域——华家岭南河流域进行了多种生态恢复情景模型的设计,并模拟了不同生态恢复情景下径流和蒸散发的响应情况。得出:在南河流域草地比森林植被涵养水源的作用更强,模拟年均径流深比林地低 9.1%,而蒸散发却高 2.2%,所以南河流域生态恢复过程中种草是十分必要的。结果同时表明,应用 SWAT 模型进行流域尺度的生态恢复水文响应研究是可行高效的。

关键词:SWAT 模型;生态恢复;水文响应;陇西黄土高原;GIS;径流模拟

文章编号:1000-0933(2008)02-0636-09 中图分类号:Q149,X171.1 文献标识码:A

SWAT-Aided research on hydrological responses to ecological restoration: a case study of the Nanhe River Basin in Huajialing of Longxi Loess Plateau

SONG Yan-Hua^{1,2}, MA Jin-Hui²

1 Institute of Geography, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China

2 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 National Laboratory of Western Chinese Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0636 ~ 0644.

Abstract: Ecological degradation is a growing concern, and efforts to restore landscapes to more pristine conditions have begun in different areas. However, this restoration work commonly proceeds without the benefit of appropriate theoretical guidance. In this paper, a new approach is presented to predict how the water balance may shift in response to different restoration scenarios. Ten ecological restoration scenarios with different land covers were simulated for the Nanhe River Basin, on the Longxi Loess Plateau, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Grassland was predicted to result in lower evapotranspiration and greater runoff compared to higher evapotranspiration and lower runoff for forest. Therefore, grass will be a preferred choice in ecological restoration practices in the Nanhe River Basin. This paper demonstrates the value of SWAT when predicting hydrological responses to ecological restoration at a watershed scale.

Key Words: SWAT (Soil and Water Assessment Tools); ecological restoration; hydrological effects; Longxi Loess Plateau;

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40501054)

收稿日期:2006-11-23; 修订日期:2007-04-29

作者简介:宋艳华(1979~),女,河南封丘人,硕士,主要从事 GIS 与水文生态环境模拟. E-mail: syhdata@126.com

致谢:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所南卓铜副研究员对本研究给予指导,特此致谢

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40501054)

Received date: 2006-11-23; **Accepted date:** 2007-04-29

Biography: SONG Yan-Hua, Master, mainly engaged in GIS and eco-hydrological environment simulation. E-mail: syhdata@126.com

GIS (Geographic Information System); runoff simulation

当前,生态恢复的相关研究已成为科学发展的前沿领域之一^[1,2]。生态恢复的效果主要体现在区域尺度上的资源和环境效应上^[3],而生态恢复的重要环境效应之一是水文效应。

生态恢复的水文效应研究,早期大都采用试验流域的方法^[4]。这种方法有利于揭示植被—土壤—大气相互作用的机理,但难以在较大尺度上定量评估土地利用/土地覆被(LUCC)变化的水文效应^[3,5]。自 20 世纪 60 年代以来,计算机技术的发展、流域水文模型的进步,为分析 LUCC 在整个流域尺度上的水文效应提供了一个有效的手段。美国农业部(USDA)开发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型^[6~9]是一个长时段的流域分布式水文模型。在国外 LUCC 变化的水文效应研究中,SWAT 模型被广泛应用。Fohre 等^[10]发现地表径流对土地利用变化最为敏感。Weher 等^[11]的研究结果表明,河道流量与地表径流量随着林地面积的减少和草地面积的增加而增加。Hernandez 等^[12]认为 SWAT 模型可以很好的反映土地覆被变化条件下的多年降水—径流关系。Céline 等^[13]应用 SWAT 模型成功地模拟了由于人类活动而导致湿地干涸所产生的水文效应,研究还在情景模拟的结果中提出了取消耗水量大的作物而改种植葡萄的建议。

我国郝芳华等^[14]利用土地利用变化对产流、产沙影响的情景模拟得出:森林的存在将会增加径流量,减少产沙量;草地减少产沙量;农业用地增加产沙量。陈军锋等^[15]的研究结果表明,当土地覆被由无植被覆盖转变为有林地全部覆盖时径流深减小,蒸发量增加。张蕾娜^①通过模拟 6 种土地覆被情景下的径流结果,发现还草比还林更能增加径流。李道锋^②研究了黄河源区 LUCC 变化的水文响应情况,结果表明,随着土地植被覆盖度的增加,流域径流量减小,蒸发量增加。

从总体上来看,SWAT 模型主要应用在湿润地区,在黄土高原地区的应用还相对较少。本文首次将 SWAT 模型应用到陇西黄土高原地区,并模拟了多种不同生态恢复措施的水文响应情况,旨在定量评估下垫面变化对流域水量平衡中的径流、蒸散发的影响,进而探索改善陇西黄土高原地区生态环境和进行生态恢复的最佳途径。研究结果有助于对陇西黄土高原地区降水—径流机制的理解,对正在实施的生态恢复工程具有一定的指导价值,并对 SWAT 模型的推广有一定的意义。

1 研究区概况与基础数据

华家岭南河流域位于陇西黄土高原的中部地区,为葫芦河一级支流。流域海拔高度介于 1390 ~ 2380m 之间,面积约为 1,125km²,在行政区域上包括了静宁县西南部、通渭县东北部及会宁县南部,如图 1 所示。

流域年平均气温 3 ~ 8℃,大致由西北向东南随海拔高度的递减而增加;年陆面蒸发量平均在 440 ~ 500mm 之间,由东南向西北、由低海拔向高海拔呈增加趋势;多年平均降水量在 400 ~ 550mm 之间,降水量空间变异较大,季节分配也极不均匀,7、8、9 三个月的降水一般占全年降水的 60% 左右,而且常以突发性、短历时性的大雨或暴雨形式降落。降水的这一特征使得该地区的水文循环过程和产汇流特征也与湿润地区不同。流域多年平均年径流总量为 0.16 亿 m³,年平均流量为 0.52m³/s,年平均径流深为 14.63mm。

该区域气候和耕作制度具有明显的过渡性特征,且植被稀疏、开垦严重、沟壑纵横、水土流失严重,其气候条件、地貌特征和农业发展现状在陇西黄土高原地区比较典型。

本研究中的流域 DEM 和水系数据数字化自 1:50000 纸制地形地图;土壤类型的空间分布和属性数据来源于土壤普查资料^{③④⑤};土地利用/土地覆被数据分辨率为 1:100000(来源于中国科学院地理所);植被的属

① 张蕾娜. 白河流域土地覆被变化水文效应的分析与模拟. 中国科学院地理科学与资源研究所博士学位论文,2004

② 李道锋. 黄河河源区径流对土地覆被和气候变化的响应. 北京师范大学博士学位论文,2003

③ 甘肃省静宁县土壤普查办公室. 甘肃省静宁县土壤志. 静宁:甘肃省静宁县土壤普查办公室,1986

④ 甘肃省通渭县土壤普查办公室. 甘肃省静宁县土壤普查报告. 通渭:甘肃省通渭县土壤普查办公室,1985

⑤ 甘肃省会宁县土壤普查办公室. 甘肃省会宁县土壤普查报告. 会宁:甘肃省会宁县土壤普查办公室,1986

接彩图 1

性数据来源于农业调查资料^{①②③};流域内没有气象站,研究中利用流域外围华家岭、静宁和庄浪 3 个气象站的气温数据,以 $-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 的递减率来估算气温^[16];流域内共有 9 个雨量站(图 1),其中流域出口的仁大站为水文站,日径流量数据观测时段为 1981~1989 年。

2 模拟结果评价

在利用 SWAT 模型进行径流相关的模拟分析之前,首先要对模型进行校准与验证。有研究表明,SWAT 模型对降水异常高值年的模拟精度较差^④,而南河流域 1984 年的降水较为异常,年降水量对比相邻两年的增加幅度达 25%,因此,本文将 1981~1983 年和 1985~1989 年分别作为模型的校准期与验证期。

SWAT 模型参数众多,校准参数的选择尤为重要。研究中利用“状态值(Condition Number)”法对 SWAT 模型水文模拟的相关参数进行了敏感性分析,得出对于南河流域径流模拟结果最为敏感的参数依次为:子流域的平均坡长、CN2、土壤容重、土壤饱和和水力传导率、土壤层的有效含水量和子流域的平均坡度等。敏感性参数的确定是模型校准时参数率定的基础和依据。表 1 为部分参数的敏感性大小及最终率定结果。

表 1 SWAT 模型参数率定结果

Table 1 The parameters calibration results of SWAT model

输入参数 Input parameter	参数含义 Definition	状态值 Condition number	调整值 Calibration value
CN2	AMCII 条件下的初始 SCS 径流曲线系数 Initial SCS runoff curve number for moisture condition II	0.3361	+2.1
SLSUBBSN	子流域平均坡长 Average slope length	-0.5542	-4
SOL_AWC	土层中可利用的水量 Available water capacity of the soil layer	-0.0497	+0.02
SLOPE	平均边坡坡度 Average slope steepness	0.0471	-2%
SMFMX	积雪的最大融化系数 Melt factor for snow on June 21	-0.0336	-10%

利用 SWAT 模型对两个时期内的径流深分别进行模拟,图 2 为对 SWAT 模型校准后得到的 1985~1989 年径流深模拟结果。结果显示:年均径流深的模拟值与实测值的相对误差在 5% 以内,月均径流深实测值和模拟值之间的确定性系数和 Nash-Sutcliffe 效率系数均在 0.6 以上。说明在 1985~1989 年,SWAT 模型能够比较准确地模拟该流域的径流深,模型在该时段内具有较好的适用性,可以应用于与流域径流相关的各种模拟分析。

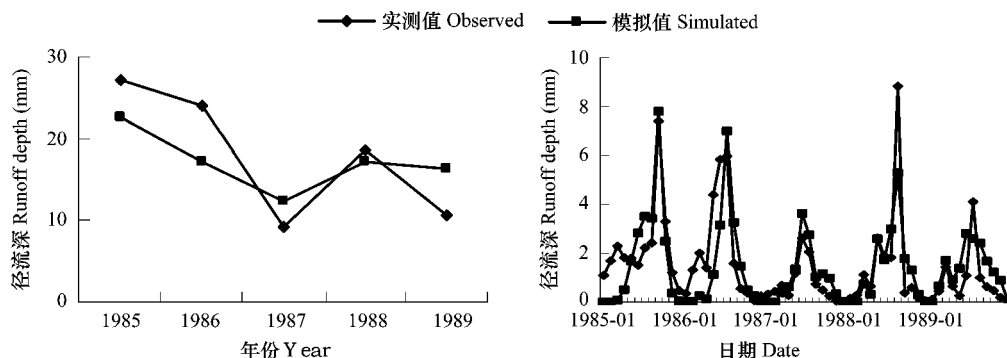


图 2 南河流域仁大水文站径流深模拟值与实测值对比图

Fig. 2 Observed and simulated runoff depths at the Renda hydrological station

① 静宁县农业区划办公室. 甘肃省静宁县综合农业区划. 静宁:甘肃省静宁县农业区划办公室,1985

② 通渭县农业区划委员会. 甘肃省通渭县综合农业区划报告. 通渭:甘肃省通渭县农业区划委员会,1985

③ 会宁县农业区划委员会. 甘肃省会宁县农业资源调查与区划. 会宁:甘肃省会宁县农业区划委员会,1986

④ Tzyy-Woei C. Modeling Hydrologic and Water Quality Response of a Mixed Land Use Watershed in Piedmont Physiographic. Doctor Thesis of Graduate School of the University of Maryland, 2003

接彩图 3

3 生态恢复水文响应情景模拟

3.1 生态恢复情景模型的建立

径流是反映流域水文过程的一项综合指标,主要受气候和下垫面因素的影响。气候和下垫面因素的不同组合,在不同尺度范围内将对径流产生不同的影响^[17]。

为了探究南河流域不同下垫面状况的水文功能,寻求现有气候条件下流域最佳土地利用/土地覆被情景,并对区域生态恢复提供参考,本研究依据国家林业局对耕地坡度等级的划分标准^[18],设定了 10 种生态恢复及下垫面变化情景模型,并利用 SWAT 模型对时段内各情景下的径流深和蒸散发分别进行模拟,各情景均采用 1985~1989 年气候资料作为输入数据。建立的南河流域生态恢复情景模型具体是:

情景 1 南河流域全部为高盖度草地。

情景 2 南河流域坡度在 6°以上土地全部为高盖度草地,坡度在 6°以下为耕地。

情景 3 南河流域 15°以上土地全部为高盖度草地,6°~15°之间为灌木林,6°以下仍为耕地。

情景 4 南河流域 25°以上土地全部为高盖度草地,6°~25°之间为灌木林,6°以下仍为耕地。

情景 5 南河流域 6°以上土地全部为灌木林,6°以下仍为耕地。

情景 6 南河流域全部为灌木林。

情景 7 南河流域 25°以上土地为高盖度草地,25°以下全为耕地。

情景 8 南河流域 15°以上土地为高盖度草地,15°以下全为耕地。

情景 9 南河流域全为耕地。

情景 10 南河流域全为裸地。

图 3 示例了其中 6 种生态恢复情景模型(4 种单一下垫面情景未列出)。

3.2 生态恢复情景模拟结果

3.2.1 径流

图 4 和表 2 分别为 10 种生态恢复情景模型模拟出的 1985~1989 年时段内的年均径流深及相对于观测值的变化情况。分析多年平均径流深的模拟结果可以发现,各种情景的模拟径流深存在以下规律:情景 10 > 情景 9 > 情景 7 > 情景 8 > 情景 4 > 情景 5 > 情景 3 > 情景 6 > 情景 2 > 情景 1。表明,随着地表草地和林地面积的增加,南河流域年均径流深减少,下垫面以林地和草地为主的情景 1~6 和情景 8 模拟径流深均小于观测值,其余情景的模拟径流深均比观测值有所增加。

模拟径流深最大值为情景 10(流域全为裸地),其次为情景 9 和情景 7,即地表无植和地表全部或绝大部分为耕地时,3 种情景下模拟年均径流深分别比观测值增加 33.30%、5.83% 和 5.82%,达到 23.81mm、18.90mm 和 18.9mm;而以高盖度草地为主的情景(情景 1 和情景 2)模拟年均径流深相对于观测值减少最多,分别减少了 16.47% 和 13.05%;其次是地表全为森林的情景 6,模拟年均径流深为 16.31mm,比观测值减少了 8.67%。总的来说模拟年均径流深裸地 > 耕地 > 林地 > 草地。模拟结果充分显示出了草地和森林植被涵养水源、调节河川径流的作用,也说明在南河流域草地比森林植被涵养水源的作用更强。

从 5a 的月均径流深模拟结果(图 5)可以发现,随着地表草地和林地覆盖度的增加,月均径流深减小,但表现更为强烈的为 2~4 月份和 6~9 月份两个时段,其中第一个时段为积雪融水补给所产生的春汛期。因此土地覆被变化对汛期径流深的影响较大,而对非汛期径流深的影响则不明显。

由图 5 可知,除情景 1 和情景 2(全部或大部分为高盖度草地)之外,其他 8 种情景的径流年内变化均呈

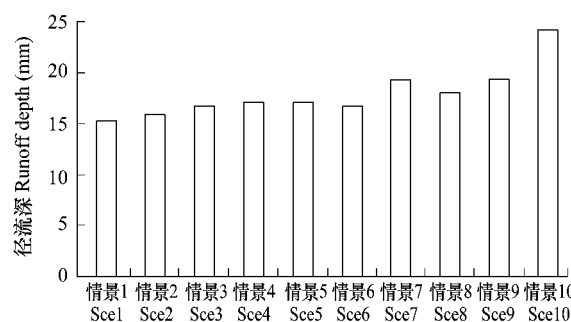


图 4 不同生态恢复情景下 5a 平均径流深模拟结果柱状图

Fig. 4 The histogram of simulated 5-year average annual runoffs under different ecological restoration scenarios

双峰分布,两个峰值分别是 3 月份和 7 月份,并且植被覆盖度越低峰值越高。

流域基本无植被覆盖时(情景 10)峰值最高,一年内两次洪峰,每次洪峰时径流深都在 4mm 以上,大于等于 3mm 径流深的月份有 5 个。3 月份的第一次洪峰峰值 3 倍以上于其他情景。

流域全部或大部分为草地时(情景 1 和情景 2),只有一个洪峰(7 月份),洪峰流量均在 3.2mm 以下,为所有情景中洪峰流量最小的,小于观测值的 3.23mm。从可持续发展的角度评价,草地保持水土、涵养水源的生态屏障作用是其最主要的功能,具有不可替代性。

流域内森林占支配地位时(情景 3 到 6),径流为双峰分布,3 月份的第一次洪峰不太明显,径流深较小,均在 0.51mm 以下;7 月份的第二次洪峰流量较大,达到 3.33~3.47mm 之间,高于观测值的 3.23mm,并高于草地占支配地位的情景 1 和情景 2。

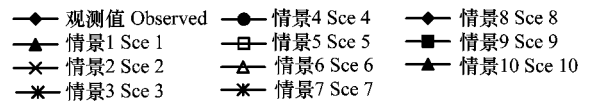


图 5 不同生态恢复情景下的 5a 月均径流深模拟结果折线图
Fig. 5 Simulated 5-year average monthly runoffs under different ecological restoration scenarios

表 2 不同生态恢复情景下 5a 平均径流深模拟结果

Table 2 The simulated results of the 5-year average annual runoffs under different ecological restoration scenarios

项目 Item	模拟年均径流深 Simulated value(mm)	相对于观测值的变化量 Change(mm)	相对于观测值的变化率 variability (%)
观测值 Observed	17.861		
情景 1 Scenario 1	14.920	-2.94	-16.47
情景 2 Scenario 2	15.530	-2.33	-13.05
情景 3 Scenario 3	16.340	-1.52	-8.52
情景 4 Scenario 4	16.680	-1.18	-6.61
情景 5 Scenario 5	16.676	-1.19	-6.63
情景 6 Scenario 6	16.312	-1.55	-8.67
情景 7 Scenario 7	18.900	1.04	5.82
情景 8 Scenario 8	17.642	-0.22	-1.23
情景 9 Scenario 9	18.902	1.04	5.83
情景 10 Scenario 10	23.808	5.95	33.30

耕地占支配地位的情景 7、8、9,模拟径流为明显的双峰分布,3 月份的第一次洪峰在 1.2mm 以下,小于观测值的 1.5mm;7 月份的第二次洪峰在 3.85~4.28mm 之间,大于观测值的 3.23mm。

以上分析说明,南河流域草地消减洪峰,涵养水源的功能最强,其次是林地。而当人们为了生存需要毁去草地和森林使其成为耕地后,草地和森林所具有的这些功能一去不返,水土流失,山体滑坡,泥石流等现象随之而生。

3.2.2 蒸散发

SWAT 模型提供了 3 种蒸散发模型,通过对各种模型下模拟出径流量的精度对比分析,发现 Penman-Monteith 模型精度最高,故选择 Penman-Monteith 模型来模拟蒸散发。图 6 为不同生态恢复情景下 1985~1989 年 5a 的平均蒸散发的模拟结果。从图中可以看出,流域内不同生态恢复情景下的年均蒸散发模拟结果存在以下关系:情景 1>情景 2>情景 3>情景 6>情景 4>情景 5>情景 10>情景 8>情景 7>情景 9,即耕地面积越大蒸散发越小;草地和林地的面积越大蒸散发量越大。

流域全为耕地时(情景9),模拟年均蒸散发量最小,仅为 389mm,这是因为流域内农作物生长期较短,且生产率相对较低;随着流域内草地和林地面积的增加,模拟年均蒸散发量增大。其中情景1(全为草地)的年均蒸散发模拟值为 407.69mm,高于情景2(6°以上为草地,以下为耕地)的 405.05mm,也高于情景6(全为林地)的 398.8mm;裸地由于地表无植被保护,在太阳辐射和风的作用下,表层土壤水分被强烈蒸发,水分损失严重,年均蒸散发高于耕地,但低于草地和林地。

总的来说,模拟年均蒸散发存在下列规律:草地 > 林地 > 裸地 > 耕地,这与径流的模拟结果完全相反。流域全为草地时,地表径流深最低,即有较多的降水被草拦截渗入土壤,也使得有更多的水分可以被用于蒸散,最终使得草地的蒸散发量最大。

综上模拟分析可以得出:不同结构类型的植被对地表径流和蒸散发所产生的影响各异。因此对不同地区生态恢复的具体措施,应按照当地的水热条件、地形土壤、海拔等各种自然、生态因子和社会经济状况来科学地规划农业结构中粮、林、草的合理布局以及生态恢复过程中林与草的布局。就本研究区而言,根据实地调查和农业、土壤调查资料发现,本区干旱缺水,树木成活率极低,生长周期又较长,许多陡坡地不宜林木和农作物生长,而草类植被的适应性强、生长周期短见效快,同时草本植被的蓄水固土、调节气候、涵养水源的能力很强,因此在南河流域生态恢复过程中种草是十分必要的。相关研究也表明^[19~20]:黄土高原地区在某些情况下,植树造林也可能在水文上出现不利因素,黄土高原植被恢复应以自然草地为主。

4 结论和讨论

通过校准,SWAT 模型在南河流域 1985~1989 年时段有较高的径流模拟精度。本文采用了假定生态恢复情景的方法,对该时段内的径流和蒸散发进行了多种生态恢复情景的水文响应模拟分析,得出:

模拟年均径流深裸地 > 耕地 > 林地 > 草地。其中草地比林地低 9.1%,且随着地表草地和林地面积的增加,南河流域年均径流深减少。模拟结果充分显示出了草地和森林植被涵养水源、调节河川径流的作用,也说明在南河流域草地比森林植被涵养水源的作用更强。

多年月均径流深的模拟结果与年均径流深的模拟结果类似,即随着地表草地和林地覆盖度的增加,月均径流深减小。但这一趋势更明显地体现在汛期(2~4 月份和 6~9 月份)。因此土地覆被变化对汛期径流深的影响较大,而对非汛期径流深的影响则不明显。

模拟年均蒸散发草地 > 林地 > 裸地 > 耕地,耕地面积越大蒸散发越小,草地和林地的面积越大蒸散发量越大,草地的蒸散发量最大,比林地高出 2.2%。

生态恢复情景模拟结果显示:不同结构类型的植被对地表径流和蒸散发所产生的影响各异,因此对不同地区生态恢复的具体措施,应按照当地具体情况来科学布局;在南河流域生态恢复过程中种草是十分必要的。

本研究中受现有数据条件的限制,存在一些不足,如,生态恢复情景模型的建立带有一定的主观性,仅从理论角度以坡度为主要划分依据来建立情景模型。实际中除了坡度外,植被的生长和分布条件还与海拔高度、坡向以及土壤类型、土壤水分条件等因素有很大的关系。所以下一步研究着重从气候、地形和土壤数据入手,兼顾流域潜在的生态条件,并与当地经济发展情况、土地利用规划相结合,对南河流域生态恢复情景做出更合理的设定,再以此为基础对生态恢复情景下的水文效应进行模拟研究,从而对该地区的生态恢复工程提供更有价值的借鉴。本文的研究同时表明,在具备一定的数据条件下,应用 SWAT 模型进行流域尺度的生态恢复水文响应研究是可行并且高效的。

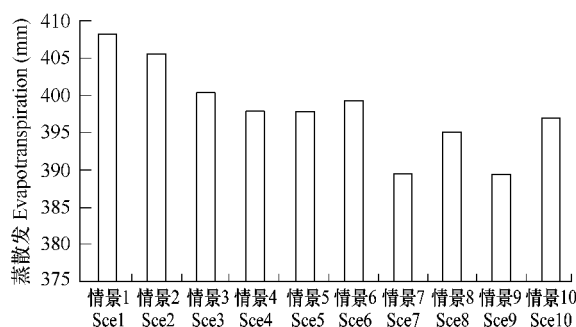


图6 不同生态恢复情景下的5a平均蒸散发模拟结果柱状图

Fig. 6 The histogram of simulated 5-year average annual evapotranspirations under different ecological restoration scenarios

References:

- [1] Mi W B, Xie Y Z. The comprehensive summarization of ecological restoration and reconstruction. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(2): 49—53.
- [2] Ji Z P, Su Y Q, Liu J J. Elementary study on ecological restoration and support system in loess plateau. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(4): 9—13.
- [3] Zhang L N, Li X B, Wang Z F, *et al.* Study and application of SWAT model in the Yunzhou reservoir basin. *Hydrology*, 2004, 24(3): 4—8.
- [4] Chen J F, Li X B. The impact of forest change on watershed hydrology-Discussing some controversies on forest hydrology. *Journal of National Resources*, 2004, 16(5): 474—480.
- [5] Chen J F, Li X B, Zhang M. Modelling the impact of the changing of climate and LUCC to the watershed hydrology with models. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2004, 34(7): 668—674.
- [6] Williams J R, Nicks A D, Arnold J G. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulics Engineering*, 1985, 111(6): 970—986.
- [7] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 1993, 142: 47—69.
- [8] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, *et al.* Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas: USDA, Agriculture Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory, 2002, 92—432.
- [9] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, *et al.* Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Texas: USDA, Agriculture Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory, 2002, 1—412.
- [10] Fohrer N, M Iler D, Steiner N. An interdisciplinary modeling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 655—662.
- [11] Weber A, Fohrer N, M Iler D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors-effects on landscape structures and functions. *Ecological Modeling*, 2001, 140: 125—140.
- [12] Hernandez M, Miller S N, Goodrich D C, *et al.* Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-and watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000(64): 285—298.
- [13] Céline C, Ghislain de M, Faycal B, *et al.* A long-term hydrological modeling of the Upper Guadiana river basin (Spain). *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003(28): 193—200.
- [14] Hao F H, Chen L Q, Liu C M, *et al.* Impact of land use change on runoff and sediment yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 5—8.
- [15] Chen J F, Li X B. Simulation of hydrological response to land cover changes. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 833—836.
- [16] Li D L ed. The climate of Gansu Province. Beijing: China Meteorological Press, 2000.
- [17] Cheng W G ed. The hydrological cycle and its mathematical models of forest ecosystem in mountains. Beijing: Science Press, 2004.
- [18] State Forestry Administration. Technology models of converting cropland to forestland. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001.
- [19] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 433—438.
- [20] Huang Y L, Chen L D, Fu B J, *et al.* Experimental study on ecological water use in a gully catchment of the Loess Plateau: effects of climate and land use change. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 14—19.

参考文献:

- [1] 米文宝, 谢应忠. 生态恢复与重建研究综述, 水土保持研究, 2006, 13(2): 49~53.
- [2] 季志平, 苏印泉, 刘建军. 黄土高原的生态恢复与支撑体系初探. 西北林学院学报, 2005, 20(4): 9~13.
- [3] 张蕾娜, 李秀彬, 王兆锋, 等. 一种可以用于表征土地利用变化水文效应的水文模型探讨——SWAT模型在云州水库流域的应用研究. 水文, 2004, 24(3): 4~8.
- [4] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论. 自然资源学报, 2004, 16(5): 474~480.
- [5] 陈军锋, 李秀彬, 张明. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, 34(7): 668~674.
- [14] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5~8.
- [15] 陈军锋, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究. 应用生态学报, 2004, 15(5): 833~836.
- [16] 李栋梁主编. 甘肃气候. 北京: 气象出版社, 2000.
- [17] 程根伟主编. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟. 北京: 科学出版社, 2004.
- [18] 国家林业局编著. 退耕还林技术模式. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [19] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433~438.
- [20] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域生态用水试验研究——气候和土地利用变化的影响. 水科学进展, 2006, 17(1): 14~19.

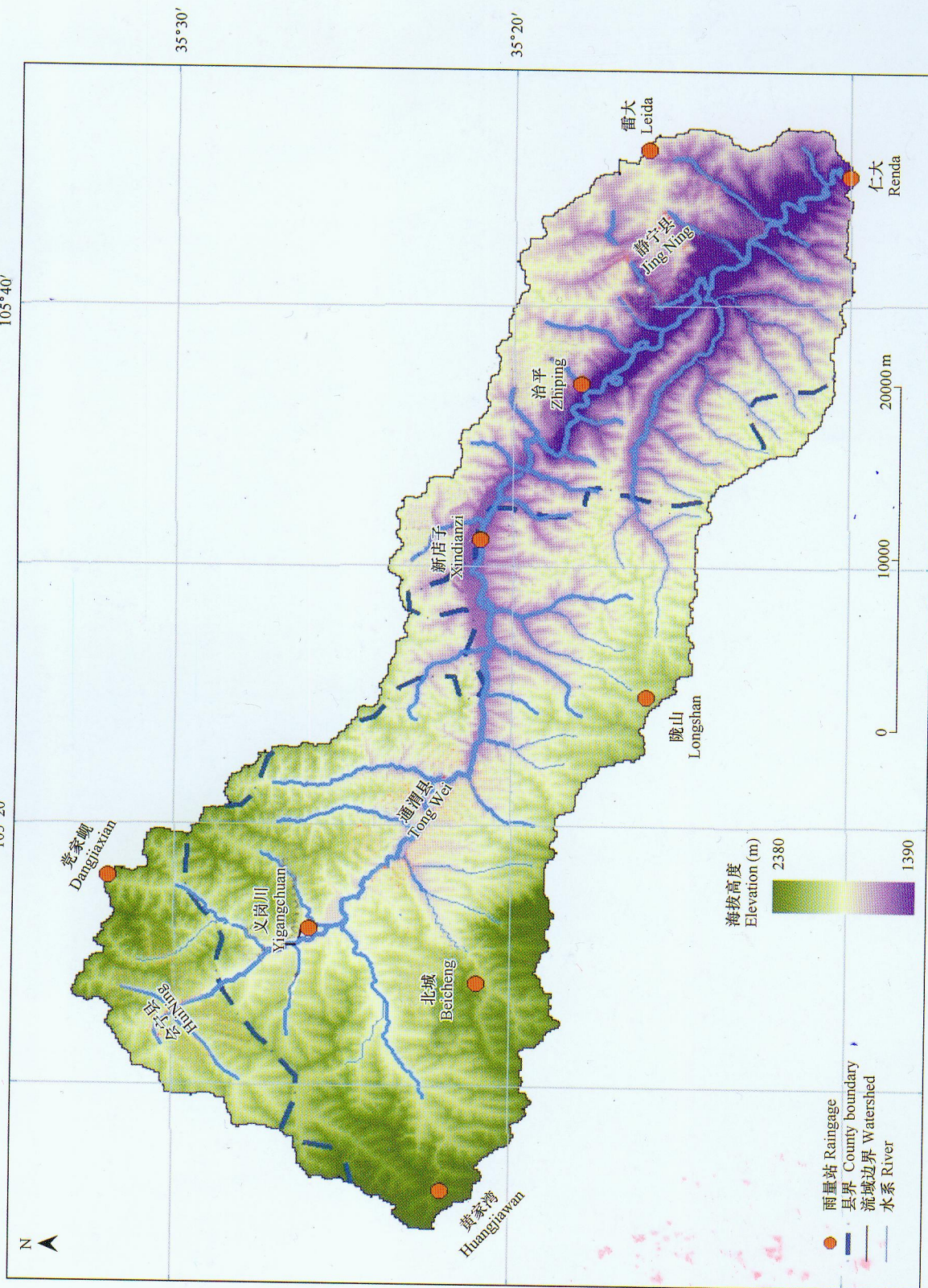


图 1 南河流域雨量站点分布图
Fig.1 The spatial distribution map of raingages in Nanhe River Basin

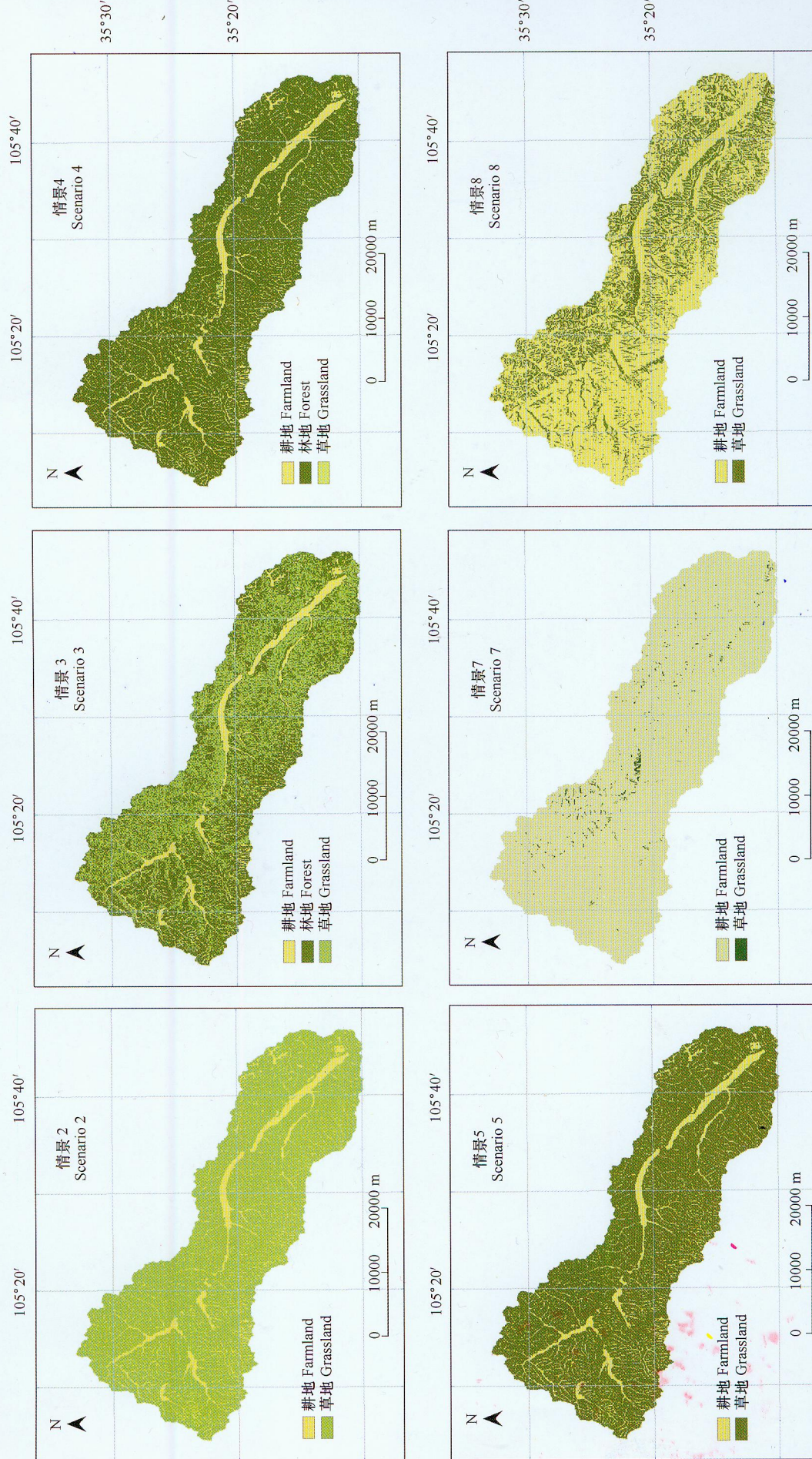


图3 南河流域生态恢复情景模型

Fig.3 Ecological restoration scenario models for the Nanhe River Basin