

基于 SWAT 模型的湟水流域径流模拟与评价

王亚军¹, 周陈超², 贾绍凤², 燕华云³, 李润杰⁴

(1. 青海省科学技术厅, 西宁 810001; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 青海省水文水资源勘测局, 西宁 810001; 4. 青海省水利水电科学研究所, 西宁 810001)

摘 要:以青海省湟水流域民和水文站以上流域为研究区,在 GIS 技术支持下,运用分布式水文模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)进行湟水流域天然径流的产流模拟,通过选用湟水流域 1980~ 1997 年相应的水文气象资料作为 SWAT 模型的输入数据,选用 1980~ 1987 年湟水流域出口民和站的年、月平均天然流量进行模型的参数率定,1989~ 1997 年民和站的年、月平均天然流量进行模型的验证,采用相对误差(R_E)、相关系数(R^2)以及 Nash Sutcliffe 模拟系数(E_m)作为模型适用性的评价系数,结果表明:SWAT 模型对湟水流域长期天然径流变化过程模拟结果良好,较好地反映湟水流域水资源的变化过程,为研究湟水流域的水资源提供了模型支持。
关键词:SWAT; 湟水流域; 水资源; 参数率定; 模型验证
中图分类号:T V221.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2007)06-0394-04

Simulation and Assessment of Natural Runoff in
Huangshui River Basin Based on SWAT

WANG Ya jun¹, ZHOU Chen chao², JIA Shao feng², YAN Hua yun³, LI Run jie⁴

(1. Bureau of Science and Technology of Qinghai Province, Xi'ning 810001, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Bureau of Water Resource Survey of Qinghai, Xi'ning 810001, China; 4. Institute of Water Conservancy and Hydropower of Qinghai, Xi'ning 810001, China)

Abstract: Supported by GIS technology, a distributed hydrological model- SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is applied to simulate the natural runoff of Huangshui River basin. For parameter calibration of the model, it is used the 1980~ 1987 data series of annual and monthly average natural runoffs from Minhe gauging station, located at the exit of Huangshui river basin, as well as meteorological records in the basin. And the model is also tested by 1989~ 1997 annual and monthly average natural runoffs data from Minhe station. According to the coefficient for judging the adaptability of the model, such as Relative Error (R_E), Relative Coefficient (R^2) and Nash Sutcliffe simulating coefficient (E_m), the outcome of the SWAT model on simulating the dynamic process of natural runoff in long term is fairly good to reflect the water resources change of Huangshui River basin, thus a scientific basis is provided for further study on water resources of Huangshui River basin.
Key words: Huangshui River Basin; SWAT; water resource; parameter calibration; model validation

1 引 言

湟水是黄河的一级支流,发源于青海省海北藏族自治州海晏县包呼图河北部的洪呼日尼哈,河水自北向东南流,在甘肃省永登县傅子村注入黄河。湟水河长 335 km,大通河口以上流域面积 11 612 万 km² (不包括大通河的集水面积)。湟水流域对于青海具有特别重要的意义。湟水流域位于青海省东部,是青海省政治、经济、文化、交通中心,流域内人口、经济占全省近 70%,湟水流域的社会经济发展,直接影响着青海省全局的发展。但同时湟水流域水资源短缺、水环境恶化、水土流失严重,社会经济发展与生态环境的矛盾十分突出^[1]。本文利用 SWAT 模型进行湟水流域径流变化过程的模拟,研究天然径流量的变化规律,以便为生态经济协调发展和水资源优化配置提供借鉴和依据。

2 SWAT 模型及产流计算原理

2.1 SWAT 模型水量平衡模块

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是美国农业部(USDA)开发的流域尺度的分布式模型,它具有很强的物理基础,适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂大流域,并能在资料缺乏的地区建模,在加拿大和北美寒区具有广泛的应用。SWAT 的功能十分强大,能够用来模拟径流过程,模拟和分析水土流失、非点源污染、农业管理等问题。用于模拟预测长期对于具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响^[1]。
SWAT 模型具体计算涉及到地表径流、土壤水、地下水以及河道汇流,模型结构框图。采用类似于 HYMO 模型

*收稿日期: 2007-02-09
基金项目: 水利部 948 项目(200302); 青海省水利厅项目(2005-2-602)
作者简介: 王亚军(1962-),男,高级工程师,主要从事科技管理工作及水资源研究。

(Williams 和 Hann, 1973) 的命令结构(Command Structure) 来控制径流和化学物质的演算。通过子流域命令, 进行分布式产流计算; 通过汇流演算命令, 模拟河网与水库的汇流过程; 通过叠加命令, 把实测的数据和点源数据输入到模型中同模拟值进行比较; 通过输入命令, 接受其它模型的输出之值; 通过转移命令, 把某河段(或水库) 的水转移到其他的河段(或水库) 中, 也可直接用作农业。

SWAT 模型水量平衡基本表达式为:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{sep} - Q_{gw}) \quad (1)$$
式中: SW_t ——最终的土壤含水量(mm); SW_0 ——土壤初始含水量(mm); t ——时间(d); R_{day} ——第 i 天的降水量(mm); Q_{surf} ——第 i 天的地表径流(mm); E_a ——第 i 天的蒸发量(mm); W_{sep} ——第 i 天侧向渗流量(mm); Q_{gw} ——第 i 天的垂向地下水出流量(mm)。

SWAT 采用先进的模块化设计思路, 水循环的每一个环节对应一个子模块, 十分方便模型的扩展和应用。SWAT 模型提供 SCS 模型 Curve Number^[2] 的方法和 Green & Ampt 入渗方法^[3] 计算地表径流。在计算蒸散发时, 考虑水面蒸发、裸地蒸发和植被蒸腾, 并分开模拟土壤水蒸发和植物蒸腾。潜在土壤水蒸发由潜在蒸散发和叶面积指数估算。实际土壤水蒸发用土壤厚度和含水量的指数关系式计算。植物蒸腾由潜在蒸散发和叶面积指数的线性关系式计算, 并提供 3 种潜在蒸发计算方法(Penman Montith 方法^[4], Priestley Taylor 方法^[5] 以及 Hargreaves 方法^[6]) 以供模型使用者选择。壤中流的计算用动力贮水模型的方法^[7], 考虑

水力传导度、坡度和土壤含水量的时空变化。SWAT 将地下水分为浅层地下水和深层地下水, 浅层地下径流汇入流域内河流, 深层地下径流汇入流域外河流。

2.2 SWAT 模型输入参数与计算流程

SWAT 模型输入数据及与数据相关的参数见表 1。

表 1 SWAT 模型输入数据

数据类型	参数	数据来源
DEM	海拔高程、坡度、坡向、坡长、形状参数等。	1: 25 万数字化地形图
土壤	密度、水传导率, 田间持水率、水文组等	1: 100 万数字化土壤图
土地利用	叶面指数、径流曲线数、冠层高度、曼宁系数等	1: 100 万数字化土地利用图
气象	最高最低气温、降水、相对湿度、太阳辐射、风速等	湟水流域相应气象与径流实测值

SWAT 模型模拟的最小时间步长是 1 d, 要求输入的气候因素包括日降水量、最高最低气温、太阳辐射、风速和相对湿度。这些变量可以直接输入, 也可以通过一个“天气生成器”模拟^[8]。

运行 SWAT 模型时, 首先要求输入流域的数字高程模型(DEM 图, 图 1a), 模型应用 TOPOAZ (Topographic Parameterization) 自动进行数字地形分析的软件包, 基于 D8 方法、最陡坡度原则和最小给水面积阈值的概念, 对输入栅格型 DEM 进行处理, 定义流域范围, 划分子流域, 确定河网结构(图 1b) 和计算子流域参数。当集水区面积闭值(形成河流的最小集水面积) 被划定之后, 自动划分子流域。

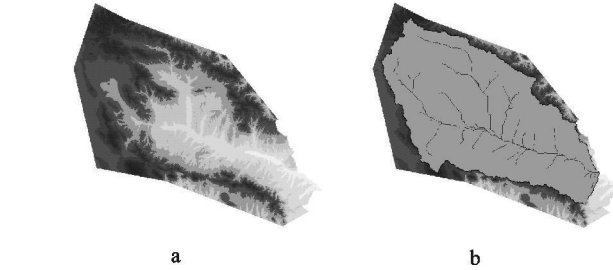


图 1a 1: 25DEM

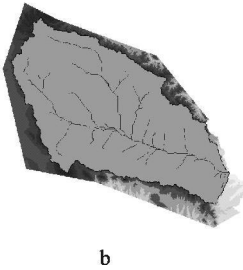


图 1b 河网划分

在子流域划分的基础上其采用代表性基本单元概念划分计算单元, 根据不同土地利用和土壤类型的组合在每一个子流域内进一步划分水文响应单元(Hydrologic response units, HRU), HRU 以非空间方式模拟, 即以在某一亚流域中土壤和土地利用协同变化特征的概率分布来代表。同时模型计算各个子流域或 HRU 的基本数据, 包括高程、面积、坡度形状系数等, 为每一个单元水循环的运算打好基础。然后再分别输入流域的土地覆被栅格图和土壤栅格图, 通过计算逐个水文响应单元的径流量, 最后得到流域的总径流量。

3 SWAT 模型在湟水流域中的应用

3.1 湟水流域自然地理概况

湟水流域多年平均气温一般 2. 7~ 7. 8℃, 极端最高气温 25. 5~ 35℃, 极端最低气温 - 23~ - 32℃, 无霜期 75~ 184 d。年日照时数 2 600 h 左右, 日照时间长, 总辐射量大, 并由东向西递增。流域形状西宽东窄, 地势自西北向东南逐渐降低, 最高达 4 898. 3 m, 最低处位于甘肃、青海两省交界的湟水水谷地约 1 650 m, 相对高差达 3 250 m。流域多年平

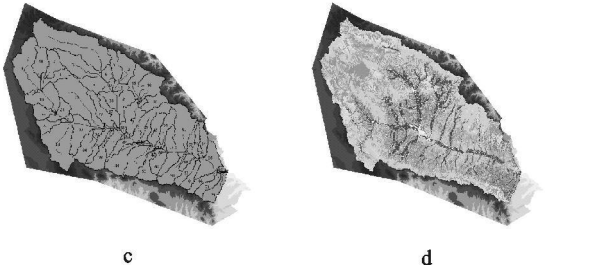


图 1c 子流域划分

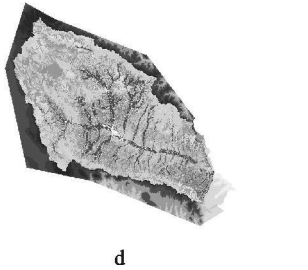


图 1d 1: 100 万土地利用

均降雨量为 490 mm 左右, 多年平均蒸发量为 750~ 1 000 mm。流域内地形复杂多样, 有高山、中高山, 又有黄土覆盖的低山丘陵和河谷平原^[9]。

3.2 SWAT 模型应用过程

3.2.1 数据输入与分析

依据 SWAT 模型的要求, 如表 1 所要求的数据格式, 选取相应的 DEM, SOIL 和 LANDUSE 分布图(图 1), 同时, 选取湟水流域 60 个降雨站 1979~ 1997 年日实测降雨资料作为降雨输入数据, 湟水西宁站的日气象实测资料作为气象输入数据, 湟水流域青海省境内出口民和站的 1979~ 1997 年系列天然年径流与月径流数据作为校核数据。然后利用 SWAT 进行子流域划分, 由于本文选用的湟水流域降雨站达到 60 个, 为了充分利用各个降雨站的降雨数据, 通过设定最小给水面积阈值, 将子流域划分为 70 个, 并提取出数字河网图(图 1c)。

3.2.2 模型校准和验证

当模型的结构和输入参数初步确定后, 就需要对模型进

行校准(Calibration)和验证(Validation)。通常将使用的资料系列分为两部分,其中一部分用于模型的参数率定即校准模型,而另一部分则用于模型的验证。校准是调整模型参数(经分析得出SCS曲线数CN2、土壤层中可利用水量AWC、土壤蒸发补偿系数ESCO、浅层地下水再蒸发系数GW_REVAP、基流衰退系数 α_{gw} 因子、蓄水池补给迟滞时间GW_DELAY、河道曼宁系数OV_N为本模型模拟过程中最敏感因子)、初始和边界条件以及限制条件的过程,以使模型模拟值接近于实际测量值。选用相对误差(R_E)线性回归相关系数(R^2)和Nash Sutcliffe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。使用Nash Sutcliffe系数 E_{ns} 来衡量模型模拟值与观测值之间的拟合度,其表达式为

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2} \quad (2)$$

式中: Q_m ——观测值; Q_p ——模拟值; Q_{avg} ——观测平均值; n ——观测的次数。当 $Q_m = Q_p$ 时, $E_{ns} = 1$;如果 E_{ns} 为负值,说明模拟值比直接使用测量值的算术平均值更不具代表性。

根据资料获取的完整性,选用1980–1987年湟水民和水文站的年、月系列天然径流量对径流进行参数率定,对上文提到的7个敏感性参数进行调整,通过调整这些参数(表2)使得径流模拟值与实测值相吻合(图2、图3),其模拟值与实测值年均误差应该小于10%,年、月均值的线性回归系数 $R^2 > 0.6$ 及 $E_{ns} > 0.6$ ^[10]。

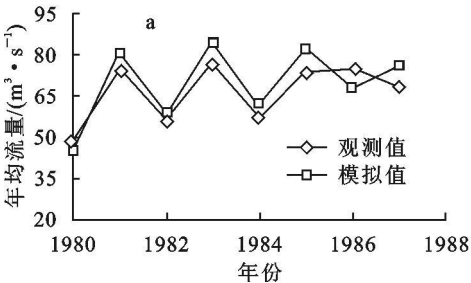


图 2a 1980–1987 年均流量模拟校核

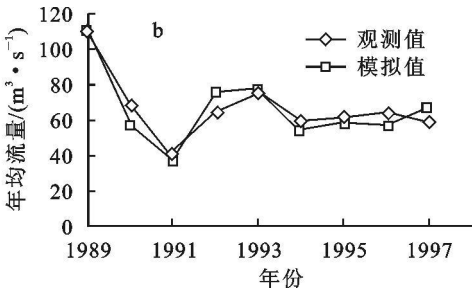


图 2b 1989–1997 年均流量模拟验证

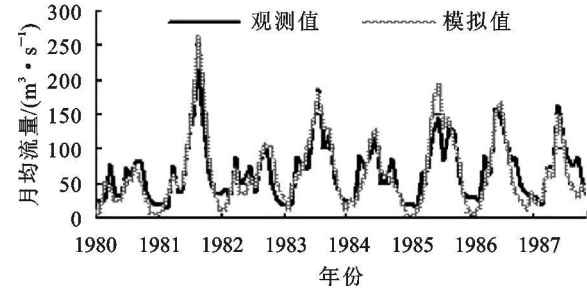


图 3a 1980–1987 月均流量模拟校核

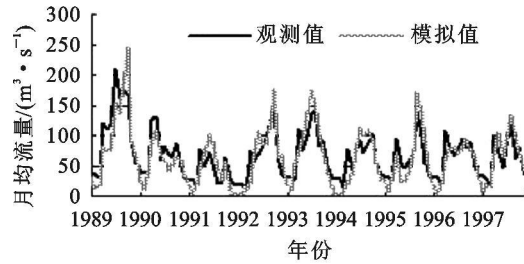
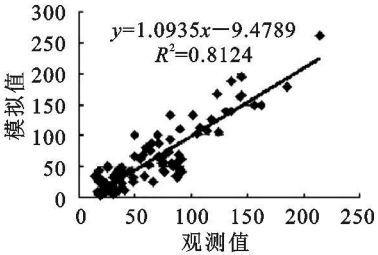


图 3b 1989–1997 月均流量模拟验证

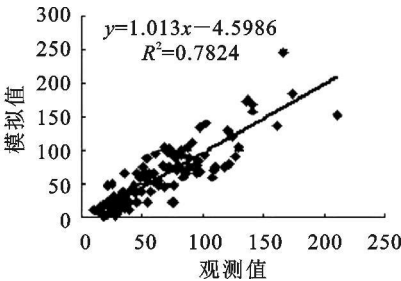


表 2 SWAT 模型校核参数值

变量	模拟过程	参数描述	值域变化范围	参数最终值
CN ₂	地表径流	径流曲线数	- 8~ 8	55~ 70
AWC	径流	土壤层可供水量	0.00~ 1.00	0.15~ 0.20
ESCO	蒸发、径流	土壤蒸发补偿系数	0.00~ 1.00	0.2
GW_REVAP	地下径流	地下水再蒸发系数	0.00~ 0.20	0.12
α_{gw}	地下径流	基流衰退系数	0.00~ 1.00	0.02
GW_DELAY	地下径流	蓄水补给迟滞时间	0~ 500	30
OV_N	河道汇流	河道曼宁系数	0.01~ 30.00	0.15

由图 2a 可以看出,通过调整相关模型参数,使 1980–1987 年径流模拟值与实测值吻合较好,年径流平均相对误差为 4.9%,满足要求;从图 3a 可以看到,1980–1987 年月径流模拟值与实测值的相关系数 $R^2 = 0.81$, E_{ns} 经计算等于

0.80,也达到了较好的模拟精度。

采用模型校核率定过程中所确定的参数,应用 1989–1997 年的实测年、月经流数据进行模型的验证。并采用 R^2 和 E_{ns} 对模型的验证结果进行评价。由图 2b 可以看到,1989–1997 年径

流模拟值与实测值吻合良好, 年平均相对误差为 5.2%, 满足要求; 月径流模拟值与实测值的相关系数 $R^2 = 0.78$, E_{rs} 等于 0.76, 也较好地满足了模型验证所需的精度。

3.2.3 综合结果分析

经过模型校核与验证后, 模型取得了较好的模拟效果。综合这两个时间段的 SWAT 模拟过程, 进行结果分析。

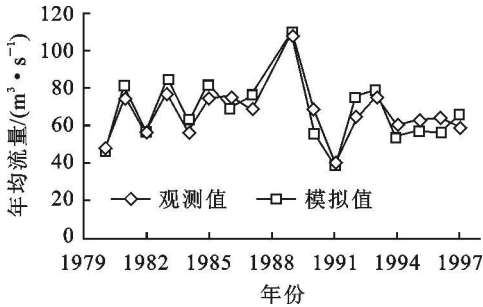


图 4 1980–1997 年均流量 SWAT 模拟对照

由图 4 看到, 1980–1997 年系列径流模拟值与实测值吻合得相当好, 评价结果见表 3。

表 3 1980–1987 年均流量模拟评价

评价指标	精度指标	模型精度	评价结果
相对误差	< 10%	5.1%	合格
相关系数	> 0.6	0.87	合格
E_{rs}	> 0.6	0.82	合格
水量平衡系数	< 10%	2.5%	合格

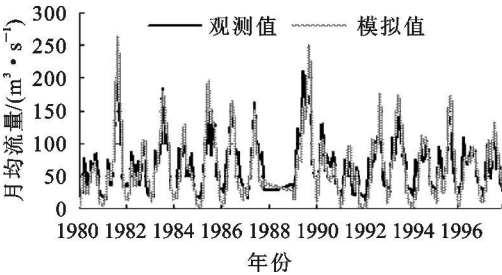


图 5a 1980–1997 年月平均流量 SWAT 模拟对照

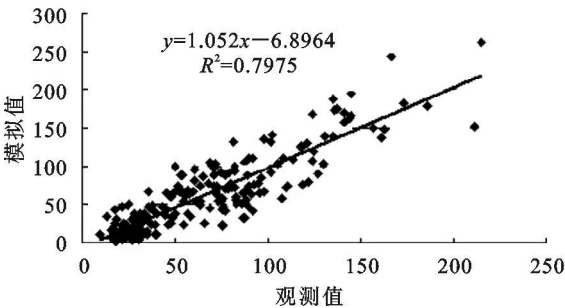


图 5b 1980–1997 年月平均流量 模拟值与实测值散点

对 1980–1997 年月径流模拟值与实测值进行对比, 由图 5a 可以看到, 1980–1987 年, 月平均径流模拟值与实测值变化过程吻合的比较好, 由图 5b 可以看到, 模拟流量与实测流量相关系数 $R^2 = 0.80$, 模拟评价结果见表 4。

通过对年均流量与月均流量的模拟值和实测值对比分析, 可以看到, SWAT 模型的水量模拟过程在湟水流域地区具有良好的适用性, 从各个指标来看, 都达到了良好的模拟精度, 完全满足对湟水流域水资源变化的研究。但是也有以下几点不足:

(1) 由于湟水流域地处西北寒区, 枯水月份河道径流主

要由地下水回补补给, 然而从月均流量模拟过程来看, SWAT 模型对基流的模拟值偏小, 导致模拟值在枯水月份较实测值平均偏小 20% 左右;

表 4 1980–1987 年均流量模拟评价

评价指标	精度指标	模型精度	计算模拟评价结果
相关系数	> 0.6	0.80	合格
E_{rs}	> 0.6	0.77	合格
水量平衡系数	< 10%	3.0%	合格

(2) 从实测月均流量过程线可以看到, 每年 4 月, 流量都会因为融雪导致增大, 但在 SWAT 模拟的月均流量过程中, 融雪径流导致的流量增大在某些年份表现并不明显。

(3) 由于湟水流域面积广阔, 虽然模型尽可能地多采用了降雨站, 可是在某些年份的模拟还是会由于降雨的空间不均匀性导致模拟效果的不确定性, 例如 1988 年, SWAT 模拟值出现了较大的异常, 比正常年均流量偏大了 30%, 这将在以后的研究中进行深入分析。

4 结 论

SWAT 模型的引入为湟水流域水资源的科学研究和管理提供了有用工具, 它独特的分布式结构和运行控制方式也为我国分布式水文模型的研制开拓了视野。经研究发现:

(1) SWAT 模型在结构上考虑融雪和冻土对水文循环的影响, 较适用于我国西北寒区, 但由于湟水河流域空间差异较大, 而气象资料仅采用西宁气象站一站的数据, 单一气象站的资料没有广泛的代表性, 因此, 在数据输入 SWAT 模型之前, 虽然对气温、降水等气象资料做了高度校正, 但是由于空间差异问题, 仍然导致融雪径流模拟效果不太好。

(2) 由于 SWAT 模型运算的最小时段为 1 d, 所以 SWAT 模型不适用于单一事件的洪水过程的模拟, 在模拟洪峰峰值时会有系统性误差。模型比较适用于面向水资源管理的长时段的分布式水文过程模拟。

(3) SWAT 模型是在国外数据条件下构建的。因此, 在应用时需对模型的数据库部分进行修改, 特别需要建立用户自己的土壤属性数据库。土地利用编码也要进行转换。由于所采用的湟水流域土壤属性数据并不完全充分, 所以在地下径流的模拟过程中, 对基流调整没有良好的参数依据。

(4) 实例研究表明, 降雨空间分布对模拟结果影响很大。而 AVSWAT 2000 在降雨空间处理上不太理想。在流域降雨资料不充分的情况下建议采用“泰森多边形法”或者“距离倒数加权法”等生成子流域的降雨输入数据。本文由于流域面积太大, 尽量多地选用了降雨站, 从而得到了较好的模拟效果。

综上, SWAT 分布式水文模型能够较好模拟湟水流域高海拔地区的水文变化过程, 为湟水流域水资源变化过程和研究提供了科学工具, 此外除了本文介绍的分布式径流模拟功能之外, 还能用于面源污染、水土流失、土地利用和农业管理等方面的研究, 从而为进一步深入利用 SWAT 模型对湟水流域的水资源综合管理打下了良好的基础, 是一个十分值得推广的综合性流域水文模型。对于某些水文过程的模拟并将在以后的研究中进行进一步的探讨。

(下转第 406 页)

泰安要做大做强山东省重要的桃生产基地工作,莱芜市则以“三辣一麻”(莱芜生姜、大蒜、鸡腿葱、花椒)、“三黑一花”(莱芜黑猪、黑山羊、黑鸡、花脸长毛兔)为主要的特色农业的同时,继续推广“管灌”和“微喷灌”为主的节水灌溉工程。聊城市要发挥土地环境较好、较肥沃、灌溉较方便的优势,以粮棉为重点,形成现代化、能创汇、多品种、农林牧渔综合性、协调发展的大农业。德州市要重点抓好德州扒鸡、津汇蔬菜、德城花卉 3 家省级集团的发展,着力培植枣王集团等龙头企业,搞好粮棉、蔬菜、畜牧、林果、水产、花卉 6 大主导产业,力争主要农产品实现良种化。推进农业综合开发,要推广节水型灌溉,防止水源不足和土地次生盐渍化,以建成农业强市为目标,全力推进产业化。

3.2.4 鲁西南农业经济区

该区包括济宁、菏泽、枣庄 3 个地市,属于农业现代化水平较低的区域。该区地形以平原占绝对优势,水资源丰富,农业在当地经济中占重要地位,但农业结构单一,种植业在其农业中占非常突出的地位,农产品商品化水平低,农业现代化水平与其占尽优势的水、土、热资源极不相称。该区农业现代化建设的重点在于调整、优化农业经济结构,增加蔬菜面积、加快畜牧业、林果业发展。同时,需要山东省乃至国家给予政策倾斜、宏观协调、资金与技术支持,同时,该区要利用山东省开发鲁西、建设京九和鲁南产业带的有利时机,加快农业产业化的步伐,形成以济宁市为中心,枣庄、菏泽为两翼的发展格局。

济宁作为该区惟一农业现代水平较高(见表 4,属发展型)的地市。土地类型齐全,土地质量最好,且区位优势最,交通最方便,经济基础(尤其加工业基础)在 3 地市最好,应为该区的“龙头”,应充分发挥本市水足、土肥的优势,促进农业的全面、协调发展,推进农业的现代化、产业化、高效化与生态

化,培植龙头企业,促进农业持续发展。枣庄市面积较小,但相对土地质量较高,水资源丰富,区位较好,经济基础较好,其农业发展要向产业化、生态化发展,形成优质、高产、高效、协调发展的农业。菏泽是鲁西南面积最大、人口最多,全省经济最落后的地区,在稳定粮、棉、木材生产基地的基础上,加快蔬菜、畜牧业、渔业的发展,形成综合发展的生态农业。

参考文献:

[1] 张德富,殷正坤. 人工神经网络的发展及其哲理[J]. 科学技术与辩证法,2000,17(4): 17- 20.

[2] 李春华. 基于 Elman 神经网络模型的我国农业受灾面积预测研究[J]. 灾害学,2006,21(3): 3- 6.

[3] 崔卫芳. 基于 BP 神经网络的农业高科技投资项目风险评价模型[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版,2006,34(7): 166- 170.

[4] 赵锋. 广西现代农业评价指标体系研究[J]. 改革与战略,2006(5): 10- 15.

[5] 魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社,2005: 80- 87.

[6] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社,2002: 448- 456.

[7] 董长虹. MATLAB 神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社,2005: 171- 194.

[8] 张林泉,尹建中,刘照中等. 山东省可持续发展战略简论[M]. 北京: 科学出版社,2001: 79- 92.

[9] 全国农业资源区划办公室,中国科学院地理研究所. 中国农村经济区划: 中国农村经济区域发展研究[M]. 北京: 科学出版社,2000: 2- 3.

[10] 王有邦. 山东地理[M]. 济南: 山东省地图出版社,2000: 200- 273.

(上接第 397 页)

参考文献:

[1] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(1): 79- 86.

[2] USDA. Urban Hydrology for small watersheds[R]. Engineering Division, Soil Conservation Service, USDA, Technical Release 55, 1986.

[3] Green W H, Ampt G A. Studies on Soil Physics, 1. The Flow of Air and Water through Soils[J]. Journal of Agricultural Sciences 1981,4: 11- 24.

[4] Penman H L. Evaporation: An Introductory survey[J]. Netherlands Journal of Agricultural Science,1956,4: 7- 29.

[5] Priestley C H B, Taylor R J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using large Scale Parameters [J]. Mon. Weather Rav., 1972, 100: 81- 92.

[6] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature[J]. Applied Engineering Agriculture, 1985, 1: 96- 99.

[7] Sloan P G, Moore I D. Modeling Subsurface Stormflow on Steeply Sloping Forested Watersheds[J]. Water Resources Research, 1984, 20(12): 16- 19.

[8] 陈军锋. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用[J]. 北京大学学报,2004,40(2): 265- 270.

[9] 郭武. 湟水流域水文特征. 水文,1995,15(6): 52- 55.

[10] 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- 470.