

T—M 水量平衡模型在流域产流计算中的应用

王希¹, 王秀茹², 贾芳芳², 徐征和¹

(1. 济南大学 资源与环境学院, 山东 济南 250022;

2. 北京林业大学 水土保持学院, 教育部 水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 旨在通过研究流域各月度产水量, 对水资源管理和农业灌溉用水调度进行指导。[方法] 以锦阳川流域为研究对象, 运用遥感(remote sensing, RS)和地理信息系统(geographic information system, GIS)提取和处理空间土地利用、土壤及数字高程模型数据, 结合降雨、气温及不同植物的根深数据, 采用 Thornthwaite and Mather(T—M)模型计算了水分亏缺与剩余, 土壤水分补给与利用的周期及月度产流量。[结果] 研究区 2011 年平水年全年总径流量为 281.0 mm, 在 1, 3—4, 6 和 10 月, 存在水分亏缺及土壤水分利用, 面积加权的水分亏缺值为 5.8 mm; 2 月, 11—12 月降水对土壤水分进行补给; 5 和 7—9 月, 存在水分剩余, 面积加权的剩余值为 286.2 mm。丰水年(25%)、平水年(50%)和枯水年(75%)多年平均产水量分别为 8.3×10^7 , 4.8×10^7 及 2.2×10^7 m³。[结论] 研究区在丰水年(25%)的 2, 7—11 月, 平水年(50%)的 2—3, 7—9 月和枯水年(75%)的 12—2, 7—9 月存在水分剩余。

关键词: T—M 水量平衡模型; 产流; 水量盈亏; 遥感; GIS; 锦阳川流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0193-06

中图分类号: P333

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.036

Application of Thornthwaite and Mather Water Balance Model in Runoff Yield Calculation at Watershed Scale

WANG Xi¹, WANG Xiuru², JIA Fangfang², XU Zhenghe¹

(1. School of Resources and Environment, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to study the monthly water production to guide water resource management and agriculture irrigation scheduling. [Methods] Per capita water possession is only 290 m³ in Jinan City, which is less than one seventh of the nation's level. So Jinan City is in extreme lack of water resources. By taking Jinyangchuan watershed in southern area of Jinan City as the case research area, this paper estimated the water yield under the assistance of image interpretation of remote sensing (RS) and spatial analysis of geographic information system (GIS). First of all, image preprocessing of TM remote sensing data of 2009 was done under ERDAS IMAGINE 9.1 platform, including image synthesis, mosaic, enhancement and correcting. Seven kinds of land use types were identified through supervised classification, the land use map of study area was produced. Second, the soil map of Jinan was vectorized in ARCGIS 9.3 to get the soil texture map in the study area. Third, this study adopted Thornthwaite and Mather (T—M) water balance model to calculate the water balance, obtained the runoff from various land use-soil texture types and cycle of water deficit, moisture surplus, soil moisture recharge and soil moisture utilization in Jinyangchuan watershed. Finally, the runoff path and sub-watershed were generated with Digital Elevation Model (DEM) in EMS-I. WMS. v8.0 (Watershed Modeling System). Then the sub-watershed map was intersected with land use-soil texture map, runoff yield of every sub-watershed in different hydrological years was calculated using weather data from 1960 to 2011 and subsequently spatially expressed. [Results] The total annual runoff was 281.0 mm, water yield was 51 million m³ in Jinyangchuan watershed in 2011. In January, March, April, June and October, there was water deficit. In February, November and December the soil water was supplied

收稿日期: 2014-01-07

修回日期: 2014-02-04

资助项目: 水利部公益性行业科研专项(201201115)

第一作者: 王希(1987—), 女(汉族), 山东省济南市人, 博士, 讲师, 研究方向流域综合治理、土地整治。E-mail: shwx512@163.com。

通信作者: 徐征和(1968—), 男(汉族), 山东省临清市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水文与水资源、农田水利等研究。E-mail: xu4045@126.com。

by precipitation; In May, July to September, there was water surplus. The annual average water yield was separately 83 million m^3 , 48 million m^3 and 22 million m^3 in wet year, normal flow year and low flow year. [Conclusion] There is water surplus in February, July to November of wet year (25%), in February, March, July to November of flat water year (50%), in January, February, July to September, December of dry year (75%).

Keywords: Thornthwaite and Mather (T-M) water balance model, runoff producing, water surplus and deficit, remote sensing, Geographic Information System, Jinyangchuan watershed

近年来,随着人口的增长和人类活动的加剧,中国水资源供需矛盾日渐突出^[1],水资源短缺已成为制约社会经济可持续发展的重要因素^[2]。济南市人均水资源占有量仅 290 m^3 ,不足全国人均水资源占有量的 1/7^[3-5],是水资源极度匮乏的城市^[6]。面对严峻的用水形势,必须对水资源进行合理的评估、管理和规划,提高水资源利用率^[7]。然而城市化的加速造成降雨向地下的渗透急剧减少,对地下水的补给严重不足,仅仅依靠地表水已无法满足人们的生活、生产需求。通过流域产流计算可以准确了解流域降雨的产水量,进而对水资源进行合理规划与调配。目前,国内应用于流域产流计算的水文模型主要有 Top-model, Modcytel, HEC-1, SCS、新安江等模型^[8-11]。Thornthwaite and Mather(T-M)水量平衡模型在南、北美洲和亚洲南部得到广泛应用^[12-14],在国内,毛学森等^[15]曾用 T-M 法求算了土壤有效含水量,但该方法尚未应用于流域产水量的计算。T-M 水量平衡模型是一种月度水平衡方法,具有输入数据量少、易于实现、计算方便等特点,通过该方法更可以了解流域年度水分亏缺、水分剩余、土壤水分补给和土壤水分利用的周期。因此,本文采用 T-M 法,在遥感(remote sensing,RS)的图像解译功能和地理信息系统(geographic information system,GIS)空间分析功能的共同辅助下计算流域产水量。

本文选取济南市南部的锦阳川流域为研究对象,使用 RS 技术进行土地利用分类,利用 GIS 技术进行土壤图的矢量化及土地利用图和土壤图的空间叠加分析。并通过 T-M 水量平衡模型,利用降雨、气温、土壤、土地利用和不同植物的根深数据计算水分的亏缺与剩余、蒸散量、径流量等参数,确定了水分亏缺、水分剩余、土壤水分补给和利用的周期性规律。最后计算出研究区不同水文年的产水量和水分盈亏的周期。对该区的地表产流特征进行研究,有利于保证农业灌溉用水及城市用水的供给,并为有相似地形条件及缺少资料地区的产流计算提供理论依据及实践指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于济南市历城区锦阳川流域,流域面积

181.88 km^2 ,地处北纬 $36^{\circ}20'52''$ — $36^{\circ}28'43''$,东经 $116^{\circ}59'54''$ — $117^{\circ}14'7''$ 。海拔高程 110~953 m。该区属于暖温带季风气候区,四季分明。全年平均气温为 13.4 $^{\circ}C$,年平均降水量为 687.7 mm。土地利用类型主要为农用地、建设用地、密林、疏林、草地、水域、未利用地 7 种,土壤质地主要为砂壤土和黏壤土。

锦阳川流域上游现有小 I 型水库 1 座,小 II 型水库 10 座,下游的水与北部锦绣川、西南部锦云川共同汇流于卧虎山水库。卧虎山水库目前主要供给济南市特别是历城区的城市生活用水,在济南市生活、生产供水中发挥着十分重要的作用。

1.2 数据来源

锦阳川流域数字高程模型(digital elevation model,DEM)数据(中心经纬度为 116° — $117^{\circ}E$, 36° — $36^{\circ}N$;空间分辨率为 30 m),锦阳川流域 Landsat7 slc-off TM 卫星影像(条带号为 122,行编号为 35),均采用 2009 年数据,来源与: <http://datamirror.csdb.cn>;济南市土壤质地图,比例尺 1:5 万;气象数据(1960—2011 年):20 时至次日 20 时降水量、日最高气温、日最低气温、日照时数等,来源于国家气象资料中心提供的中国地面气候资料国际交换站数据集, <http://www.cma.gov.cn>,并收集到 2009—2011 年卧虎山雨量站日雨量记录;2009—2011 年研究区实测径流资,。

1.3 研究方法

通过水量平衡模型,运用遥感和 GIS 计算锦阳川流域产水量的研究过程如下:首先,用 Erdas Imagine 9.1 对 2009 年的 TM 遥感数据进行图像预处理,包括图像的合成、镶嵌、增强和纠正,通过监督分类法鉴别了 7 种不同的土地利用类型,得到研究区的土地利用图;其次,在 ArcGIS 9.3 中对济南市土壤图进行矢量化,得到研究区土壤质地图;再次,结合气象资料,利用 T-M 法进行水量平衡计算,得到锦阳川流域各土地利用—土壤质地类型下的产流量;最后,在 DEM 图的辅助下,在 EMS-I. WMS. v8.0(watershed modeling system)中生成产流路径及集水子流域,测算不同水文年流域产水量并进行流域产流空间表达(图 1)。

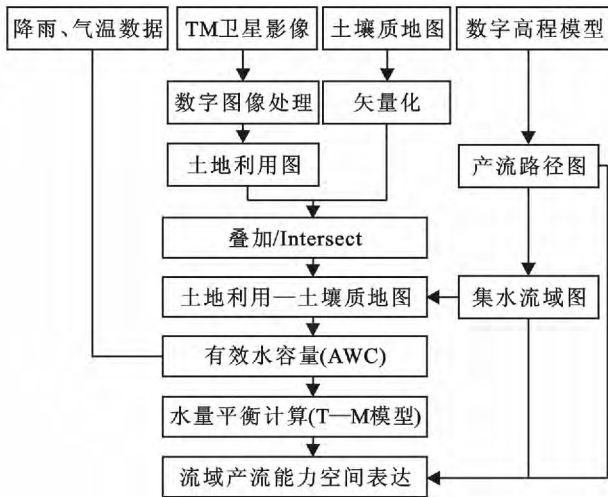


图 1 T—M 模型确定流域产水量技术路线图

1.3.1 土地利用图与土壤质地图 该文采用 Erdas Imagine 9.1 对 TM 卫星影像进行处理,采用监督分类中的最大似然比分类方法,将研究区土地利用类型分为农用地、建设用地、密林地、疏林地、草地、水域和未利用地 7 类(附图 10)。在 ArcGIS 9.3 中根据土壤质地的不同对济南市 1:5 万土壤图进行配准和矢量化,得到研究区土壤质地类型图,该区土壤质地有砂壤土、黏壤土两类。

1.3.2 Thornthwaite and Mather(T—M)水量平衡模型 T—M 模型是逐月计算的水量平衡模型,可以用来估算小流域的水平衡机制,科学调配水量。

(1) 潜在蒸散量(PET)^[16]。

$$PET = 16 \times C \times (10 \times T / I)^a \quad (1)$$

式中:PET——各月的潜在蒸散量(mm/月); $T = 0.5 \times 0.72 \times (3 \times T_{max} - T_{min})$ (°C); T_{max} ——最高气温(°C); T_{min} ——最低气温(°C); I ——月度热指数, $I = (T/5)^{1.514}$; $a = 6.75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1.792 \times 10^{-2} \times I + 0.49239$; C ——各月的校正系数, $C = (m/30) \times (d/12)$; m ——一个月的天数; d ——月平均日照时间,即每个月平均的日出与日落之间的时数。

(2) 累积的潜在水损失(APWL)。通过降水量 P 计算出 $P - PET$ 的值,然后从雨季后第一个 $P - PET$ 为负值的月份开始,通过公式(2)和(3)计算累积的潜在水损失 APWL, n 为月编号。

$$APWL_n = 0 \quad (APWL_{n-1} + (P - PET) \geq 0) \quad (2)$$

$$APWL_n = APWL_{n-1} + (P - PET) \quad (3)$$

$$(APWL_{n-1} + (P - PET) < 0)$$

式中: $APWL_n$ ——第 n 个月的累积潜在水损失(mm); P ——月降水量(mm/月)。

(3) 土壤储水量(STOR)。

$$STOR_n = AWC \times e^{(APWL/AWC)} \quad (4)$$

式中: $STOR_n$ ——第 n 个月的土壤储水量(mm); AWC ——各月的土壤有效水容量(mm/月)。根据桑斯维特和马瑟的理论, AWC 的值由土地利用、土壤质地及根区深度决定^[17-18]。

$$\Delta SM = STOR_n - STOR_{n-1} \quad (5)$$

当 $\Delta SM < 0$ 时,表示土壤储水量(STOR)被蒸发;当 $\Delta SM > 0$ 时,表示水分入渗到土壤,土壤湿度增加。

(4) 实际蒸散量(AET)。用公式(6)和(7)计算各月 AET:

$$AET = \Delta SM + P \quad (\Delta SM < 0) \quad (6)$$

$$AET = PET \quad (\Delta SM \geq 0) \quad (7)$$

式中: AET——各月的实际蒸散量(mm/月)。

(5) 水分亏缺(DEF)及水分剩余(SUR)。当某月的 $P - PET < 0$ 时,通过公式(8)计算水分亏缺 DEF:

$$DEF = PET - AET \quad (8)$$

式中: DEF——各月的水分亏缺(mm/月)。

当 STOR 达到有效水容量(AWC)时,无法储存的过剩水量(SUR)通过公式(9)计算:

$$SUR = P - PET \quad (9)$$

式中: SUR——各月的水分剩余(mm/月)。

当 STOR 未达到 AWC,便没有 SUR。STOR 在一个月内在达到 AWC 时, SUR 通过公式(10)计算:

$$SUR = P - (AET + \Delta SM) \quad (10)$$

(6) 可用径流(AR)与径流量(RO)根据公式(11)和(12)计算 AR 与 RO。

$$AR_n = SUR + (1 - \lambda) \times AR_{n-1} \quad (11)$$

$$RO = \lambda \times AR \quad (12)$$

式中: AR_n ——第 n 个月的可用径流(mm); RO——各月的径流量(mm/月)。

降水与水流经过观测站之间存在时间差,造成了计算的 $AR > RO$ 。按照以往的经验,该文假设有 50% 的 AR 转化为当月 RO^[19],即 $\lambda = 50\%$,其他的 AR 则被滞留在了底土、潜水和流域的水槽中,这些水将在下个月份成为可用径流。

1.3.3 集水流域 在 EMS—I. WMS. v 8.0 平台的水系模式下,通过空间分辨率为 30 m 的数字高程模型图,使用菜单 DEM 下的 Computer TOPAZ Flow Data 生成产流路径,经反复选取,最终设置汇流累积面积为 0.2 km²。根据研究区水库位置,通过 Outlet 按钮设置好子流域出口点后,用 DEM 菜单下的 Stream Arcs 生成所选择出口的上游水系,利用 Define Basins 工具得到集水子流域。

2 结果与分析

2.1 水量平衡计算

本文在 T—M 模型中通过月降水量和温度数据计算了累积潜在水损失量(APWL)(表 1),得到不同土地利用—土壤质地分类下的有效水容量(AWC),在此基础上计算了平水年 2011 年各土地利用特征下的月水量平衡情况(表 2)。图 2 显示了流域各月的降水(P)、潜在蒸散(PET)、实际蒸散(AET)、径流量(RO)的年度变化规律。通过逐月的水量平衡计算,

实现了土壤储水状态的年度特征分析,确定了水分剩余、水分亏缺、土壤水分补给和土壤水分利用的年度周期性规律。

研究区在 1,3,4,6 和 10 月, $AET < PET$, 存在水分亏缺(DEF),通过面积加权计算可知,年度 DEF 值为 5.8 mm,在此时段内植物生长将存在缺水压力,需要进行人工灌溉。此时, $P < AET$, 即存在着土壤水分的利用。5,7,8 和 9 月,存在水分剩余(SUR),通过面积加权计算可知,年度 SUR 值为 286.2 mm。2,11 和 12 月降水对土壤水分进行补给。

表 1 T—M 模型确定逐月累积的潜在水损失

mm

指标	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
月降水量 P	0.0	11.2	17.0	48.5	105.0	93.0	181.5	188.5	62.5	15.5	25.2	5.2
潜在蒸散量 PET	5.6	5.8	22.3	54.0	65.1	118.6	62.9	45.3	34.8	45.2	7.3	3.2
P—PET	-5.6	5.4	-5.3	-5.5	39.9	-25.6	118.6	143.2	27.7	-29.7	17.9	2.0
潜在水损失量	-15.5	-10.0	-15.4	-20.9	0.0	-25.6	0.0	0.0	0.0	-29.7	-11.8	-9.8

表 2 不同土地利用—土壤质地类型下的有效含水范围、有效水容量及径流量

土地利用类型	土壤质地	面积/hm ²	有效含水量/%	根深/m	有效水容量/mm	径流量/mm
农用地	砂壤土	223.80	15	1.0	150	281.2
	黏壤土	473.97	25	0.8	200	280.4
建设用地	砂壤土	320.27	15	0.2	30	290.8
	黏壤土	664.82	25	0.1	25	292.7
密林	砂壤土	4 431.00	15	2.0	300	279.7
	黏壤土	1 223.26	25	1.6	400	279.3
疏林	砂壤土	5 876.14	15	1.7	250	280.0
	黏壤土	3 396.87	25	1.0	250	280.0
草地	砂壤土	698.44	15	1.0	150	281.2
	黏壤土	508.56	25	1.0	250	280.0
水域	砂壤土	158.01	15	0.1	15	298.6
	黏壤土	169.90	25	0.0	10	303.6
未利用地	砂壤土	14.37	15	1.0	150	281.2
	黏壤土	13.65	25	1.0	250	280.0

表 3 显示年度最大径流位于水域和建设用地,其次是农用地及土壤质地类型为砂壤土的草地和未利用地,而最小径流量则位于密林、疏林及土壤质地为黏壤土的草地和未利用地。锦阳川流域各土地利用—土壤质地类型下的径流量(RO)各不相同,但相差不大,主要是由气候因素引起的。研究区内 $P - PET < 0$ 的月份有 1,3,4,6 和 10 月,月份较少并且不连续,累积的潜在水损失(APWL)也较小,导致在水分亏缺的月份,不同有效水容量(AWC)下的土壤实际储水量(STOR)的差异不大,影响到水分补给月份 2,11—12 月土壤实际储水量的变化值(ΔSM), ΔSM 的差异小,所以水分剩余(SUR)差异小。同时在水分剩余但是不补给土壤水分的月份 5,7—9 月,即使 AWC 不同,SUR 仍无差异。经计算,2011 年锦阳川流域从 753.1 mm 总降水量中产生了 281.0 mm 的地表径流量。

图 3 显示了利用 T—M 方法计算的 2009—2011 年锦阳川流域径流量与实测的流域径流量的比较结果。可以看出计算的径流量与实测径流有相同趋势,但高于实测径流。利用 SPSS 进行曲线回归分析,可知两者具有显著的二次曲线关系:

$$y = 4.245 + 0.011x + 0.005x^2 \quad (R^2 = 0.826)$$

2.2 流域产流的空间表达

运用 T—M 模型通过有效水容量求出各土地利用—土壤质地类别的径流量年值,经水量平衡计算,锦阳川流域在丰水年(25%)的 2,7—11 月,平水年

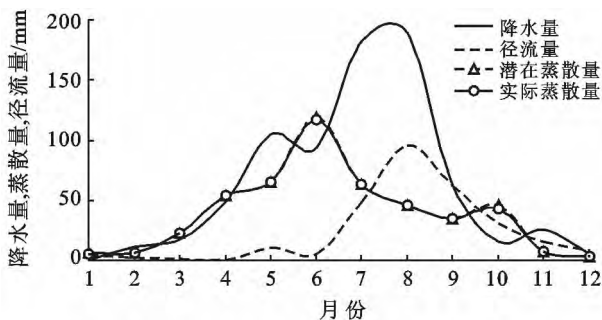


图 2 锦阳川流域水量平衡状态

(50%)的 2—3,7—9 月和枯水年(75%)的 12—2 月、 年平均产水量分别为 8.30×10^7 , 4.80×10^7 及 $2.20 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。图 4 为各子流域在不同水平年的产水量。

表 3 锦阳川流域各土地利用—土壤质地类型下月平均水平衡计算

序号	组成	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合计
1	水分亏缺(DEF)	0.5	0	0.4	0.6	0	2.1	0	0	0	2.8	0	0	6.3
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	20.4	0	95.1	143.2	27.7	0	0	0	286.4
	径流(RO)	3.8	1.9	1	0.5	10.4	5.2	47.6	95.4	61.6	30.8	15.4	7.7	281.2
2	水分亏缺(DEF)	0.3	0	0.3	0.5	0	1.6	0	0	0	2.1	0	0	4.8
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	20	0	94.6	143.2	27.7	0	0	0	285.6
	径流(RO)	3.8	1.9	1	0.5	10.3	5.1	47.3	95.3	61.5	30.7	15.4	7.7	280.4
3	水分亏缺(DEF)	1.9	0	1.8	2.5	0	8.4	0	0	0	10.9	0	0	25.5
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	24.8	0	101.4	143.2	27.7	0	0	0	297.2
	径流(RO)	3.9	1.9	1	0.5	12.7	6.3	50.7	97	62.3	31.2	15.6	7.8	290.8
4	水分亏缺(DEF)	2.2	0	2.1	2.8	0	9.6	0	0	0	12.3	0	0	29.1
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	25.7	0	102.6	143.2	27.7	0	0	0	299.3
	径流(RO)	3.9	2	1	0.5	13.1	6.5	51.3	97.3	62.5	31.2	15.6	7.8	292.7
5	水分亏缺(DEF)	0.2	0	0.2	0.3	0	1.1	0	0	0	1.4	0	0	3.3
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	19.7	0	94.1	143.2	27.7	0	0	0	284.7
	径流(RO)	3.8	1.9	1	0.5	10.1	5	47.1	95.1	61.4	30.7	15.4	7.7	279.7
6	水分亏缺(DEF)	0.2	0	0.2	0.2	0	0.8	0	0	0	1.1	0	0	2.5
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	19.5	0	93.8	143.2	27.7	0	0	0	284.3
	径流(RO)	3.8	1.9	1	0.5	10	5	46.9	95.1	61.4	30.7	15.3	7.7	279.3
7	水分亏缺(DEF)	3.2	0	3	3.9	0	13.3	0	0	0	16.8	0	0	40.2
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	28.6	0	106.4	143.2	27.7	0	0	0	305.9
	径流(RO)	3.9	2	1	0.5	14.5	7.3	53.2	98.2	63	31.5	15.7	7.9	298.6
8	水分亏缺(DEF)	4	0	3.8	4.6	0	16.4	0	0	0	20.2	0	0	49.1
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	31.1	0	109.4	143.2	27.7	0	0	0	311.5
	径流(RO)	4	2	1	0.5	15.8	7.9	54.7	99	63.3	31.7	15.8	7.9	303.6
9	水分亏缺(DEF)	0.3	0	0.3	0.4	0	1.3	0	0	0	1.7	0	0	3.9
	水分剩余(SUR)	0	0	0	0	19.8	0	94.3	143.2	27.7	0	0	0	285.1
	径流(RO)	3.8	1.9	1	0.5	10.2	5.1	47.2	95.2	61.5	30.7	15.4	7.7	280

注:各序号包括的土地利用—土壤质地类型为:1.农用地—砂壤土;草地—砂壤土;未利用地—砂壤土(AWC=150);2.农用地—黏壤土(AWC=200);3.建设用地—砂壤土(AWC=30);4.建设用地—黏壤土(AWC=25);5.密林—砂壤土(AWC=300);6.密林—黏壤土(AWC=400);7.水域—砂壤土(AWC=15);8.水域—黏壤土(AWC=10);9.草地—黏壤土;未利用地—黏壤土;疏林—砂壤土;疏林—黏壤土(AWC=250)。

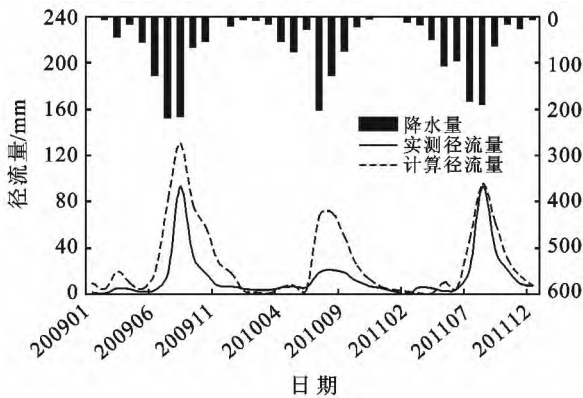


图 3 T—M 模型计算径流量与实测径流的比较

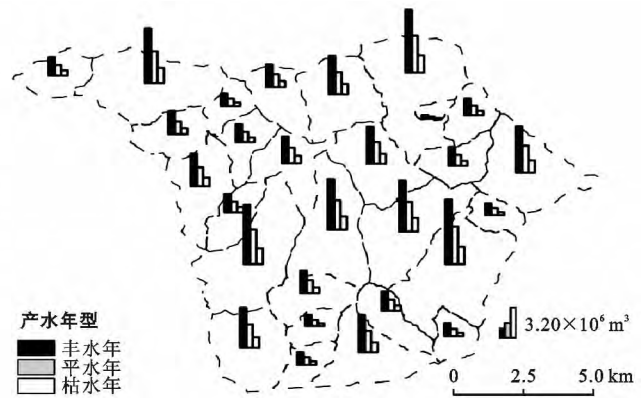


图 4 研究区产流能力分布及集水流域年产水量

3 结论

(1) 本文通过 T—M 水量平衡方法, 计算了各月的土壤储水量、实际蒸散、水分亏缺、水分剩余和径流量, 2011 年该流域在 1, 3—4, 6 和 10 月, 存在 DEF 及土壤水分利用, 面积加权的年度 DEF 为 5.8 mm; 2, 11—12 月降水对土壤水分进行补给; 5, 7—9 月存在 SUR, 年度 SUR 值为 286.2 mm。全年降雨产生地表径流量 281.0 mm, 产水量为 $5.10 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

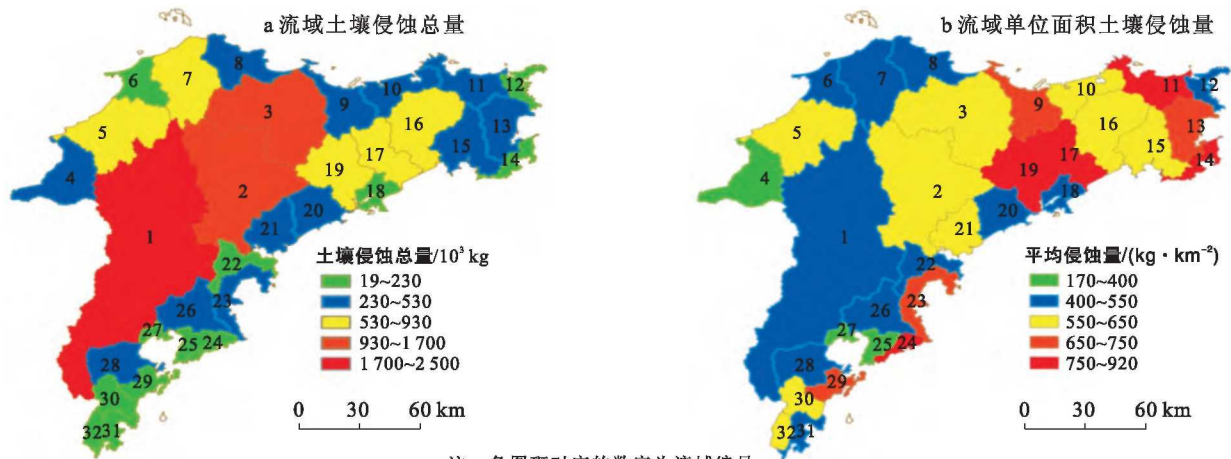
(2) 研究区在丰水年(25%)的 2, 7—11 月, 平水年(50%)的 2—3, 7—9 月和枯水年(75%)的 12—2, 7—9 月存在水分剩余。丰水年、平水年及枯水年多年平均产水量分别为 8.30×10^7 , 4.80×10^7 及 $2.20 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

通过分析流域的水量平衡, 能够得到该流域水资源盈缺的周期特征, 为水资源管理和农业灌溉提供依据。

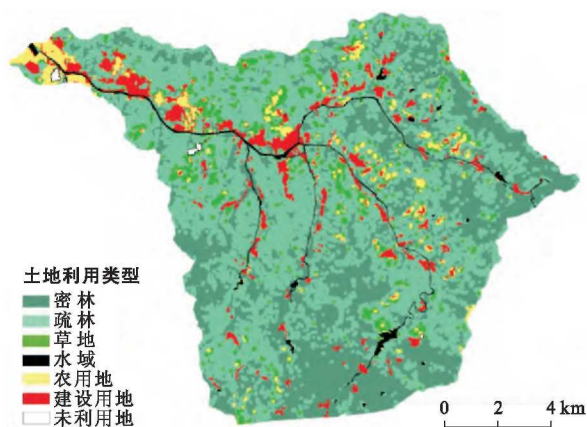
本文所用的研究方法适用于那些有相同地形条件及缺乏水文资料的区域。济南市已对锦阳川流域进行开发, 布设了水库等工程设施来集蓄地表径流, 该文对各集水子流域分别进行了产流计算, 可进一步计算水库的复蓄系数, 并结合水权分配进行农业水资源优化配置。在地形条件相似且未开发的流域, 可结合 T—M 水量平衡法进行农用雨水集蓄工程的选址。但该模型未能反映植被覆盖等影响产流水平的因素, 因此, 如何表征植被覆盖对降雨—径流关系的影响仍需深入研究。

[参 考 文 献]

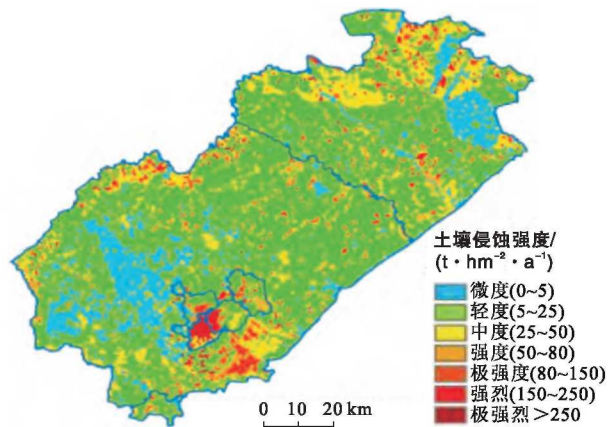
- [1] 陈艳萍, 吴凤平, 周晔. 基于二维判别的初始水权配置方案的和谐性诊断[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 125-131.
- [2] 张永军, 曾维华, 路娴, 等. 三维图示模型在流域水资源地域冲突分析中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 966-971.
- [3] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905-915.
- [4] 汪恕诚. 解决水资源短缺的根本出路[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(4): 1-2.
- [5] 雷川华, 吴运卿. 我国水资源现状、问题与对策研究[J]. 节水灌溉, 2007(4): 41-43.
- [6] 冯凤玲, 成杰民, 杨圣军. 济南市水安全问题成因分析及防治对策[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 57-60.
- [7] 肖洪浪, 赵文智, 冯起, 等. 中国内陆河流域尺度的水资源利用率提高研究: 黑河流域水—生态—经济管理试验示范[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 381-384.
- [8] 王红雷, 王秀茹, 王希. 利用 SCS-CN 方法估算流域可收集雨水资源量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 86-91.
- [9] 王中根, 郑红星, 刘昌明, 等. 基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟(I): 模型的原理与结构[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 501-505.
- [10] 郑红星, 王中根, 刘昌明, 等. 基于 GIS/RS 的流域水文过程分布式模拟(II): 模型的校验与应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 506-510.
- [11] 张俊娥, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 基于 Modcycle 分布式水文模型的区域产流规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 65-71.
- [12] Zelalem L. Groundwater potential assessment of Gumara river catchment, North west Ethiopia[D]. Addis Ababa: Addis Ababa University, 2009.
- [13] Taheri A, Zare M. Groundwater artificial recharge assessment in Kangavar Basin: A semi-arid region in the western part of Iran[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(18): 4370-4384.
- [14] Yadahalli G S, Guled M B. Effect of physico-chemical modification of soil through set furrow amendments on crop productivity, soil fertility and water balance in pearl millet/sorghum based cropping systems[D]. University of Agricultural Sciences, Dharwad, 2008.
- [15] 毛学森, 王新元. 根据气象资料估算土壤有效含水量的方法[J]. 生态农业研究, 1995, 3(2): 83-86.
- [16] Bakundukize C, Van Camp M, Walraevens K. Estimation of groundwater recharge in Bugesera region (Burundi) using soil moisture budget approach[J]. Geologica Belgica, 2011, 14(1/2): 85-102.
- [17] Thornthwaite C W, Mather J R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance[M]. Laboratory of Climatology, Drexel Inst., New Jersey, USA, 1957.
- [18] Jasrotia A S, Majhi A, Singh S. Water balance approach for rainwater harvesting using remote sensing and GIS techniques, Jammu Himalaya, India [J]. Water Resources Management, 2009, 23(14): 3035-3055.
- [19] Singh J P, Singh D, Litoria P K. Selection of suitable sites for water harvesting structures in Soankhad watershed, Punjab using remote sensing and geographical information system (RS&GIS) approach: A case study[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2009, 37(1): 21-35.



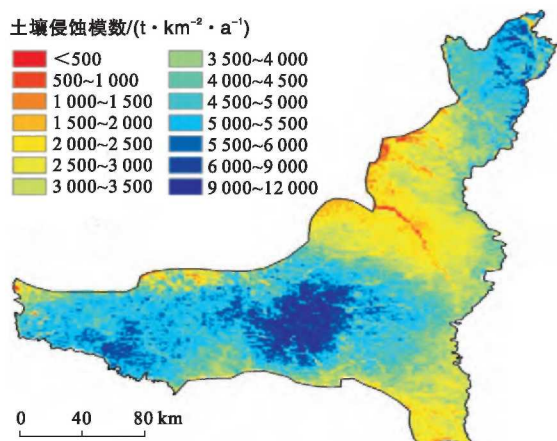
附图9 胶东半岛不同流域土壤侵蚀量空间分布(190页)



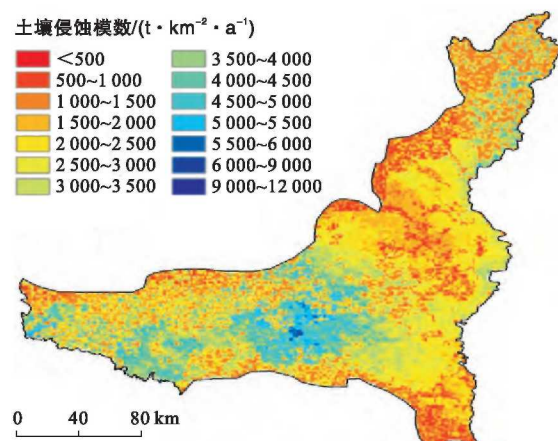
附图10 山东省济南市锦阳川流域土地利用类型(195页)



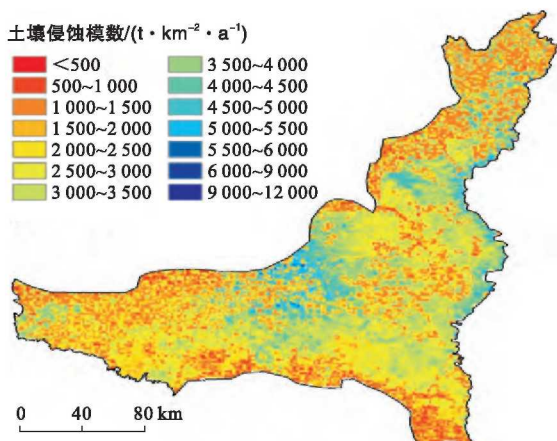
附图11 辽宁省阜新市土壤侵蚀强度分级(202页)



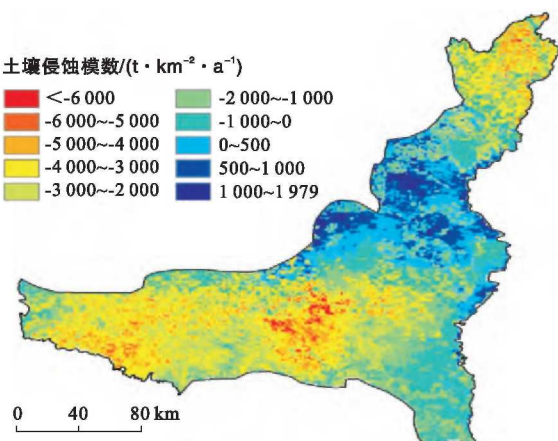
附图12 2000年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图13 2007年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图14 2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数(222页)



附图15 2000—2012年陕北黄土高原退耕还林区土壤侵蚀模数差值示意图(222页)