

清水河上游流域可收集雨水资源量估算与检验

郭晓楠, 王秀茹, 刘兰妹

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 以北京市西部山区典型流域——清水河上游流域为例, 采用地理信息系统(GIS)和 SCS(Soil Conservation Service)相结合的方法, 估算了该流域不同土地利用类型在不同水文年 6—8 月可收集雨水资源量; 并选取 2008—2009 年 6—8 月 10 场降雨的实测径流量数据, 与 SCS—CN 模型计算的径流量进行误差分析, 用来检验 SCS—CN 模型的精确度。结果表明: (1) 研究区枯水年($p=75\%$), 平水年($p=50\%$), 丰水年($p=25\%$)6—8 月可收集雨水资源量分别为 7.16×10^7 , 1.04×10^8 , 5.71×10^7 m^3 , 占全年的平均百分比为 82.43%; (2) 不同土地利用类型在平水年 6—8 月可收集雨水资源量占总量百分比分别为: 草地和林地占 86.13%, 耕地和园地占 4.87%, 工矿仓储用地、住宅等其他土地利用类型占 9%; (3) 利用 SCS—CN 模型计算径流值与实测值相比, 合格率达到 90%。

关键词: 雨水资源量; 地理信息系统(GIS); 径流

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)05-0208-05

中图分类号: TV213.9

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.045

Estimating and Testing on Collectable Rainwater in Watersheds of Upper Stream of Qingshui River

GUO Xiao-nan, WANG Xiu-ru, LIU Lan-mei

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

Abstract: Taking upstream watershed of Qingshui river as an example, the typical watershed in western mountainous area of Beijing City, Geographic Information System(GIS) and SCS (Soil Conservation Service) were used to estimate the collectable rainwater resource of different land-use types from June to August in different hydrological frequency years, which are dry year, normal year, and wet year. In addition, the SCS—CN computed runoff data and the observed data which were selected from 10 times rainfall during June to August in 2008—2009, were used to analyze the errors and to test the accuracy of SCS—CN. The results showed that: (1) The collectable rainwater resource calculated from June to August in different hydrological frequency years were 7.16×10^7 m^3 , 10.36×10^7 m^3 and 5.71×10^7 m^3 , respectively, accounted for the average percentage of 82.43%; (2) The percentage which rainwater resource of different land-use type collected from June to August in normal year were as following: lawn and woodland accounted for 86.13%, farmland and garden plot accounted for 4.87%, industrial and mining warehouse land, residential and other land use types accounted for 9%, respectively; (3) Comparing the computed runoff data with observed data, the acceptability was 90%.

Keywords: rainwater resource; geographic information systems(GIS); runoff

雨水收集利用工程是干旱、半干旱地区生态建设和农业生产的迫切需要, 随着其应用和研究的不断深入, 将会产生巨大的生态、经济和社会效益^[1]。目前, 中国农村和城市修建了各式各样的雨水收集利用工程, 但是却没有收到很好的集雨效果, 出现了部分集雨设施无水可集和部分集雨设施经常溢流的情况, 究其主要原因是没有准确计算出该集水点可收集雨

水资源量及其空间分布特征。SCS 模型^[2-6]又称为曲线数值法(curve number method), 是美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service, SCS)于 1954 年开发研制的分布式流域水文模型。由于其结构简单, 所需参数少, 对观测数据要求不严格, 模拟精度高等特点而被广泛应用。国内外学者将 SCS 模型应用到流域雨水集蓄利用进行研究取得了一定成果^[7-12], 主

收稿日期: 2013-08-18

修回日期: 2013-09-11

资助项目: 市水务局专项资金“北京市门头沟流域治理”(YSLY20111016)

作者简介: 郭晓楠(1987—), 女(汉族), 河北省石家庄市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持、水文及水资源。E-mail: littlepondGXN@163.com。
通信作者: 王秀茹(1957—), 女(汉族), 河北省保定市人, 博士, 教授, 主要从事流域管理、水文及水资源研究。E-mail: wang-xr@163.com。

要包括研究出定量计算流域可收集雨水资源量的方法,确定雨水资源分布以及雨水集蓄利用工程布设点的方法。但是,关于空间和时间分布对雨水资源量影响的研究却很少。

鉴于此,笔者以门头沟清水河上游流域为研究对象,将 GIS 和 SCS 相结合对该流域不同土地利用类型 6—8 月可收集雨水资源量进行估算和分析,并对结果进行检验,以期为该地区雨水资源开发及工程规划提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于北京西部的清水河流域上游,总面积 357.36 km²;地理坐标为 115°49′30″—115°56′37″E, 39°58′32″—40°4′16″N。清水镇地貌类型为山区,气候类型为中纬度大陆性季风气候,年平均气温 11.7℃,平水年降雨量($p=50\%$)528.7 mm,丰水年($p=25\%$)690.0 mm,枯水年($p=75\%$)386.7 mm。全年降水量 80%集中于 6—8 月,常以降雨形式出现;土地利用方式以有林地、灌木林地、草地及农耕地为主;土壤为山地棕壤、山地草甸土、林溶褐土及石灰性褐土,土壤质地主要为砂土、壤土及黏壤土。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

(1) 遥感数据包括清水河流域 Landsat-7slc-off 卫星 TM 影像(卫星:LANDSAT7;条带号:125,行编号:27;2010 年)和数字高程模型(DEM)数据(中心纬度:E115°,N39°;空间分辨率:30 m,2009 年),数据来源:<http://datamirror.csdb.cn>。

(2) 土壤数据包括门头沟区 1:25 000 土壤类型和土壤质地图(比例尺 1:50 000)来源于北京市土肥工作站,2010 年 6 月。

(3) 气象数据包括流域气象站连续 20 a(1990—2010 年)的气象资料(月平均降水量、月平均蒸发量等),来源于北京市门头沟气象局。

(4) 1:10 000 地形图,来源于北京市门头沟区水务局。

2.2 径流观测

2.2.1 径流小区布设 本文根据土地利用类型设置 11 个标准径流小区,每个径流小区面积为 20 m×5 m,设置上、中、下 3 个土壤含水量观测点,观测土壤中的体积含水量,底部设径流桶,控制观测一次降雨之后的径流量和泥沙含量。小区围埂高 30 cm,埋深 40 cm,厚 5 cm,砖砌水泥抹面,内直外斜,防止顶部雨滴溅入区内^[13-14]。

2.2.2 观测方法

(1) 降雨量的测定。

在径流小区布设自记雨量计记录降雨过程,计算出降雨量 $P(\text{mm})$ 。

(2) 径流量的测定。

在径流小区的下部修建蓄水池,测量径流小区的径流量 $V(\text{m}^3/\text{km}^2)$ 。

2.3 数据处理与计算

2.3.1 流域可收集雨水资源量概念 将流域划分为若干子集水区,分别计算不同下垫面特征(如土地利用、土壤及坡度)下子集水区的年径流量(年降水量×径流系数),然后累加所有子集水区的年径流量,即为流域可收集雨水资源量^[15]。

$$W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=a}^b Q_{ij} \times A_{ij} \quad (1)$$

式中: W ——流域可收集雨水资源量(m^3); A_{ij} ——各集水区面积(m^2); Q_{ij} ——对应各集水区的年径流量(mm); N ——集水区个数,由于子集水区为不规则形; i, j, a, b —— $1 \sim N$ 中间的变量,且 $a < b$ 。

2.3.2 SCS-CN 模型 SCS-CN 模型是当前应用广泛的计算流域地表产流模型,美国 SCS 模型通过分析大量实测资料,得出降雨—径流基本关系为:

$$F/S = Q/(P - I_a) \quad (2)$$

式中: F ——实际后损(mm); S ——流域当时的最大可能滞留量(mm); Q ——径流量(mm); P ——降雨总量(mm); I_a ——初损(mm)。又有次降雨后,流域的水量平衡方程:

$$P = I_a + F + Q \quad (3)$$

根据(2)式和(3)式可以得出 SCS 模型的产流计算公式为:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{P + S - I_a} & (P \geq I_a) \\ Q = 0 & (P < I_a) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{其中: } S = \frac{25400}{CN} - 254, I_a = 0.25S$$

由公式(4)可以看出,当 $P < 0.2S$ 时,地表不产生径流,当 $P \geq 0.2S$ 时,地表产生径流。参数 CN 是反应降雨前流域特征的一个综合参数,与前期湿润状况 AMC(antecedent moisture class)、坡度、土壤类型、土地利用方式 4 个因子有关,但是根据相关文献^[15-16]对坡度的修正结果表示,坡度对该地区径流的 CN 值无明显影响,因此本文忽略坡度因子对 CN 值的影响。只考虑其他 3 个因子对 CN 值的影响。AMC II 情况下的 CN 值可以通过查 SCS 模型的前期土壤湿润程度表、土壤分类表和美国国家工程手册第 4 章列出 CN 值查算表获得参数值,理论取值范围为 0~100^[17];结合研究区实际情况,该文 CN 值取值

范围为 25~84。在 AMC I 或 AMC III 情况下,可根据公式(5),(6)换算其 CN 值,与 CN 参数有关的 3 个因子处理结果如下。

$$CN_1 = 4.2CN_2 / (10 - 0.058CN_2) \quad (5)$$

$$CN_3 = 23CN_2 / (10 + 0.13CN_2) \quad (6)$$

2.3.3 计算土地利用信息 为了提高土地利用特征信息,要对 Landsat 卫星影像进行处理,得到矢量数据格式的土地利用现状数据,共分为 11 类,总面积 357.36 km²,各地类面积及占总面积的百分比见表 1。对遥感影像处理后得到土地利用现状图(附图 1)。

2.3.4 计算土壤信息 将土壤类型栅格图在 GIS 软件平台下配准校正后矢量化,得到研究区土壤类型面积数据,SCS—CN 模型根据土壤最小下渗率及土壤质地,将水文土壤组(HSG)分为 A,B,C,D 这 4 种

类型,研究区土壤质地主要是轻壤土,依据渗透特征及质地确定水文土壤类型划分(表 2,附图 2)。

表 1 北京清水河流域上游土地利用现状

土地利用类型	面积/km ²	比例/%
耕地	3.35	0.90
园地	9.30	2.60
有林地	101.98	28.54
灌木林地	151.53	42.40
其他林地	34.64	9.69
草地	25.21	7.05
天然牧草地	11.86	3.32
工矿仓储用地	2.50	0.70
住宅用地	2.46	0.69
水域及水利设施用地	0.01	0.02
其他土地	14.52	4.06

表 2 水文土壤组与研究区土壤类型

类型	水文土壤组(HSG)类型及特征		土壤类型
	最小下渗率/(mm·h ⁻¹)	土壤质地	
A	7.28~11.43	砂黏壤土	山地棕壤
B	3.81~7.28	壤土、粉砂壤土	生草棕壤、石灰性褐土
C	1.27~3.81	砂土、砂质壤土、壤质砂土	山地草甸土、林溶褐土
D	0~1.27	砂黏土、黏壤土等	普通褐土

2.3.5 土壤湿润程度划分 SCS—CN 模型将土壤湿润程度划分为 3 级,分别代表干旱(AMC I)、平均(AMC II)及湿润(AMC III)3 种状态(antecedent moisture class, AMC);在实际应用时,一般用降雨前 5 d 的降雨量来确定土壤 AMC。在平水年条件下,年降雨量为 528.70 mm,本文研究时间段 6,7,8 月这 3 个月土壤湿润程度为平均(AMC II)状态。

3 结果与分析

3.1 CN 值

CN 值反应径流潜力,在同等的降水条件下,CN 值越小表示地表截留水分的能力越大,CN 值越大表示地表截留水分的能力越小。AMC I,AMC II 状态下的 CN 值根据美国国家工程手册第 4 章的 CN 值查算表及相关研究成果^[18]得出(表 3)。在相同的前期土壤湿润程度(如 AMC II)下:同一土地利用类型,不同土壤的 CN 值不同,A 类土壤 CN 值最小,D 类土壤的 CN 值最大,这是因为不同土壤的最小下渗率和质地不同;同一土壤类型(A 类)下,不同的土地利用类型 CN 值也不同,林地最小,草地次之,住宅用地的 CN 值最小,这是因为不同土地利用类型对土壤的利用和破坏程度不同,导致 CN 值不同。

3.2 可收集雨水资源量计算与检验

将研究区土壤、土地利用数据层利用叠置(Over-

lay)分析中的求交(Intersect)工具进行分析,生成土壤—土地利用数据层,该数据层同时包含了土壤、土地利用信息,结合前期土壤湿润程度确定不同下垫面特征的 CN 值,运用 SCS—CN 模型计算不同水文年下的径流量。 $Q_{平水年}$, $Q_{丰水年}$, $Q_{枯水年}$ 分别代表不同土地利用和土壤类型下对应的年径流量,结合 GIS 技术,按照可收集雨水资源量的概念,计算流域 6—8 月和全年可收集雨水资源量。

为了检验 GIS 和 SCS 相结合计算流域可收集雨水资源量方法的精度,该文选取了 2008—2009 年 6—8 月的 10 场降雨的实测径流量,与 SCS—CN 模型计算的径流量进行误差分析。从表 4 可以看出,与实测结果相比,计算结果有 9 场达到合格要求,总体合格率为 90%。一般认为,应用 SCS 模型进行径流模拟时,计算径流量与实测径流量的相对误差在 15% 以内为合格,反之为不合格^[19],此次实验结果符合要求。综上所述可以认为 GIS 和 SCS 相结合估算出的雨水资源量具有较高的精度。

3.3 可收集雨水资源量时间分布分析

平水年($p=50%$)6—8 月可收集雨水资源量占全年($8.7 \times 10^7 \text{ m}^3$)的 82.30%,丰水年($p=25%$)占全年($1.26 \times 10^8 \text{ m}^3$)的 82.22%,枯水年($p=75%$)占全年($6.90 \times 10^7 \text{ m}^3$)的 82.75%。由此可以看出,该流域每年 6—8 月仅 3 个月的可收集雨水资源量就平均占全

年的 82.43%,而其他月份可收集的雨水资源量很少,所占比例不到全年的 20%,这与北京地区降雨时间分布呈正相关,北京处于中国半干旱区,为典型的暖

温带半湿润大陆性季风气候,降水季节分配很不均匀,全年降雨的 80%分布于夏季 6,7,8 这 3 个月,因此应重视 6—8 月的雨水资源并布设相应集雨措施。

表 3 北京清水河上游流域 6—8 月 CN 值及其可收集雨水资源量

土地利用	水文土壤组(HSG)	子集水区面积/km ²	CN 值 (AMC II)	年径流量 Q/mm			可收集雨水资源量/10 ⁴ m ³		
				平水年	丰水年	枯水年	平水年	丰水年	枯水年
耕地	A	0.16	62	220	323	173	3.45	5.06	2.71
	B	0.23	70	253	360	203	5.70	8.11	4.57
	C	2.50	78	581	801	476	71.03	98.50	57.99
	D	0.46	81	592	813	487	13.66	18.77	11.22
园地	A	1.71	64	229	333	180	39.20	57.02	30.92
	B	1.44	68	245	351	195	35.30	50.58	28.14
	C	5.91	82	298	408	245	174.05	241.47	144.87
	D	0.23	82	298	408	245	6.81	9.34	5.60
有林地	A	82.80	25	43	93	25	358.18	770.29	205.63
	B	3.34	40	119	200	85	39.77	66.65	28.63
	C	15.51	55	190	288	146	294.85	446.48	225.90
	D	0.33	70	253	298	203	8.26	11.75	6.62
灌木林地	A	36.44	57	199	298	153	724.81	1 086.81	559.28
	B	20.55	71	257	364	206	527.81	748.53	424.07
	C	90.60	82	298	408	245	2 697.31	3 699.72	2219.58
	D	3.93	86	312	423	258	122.54	166.33	101.61
其他林地	A	12.97	45	144	231	105	186.25	299.62	136.50
	B	2.90	66	237	342	188	68.67	99.12	54.46
	C	17.22	83	301	412	248	518.62	709.45	427.60
	D	1.55	83	301	412	248	46.68	63.86	38.49
草地	A	0.70	49	163	255	122	11.42	17.89	8.54
	B	1.46	69	249	355	199	36.41	51.99	29.11
	C	8.06	84	305	416	252	245.62	335.11	202.91
	D	3.12	84	305	416	252	95.02	129.64	78.49
天然牧草地	A	6.87	49	163	255	122	111.66	174.86	83.48
	B	2.56	69	249	355	199	63.63	90.85	50.86
	C	2.44	84	305	416	252	74.41	101.52	61.47
工矿仓储用地	A	0.63	62	220	323	173	13.88	20.35	10.88
	B	0.05	71	257	364	206	1.19	1.69	0.96
	C	1.40	80	291	401	238	40.58	55.97	33.26
	D	0.43	83	301	412	248	12.93	17.69	10.66
住宅用地	A	0.32	84	305	416	252	9.60	13.10	7.93
	B	0.28	84	305	416	252	8.41	11.47	6.95
	C	1.69	84	305	416	252	51.40	70.13	42.47
	D	0.18	84	305	416	252	5.41	7.38	4.47
水域及水利设施用地	—	0.01	83	301	412	248	0.31	0.43	0.26
其他土地	A	4.59	83	301	412	248	138.24	189.11	113.98
	B	3.68	83	301	412	248	111.0	151.85	91.52
	C	6.22	83	301	412	248	187.33	256.26	154.45
	D	0.02	83	301	412	248	0.71	0.97	0.59
合计		357.36					7 162	10 356	5 708

表 4 研究区计算径流量与实测径流量误差分析

降雨时间	径流量/mm		相对 误差/%	绝对 误差/mm	是否 合格
	降雨量/ mm	实测 计算			
20080615	53	23.7 25.3	6.75	1.6	合格
20080627	80	47.5 43.2	-9.05	4.3	合格
20080721	75	43.1 40.7	-5.57	2.4	合格
20080730	41	10.6 9.6	-9.43	1.0	合格
20080809	36	4.6 4.1	-10.87	0.5	合格
20090619	36	7.1 7.9	11.27	0.8	合格
20090629	26	3.2 4.3	34.38	1.1	不合格
20090715	91	48.4 49.2	1.65	0.8	合格
20090807	62	24.6 26.3	6.91	1.9	合格
20090816	76	46.2 44.4	-1.73	0.8	合格

3.4 可收集雨水资源量空间分布分析

研究区 6—8 月可收集雨水资源量平水年为 $7.16 \times 10^7 \text{ m}^3$, 丰水年为 $1.04 \times 10^8 \text{ m}^3$, 枯水年为 $5.71 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。不同土地利用类型的可收集雨水资源量有较大差异。由表 1 和表 3 可知, 耕地和园地占总面积的 3.50%, 平水年可收集雨水资源量为 $3.49 \times 10^6 \text{ m}^3$, 仅占总量的 4.87%, 原因是耕种使土壤质量下降, 土壤板结, 不利于下渗, 使地表产汇流加大。草地(包括天然牧草地), 林地(有林地、灌木林地和其他林地) 占总面积的 91%, 平水年可收集雨水资源量为 $7.56 \times 10^7 \text{ m}^3$, 占总量的 86.13%, 大部分地面坡度大于 15° , 易形成有效坡面径流; 工矿仓储用地、住宅用地、水域、其他用地占总面积的 5.5%, 平水年可收集雨水资源量为 $6.45 \times 10^6 \text{ m}^3$, 占总量的 9%。由以上分析可知应对该流域草地、林地修建集水措施, 拦蓄地表径流, 用于农田灌溉和道路绿化灌溉。

4 结论

GIS 和 SCS 模型结合, 可以定量地计算出流域径流及可收集雨水资源量。可以在北京山区林地、草地上布设集雨措施重点收集 6—8 月可收集雨水资源量。本研究结果可应用于无水文资料的流域产流量的估算及地表径流的研究。对北京以及华北地区雨水集蓄利用工程的选址等相关设计有很强的指导借鉴意义, 可为雨水利用工程的规划与设计提供科学依据。

本文计算出的径流量和可收集雨水资源量是基于流域多年平均降水量而计算得出的, 仅具有气候意义的概念。但是在实际情况下, 对于某一确定的流域, 流域的径流量不仅仅与下垫面状况、降水量有关, 还与降雨强度和降雨的年际变化有关, 但是根据相关文献[20—21]可知, 径流量与下垫面和降雨量有很强的相关性, 与降雨强度和降雨的年际变化相关性要弱

很多, 可以忽略不计, 所以本文只考虑了下垫面条件和降雨量对径流量和可收集雨水资源量的影响。

本文所用的 CN 值是在参考相关文献和美国工程手册的基础上确定的, 仅适用于某一特定的研究区域, 如果换做其他研究区域, 则不一定适用, 所以建立全国性质的 CN 值基础数据库是非常有必要的, 也是未来关于 CN 值研究的重点。

[参 考 文 献]

- [1] 牛文全, 吴普特, 冯浩, 等. 区域雨水资源化潜力计算方法与利用规划评价[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 40-44.
- [2] Cosh M H, Jackson T J, Bindlish R, et al. Watershed scale temporal and spatial stability of soil moisture and its role in validating satellite estimates [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 427-435.
- [3] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1996, 1(1): 145-148.
- [4] Michel C, Vazken A, Perrin C. Soil conservation service curve number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure [J]. Water Resources Research, 2005, 41(2): 1-6.
- [5] 刘家福, 蒋卫国, 占文凤, 等. SCS 模型及其研究进展[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 120-123.
- [6] Abdel-shafy H I, EL-saharty A A, Egelsberger M. et al. Rainwater in Egypt: quantity, distribution and harvesting [J]. Mediterranean Marine Science, 2010, 11(2): 245-257.
- [7] Yusof K W, Serwan M, Baban J. Identifying optimum sites for locating reservoirs employing remotely sensed data and geographical information systems [C] // Proceeding of 21st Asian Conference on Remote Sensing, Taiwan, 2000: 40-46.
- [8] Stuebe M, Johnston D M. Runoff volume estimation using GIS techniques [J]. Water Resources Bulletin, 1990, 26(4): 611-620.
- [9] Mishra S K, Tyagi J V, Singh V P. et al. SCS—CN-based modeling of sediment yield [J]. Hydrol, 2006, 324(5): 301-322.
- [10] 徐秋宁, 马孝义, 安梦雄, 等. SCS 模型在小型集水区降雨径流计算中的应用[J]. 西南农业大学学报, 2002, 24(2): 97-101.
- [11] 郑畅, 倪九派, 魏朝富. 基于 DEM 和 SCS 模型的四川盆地丘陵区局地径流研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 73-77.
- [12] 李常斌, 秦将为, 李金标. 计算 CN 值及其在黄土高原典型流域降雨—径流模拟中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(8): 67-70.

(下转第 217 页)

提高森林生态系统水源涵养功能;扩大水源涵养林面积,种植适合当地自然环境且水源涵养能力大的植被,注重在植被水源涵养潜力最大的地区扩大森林面积覆盖度,最大限度地截流天然降水,改善提高森林生态系统水源涵养能力。

In-VEST 模型水源涵养模块是基于水量平衡法的一种水源涵养研究法,包含产水模块和水源涵养模块 2 个子模块。In-VEST 模型综合考虑气候、植被、地形、土壤等多种因素对水源涵养功能的影响,充分考虑区域各地理空间要素对森林生态系统水源涵养的影响。研究结果表明,利用 In-VEST 模型水源涵养模块能较好地评估汉江上游秦巴山地地区水源涵养功能,对区域森林水源涵养功能进行评估,并比较不同森林景观类型及区域水源涵养功能差异,为区域森林资源保护及合理开发提供依据。

[参 考 文 献]

- [1] 李文华. 生态系统服务研究是生态系统评估的核心[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 4.
- [2] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [3] 姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 34-36
- [4] 高成德, 余新晓. 水源涵养林研究综述[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 78-81.
- [5] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. 资源科学, 2002, 24(6): 68-73.
- [6] 康艳. 秦岭山地植被水源涵养功能空间分布格局及生态保育策略[D]. 西安: 西北大学, 2005.
- [7] 李思悦, 刘文治, 顾胜. 南水北调中线水源地汉江上游流域主要生态环境问题及对策[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(3): 275-280.
- [8] 赵红莉, 陈宁, 蒋云钟, 等. 汉江上游水资源时空演变及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 90-94.
- [9] 胡芳. 南水北调中线陕西段水源区水质保护与生态补偿研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [10] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化的遥感时空信息研究[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [11] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 In-VEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估[J]. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [12] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于 In-VEST 模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 183-189.
- [13] Boumans R, Costanza R, Farley J, et al. Modeling the dynamics of the integrated earth system and the value of global ecosystem services using the GUMBO model [J]. Ecological Economics, 2002, 41(2): 529-560.
- [14] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, et al. In-VEST 2.1 Beta User's Guide: Integrated valuation of ecosystem services and Tradeoffs[M]. Natural Capital Project Stanford, 2011: 260.
- [15] 白杨, 郑华, 庄长伟, 等. 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 711-717.
- [16] 秦嘉励, 杨万勤, 张健. 岷江上游典型生态系统水源涵养量及价值评估[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(4): 453-458.
- [17] 刘晓清, 张振文, 沈炳岗. 秦岭生态功能区森林水源涵养功能的经济价值估算[J]. 水土保持通报, 2010, 32(1): 177-180.
- [18] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [19] Hewlett J D. Prime Piles of Forest Hydrology[M]. Athens, GA: University of Georgia Press, 1982.

(上接第 212 页)

- [13] 郭晓军, 王道杰, 庄建琦. SCS 模型在干热河谷区坡面产流中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(5): 14-18.
- [14] 蔡新广. 石匣小流域水土保持措施蓄水保土效益试验研究[J]. 资源科学, 2004, 26(S): 144-149.
- [15] 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.
- [16] 王红雷, 王秀茹, 王希. 采用 SCS 水文模型和 GIS 确定雨水集蓄工程的位置[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 108-114.
- [17] 张美华, 王晓燕, 秦福来. SCS 模型在密云石匣试验区降雨径流量估算中的应用[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2004, 25(专辑): 155-158.
- [18] 周翠宁, 任树梅, 闫美俊. 曲线数值法(SCS 模型)在北京温榆河流域降雨—径流关系中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 87-90.
- [19] 周淑梅, 雷廷武. 黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS-CN 方法初损率取值研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4240-4247.
- [20] 郭庆荣, 张秉刚, 钟继洪, 等. 丘陵赤红壤降雨入渗产流模型及其变化特征[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 61-65.
- [21] 刘培娟, 赵增丽, 邢燕, 等. 鲁中南降雨因子对不同种植下坡耕地产流产沙影响的灰色关联分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(31): 19415-19418.