

基于 In-VEST 模型的汉江上游森林生态系统 水源涵养服务功能研究

王纪伟, 刘康, 瓮耐义

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 生态系统服务功能及变化是生态系统评估的核心, 是生态学、环境经济学等领域的研究热点。汉江上游秦巴山地是中国重要的水源涵养和供给功能区。近年来, 受自然与人为双重驱动因子影响, 森林生态系统出现退化现象, 水源涵养及供给能力受到一定影响。以汉江上游流域森林景观为研究对象, 运用 In-VEST 模型水源涵养模块对其水源涵养功能进行动态变化分析。结果表明, 汉江上游森林生态系统水源涵养总量为 $1.21 \times 10^{14} \text{ m}^3$, 最大涵养水源深度为 362.51 mm, 平均水源涵养深度为 80.69 mm。在各森林景观中, 常绿阔叶林水源涵养量最大, 乔木园地最小。在空间上, 南北秦巴山地地区水源涵养量较大, 水源涵养服务功能明显。

关键词: 森林生态系统; 水源涵养; In-VEST 模型; 汉江上游

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0213-05

中图分类号: X826

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.046

Research on Water Conservation Service Function of Forest Ecological System in Upstream of Hanjiang River Based on In-VEST Model

WANG Ji-wei, LIU Kang, WENG Nai-yi

(College of Urban and Environmental Science, Northwestern University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Ecosystem service function is the core of ecosystem evaluation and research hotspot of ecology/environmental economics. Qinling—Bashan Mountains which lies to the upstream of the Hanjiang River is one of the important water supplying and conserving area for China. In recent years, the degradation of forest ecosystem and the capacity of water supplying and conserving in the area have been restricted by both of the natural and human being factors. The dynamic changes of water conservation founction in the Upper Hanjiang River were analyzed by making use of In-VEST model. The results showed that the amount of water conservation of forest ecosystem in the upstream of Hanjiang River was $120.79 \times 10^{14} \text{ m}^3$ meters, The maximum depth of water conservation was 362.51 millimetres, the average depth of water conservation was 80.69 millimetre. The water conservation evergreen broad-leaved forest was the largest compared with other forest landscape, and the tree garden was the least. From the perspective of space, the amount of water conservation in north and south of Qinling—Bashan Mountains area was larger, and water conservation function was obvious.

Keywords: forest ecological system; water conservation function; In-VEST model; upstream of Hanjiang River

生态系统服务研究是生态系统评估的核心^[1-2], 水源涵养功能是生态系统重要服务功能之一, 森林生态系统水源涵养是生态系统服务功能的重要组成部分^[3]。随着全球水资源需求不断增加和水环境急剧恶化, 森林水源涵养作用已引起高度重视^[4-5]。目前国外对森林水源涵养研究方法主要有水量平衡核算

法、降水存储法、多因子回归法等^[3], 运用森林—植被—降水复合模型及线性方程等计算森林水源涵养量。现有研究对有关流域水文、流域内森林空间分布特征及其他地理要素的时间空异质性及其对水源涵养及流域水文的影响考虑不足。

汉江上游地区森林面积广阔, 植被类型复杂多

收稿日期: 2013-11-01

修回日期: 2013-12-02

资助项目: 西北大学研究生自主创新基金项目“陕西省生态系统服务功能研究”(YZZ12005); 全国生态十年变化遥感调查与评估项目“陕西省生态环境十年(2000—2010年)变化遥感调查与评估”(STSN-05-27)

作者简介: 王纪伟(1986—), 男(汉族), 河北省唐山市人, 硕士研究生, 研究方向为生态规划与生态环境评价。E-mail: wjw6578@163.com。

通信作者: 刘康(1963—), 男(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士, 教授, 主要从事区域生态评价与规划, 植被地理, 景观生态学等研究。E-mail: liuk63@126.com。

样,为国家生态区划中的水源涵养功能区,同时也是南水北调的主要水源涵养区及产流区,因此,作为下游库区水源的汉江上游流域森林生态系统,水源涵养功能的发挥对水源涵养、水土保持及保证南水北调中线工程水源区的水质和水量具有重要意义^[6]。并且秦巴山地地区属于流水侵蚀剥蚀的中低山地,山高坡陡,土薄石多,水土流失较为严重,森林又承担着保持水土,减少河道淤积的作用。

本研究在野外实地调查与模型分析的基础上,利用 In-VEST 模型中的水源涵养模块及生态经济学价值量评估方法对汉江上游各森林生态系统水源涵养功能进行价值估算,以期为区域保护、利用和开发水资源提供基础数据。

1 研究区域概况

汉江是长江最大支流,发源于陕西省宁强县大安镇蟠冢山^[7-8],东南流经陕西省汉中市、安康市,于安康白河县流入湖北省,注入丹江口水库,其干流全长 1 577 km,流域面积约为 $1.159 \times 10^8 \text{ km}^2$ 。丹江口以上陕西省境内(图 1),其地理坐标为: $31^\circ 09' - 34^\circ 52' \text{ N}$; $105^\circ 28' - 111^\circ 34' \text{ E}$,长 652 km,占汉江上游全河段的 43.1%,陕西境内流域面积 $6.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占汉江全流域的 39.18%,多年平均径流量为 $4.11 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[9]。上游流域地处秦巴山区及汉中盆地、安康盆地地区,秦巴山地植被条件独特,受人类干扰强度较小,原生天然林面积广大,构成暖温带含常绿阔叶成分的落叶阔叶林棕壤景色,且垂直分布明显。

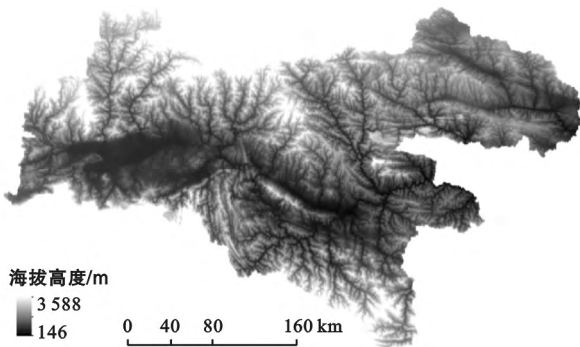


图 1 汉江上游地区地形

秦岭南坡分布有常绿阔叶混交林带、柞木林带、冷杉林带、落叶松林等森林生态系统;巴山山地北坡垂直带谱明显,山势陡峭,多岩溶地貌,构成北亚热带常绿阔叶混交林生态系统^[10]。汉中盆地、安康盆地以农田生态系统为环境本底,受人类活动干扰强度大,这一地区原生森林面积较小,多数为人工林或次生林。该区域属北亚热带季气候的温暖半湿润气候

区,多年平均降水量为 653~1 183 mm,其中 5—10 月占全年降雨量的 80%。年均气温 $12 \sim 18 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2 数据来源及处理

2.1 数据来源

本研究所需的主要数据包括土地覆盖数据、土壤数据、地形数据、气候数据、蒸散发数据等。

土地覆盖及植被覆盖数据(空间分辨率 25 m)来源于中国科学院寒区旱区研究所西部数据库的 Landsat TM(2010 年)数据,根据刘纪远等^[10]提出的中国土地利用/土地覆被遥感分类系统对土地利用类型进行分类,获取所需森林生态系统面积及空间分布;数字高程模型(DEM, 1:5 万)数据源于国家测绘局;气候数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)日值、月值数据(1952—2010 年);地表蒸散发数据是采用 ET-Watch 模型计算所得,然后利用 ArcGIS 10 进行多年平均和空间插值处理,空间分辨率为 1 km;1:5 万数字化土壤图来自中国科学院土壤所全国第二次普查数据结果。

2.2 数据处理

首先对所获得遥感影像图数据进行辐射校正及几何校正^[11],对影像数据进行拼接及裁切处理,然后进行遥感数据土地覆盖分类信息提取,应用 ENVI 4.8 软件平台,根据中国生态系统类型分类体系,采用基于面向对象的分类方法对遥感影像分类解译,分 I 级为 7 类,II 级为 30 类,并从中提取 II 级森林生态系统,分为人工林地、常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶灌木林、落叶阔叶林、落叶针叶林 7 类,总面积为 $6.23 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (附图 3),其中落叶阔叶林面积为 $4.04 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占总面积的 64.82%,落叶针叶林面积最小,仅为 $1 349.01 \text{ hm}^2$,占总面积的 0.02%。将研究区域划分为共 138 346 个斑块。落叶阔叶灌木林斑块数最多,占总斑块数的 41.21%,其次为落叶阔叶林,其比例为 31.91%,人工林地斑块个数最少,仅占总面积的 0.02%(表 1)。

表 1 区域森林生态系统格局

代码	森林类型	小斑数	百分比	面积/ hm^2	百分比
1	人工林地	23	0.02	1 493.74	0.32
2	常绿阔叶林	1 083	0.78	33 347.54	0.54
3	常绿针叶林	2 562	1.85	26 577.98	0.43
4	落叶阔叶灌木林	57 008	41.21	1 662 280.76	26.68
5	落叶阔叶林	44 146	31.91	4 038 569.29	64.82
6	落叶针叶林	44	0.03	1 349.01	0.02
7	针阔混交林	33 480	24.20	466 382.10	7.49

利用 ArcGIS 10 软件平台对 1 : 5 万 DEM 进行投影、转换、几何校正及裁切,并进行填挖处理,生成研究区域数字高程栅格图,研究区域海拔高程范围在 146~3 588 m(图 1);降水量为区域水源供给量的主要来源,降水量值及空间分布直接影响森林生态系统水源涵养量,对所获降水数据经过自然邻域法空间差值,空间范围为东经 105°—112°,北纬 31°—34°,裁切得到研究区域降水栅格图用于本模型研究;蒸散发同时受气候和下垫面地表覆被的影响,气候变化通过影响水分供给(降水)和蒸发能力来影响水源涵养大小,蒸散发大小同时与温度、风速密切相关,土地利用/覆被变化会改变地表反照率、局部水汽循环和地表环流,进而影响区域气候,影响实际蒸散量,从而影响水源涵养与供给量^[12]。本文根据研究区域多年均降水量(1952—2010 年)和 2010 年土地覆盖时空变化数据,先采用 ET-Watch 模型计算,然后利用 ArcGIS 10 进行多年平均和空间插值处理,得到区域 1 km 分辨率地表蒸散发数据。

3 研究方法

近年来,许多学者开始通过建立模型来研究生态系统功能及其变化过程,如 GUMBO, In-VEST 模型等^[13-14]。生态系统服务与权衡综合评价模型(the integrate valuation of ecosystem services and tradeoffs tool)是由美国斯坦福大学;大自然保护协会(the nature conservancy, TNC);世界自然基金会(world wild life fund, WWF)和其他一些机构联合开发的生态系统服务功能评估工具^[14]。旨在权衡发展和保护之间的关系,寻求最优自然资源管理和经济发展模式。In-VEST 模型可以有效的应用于决策分析,通过不同利益相关者(如政策制定者、团体和保护组织等)的协商,确定各自需要优先考虑的问题或热点问题^[14]。In-VEST 模型可以评价当前状态和未来情景下生态系统服务的量和价值。模型主要由以下计算方法得到:

$$Y_{xj} = (1 - AET_{xj} / P_x) \times P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} ——森林景观类型 j 中单元格 x 上的年产水量(mm); AET_{xj} ——森林景观类型 j 中单元格 x 上的年实际蒸散量(mm); P_x ——单元格 x 上的年降水量(mm)。下同。

$$AET_{xj} / P_x = (1 + \omega_x + R_{xj}) / [1 + \omega_x + (1 / R_{xj})] \quad (2)$$

式中: R_{xj} ——森林景观类型 j 中单元格 x 上的 Budyko 干燥指数,它定义为潜在蒸散与降水的比; ω_x ——植物年需水量与降水量的比值,它是描述自然气候与土壤性质的参数:

$$\omega_x = Z \times (AWC_x / P_x) \quad (3)$$

式中: AWC_x ——单元格 x 的植物有效含水量(mm);植物有效含水量由土壤质地和土壤有效深度决定,它可以用来确定土壤为植物生长所储蓄和释放的总水量,即评估田间持水量和萎蔫点之间的差值。

$$R_{xj} = (k_{xj} \times ET_{0x}) / P_x \quad (4)$$

式中: ET_{0x} ——单元格 x 潜在蒸散量(mm);它由气候条件决定; k_{xj} ——植被蒸散系数,是不同发育期中作物蒸散量 ET 与潜在蒸散量 ET_{0x} 的比值,由植被类型决定。

In-VEST 模型的产水模块是一种基于水量平衡的估算方法,某栅格单元的降雨量减去实际蒸散发后的水量即为水源供给量,包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量和冠层截留量^[15-16]。

通过运用 In-VEST 模型中的水源涵养模块对汉江上游不同森林类型的水源涵养能力进行计算,并基于研究区内水文站点多年平均蒸散量和多年平均径流量观测数据,采用水量平衡法对结果进行校验^[13],得到该区域各森林生态系统平均涵养深度和最大涵养深度分布图(图 2),各森林生态系统水源涵养量及汉江上游水源涵养总量(表 2)。

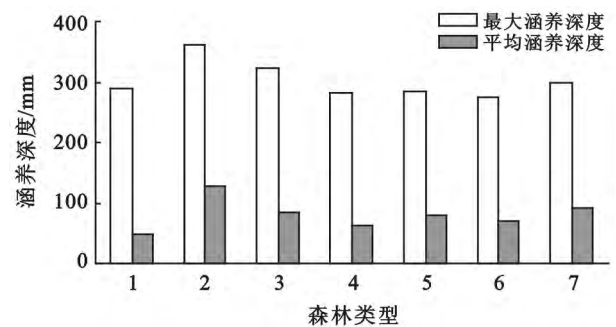


图 2 汉江上游各森林生态系统水源涵养量
注:1 乔木园地; 2 常绿阔叶林; 3 常绿针叶林; 4 落叶阔叶灌木林; 5 落叶阔叶林; 6 落叶针叶林; 7 针阔混交林

表 2 汉江上游各森林生态系统水源涵养量

代码	森林类型	最大涵养深度/mm	平均涵养深度/mm	涵养水源总量/m ³
1	人工林地	288.30	49.02	2.51×10 ⁸
2	常绿阔叶林	362.51	128.35	7.81×10 ⁶
3	常绿针叶林	321.94	83.29	3.83×10 ⁶
4	落叶阔叶灌木林	281.73	61.71	2.49×10 ⁸
5	落叶阔叶林	284.09	80.43	6.79×10 ⁸
6	落叶针叶林	275.16	71.03	1.70×10 ⁵
7	针阔混交林	299.17	91.04	9.51×10 ⁷

4 结果分析

4.1 各森林生态系统水源涵养功能

根据现有资料,结合实地调查,将该区主要森林生态系统类型划分为 7 类,基于 2010 年汉江上游土地覆盖数据,采用 In-VEST 模型中的水源涵养模块,对区域森林生态系统水源涵养功能进行评价和空间模拟,结果见表 2 和图 3。汉江上游森林生态系统水源涵养总量为 $1.04 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中,落叶阔叶林水源涵养总量最高,为 $6.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,其次为落叶阔叶灌木林,为 $2.49 \times 10^8 \text{ m}^3$,落叶针叶林涵养水源总量最低,仅为 $1.70 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。

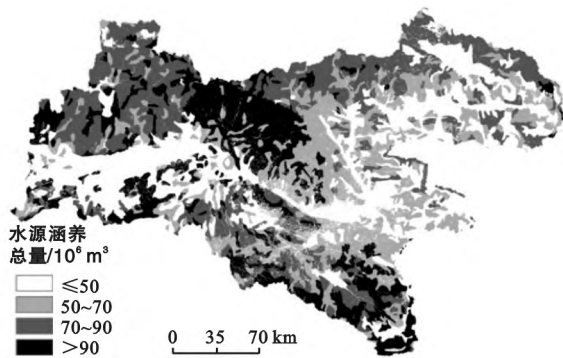


图 3 汉江上游森林水源涵养功能分布

研究区域最大涵养水源深度为 362.51 mm,平均水源涵养深度为 80.69 mm,不同森林景观的水源涵养功能有所差异,在各森林生态系统中,最大涵养深度由高到低依次为:常绿阔叶林>常绿针叶林>针阔混交林>人工林地>落叶阔叶林>落叶阔叶灌木林>落叶针叶林,最大涵养深度依次是 362.51,321.94,299.17,288.30,284.09,281.73 和 275.16 mm;平均涵养深度依次为:常绿阔叶林>针阔混交林>常绿针叶林>落叶阔叶林>落叶针叶林>落叶阔叶灌木林>人工林地。常绿阔叶林最大涵养深度及平均涵养深度均为最高,均高于平均值,分别为 362.51 和 128.35 mm;其次为常绿针叶林,人工林地最小,平均径流深度仅为 49.02 mm。

4.2 森林生态系统水源涵养功能空间分布特征

森林生态系统水源涵养功能与森林植被类型、地形因子、坡度因子及土壤因子密切相关^[17-19]。汉江上游秦巴山地森林生态系统在森林景观类型、地形、土壤上表现出较高的空间异质性。因此,探讨研究区域植被—土壤—坡度复合体的类型与其水源涵养能力之间的关系具有重要意义。

首先将植被型作为汉江上游森林水源涵养功能评估的基本单元,将研究区域分成 7 个研究单元,利

用 ArcGIS 10 地统计分析中趋势分析模块,分析每一类植被—土壤—坡度复合体所具有的水源涵养能力空间分布。

结果表明,汉江上游森林生态系统水源涵养功能空间变化趋势明显,由北向南呈先减后增的变化趋势,形成南北强中间弱的空间分布格局,其中以北部的秦岭山地南坡水源涵养值最高,占研究区域水源涵养总量的 71.26%,该区域以针阔混交林及亚热带常绿针叶林为主,土壤类型为山地棕壤与暗棕壤,土壤层较厚,有利于土壤孔隙度发育;具有良好的土壤结构和通气状况,枯落物较多,大部分坡度大于 15° ,受人为干扰影响较小,平均植被覆盖度在 80%以上,有利于林木生长与涵养水源,从而使汉江上游北部秦岭南坡水源涵养功能高于其他地区。巴山东南部为水源涵养次高值区,该地区年降水量高于研究区域平均值,且海拔较高,森林植被保护较好。

地形因素是影响局地气候的重要环境因子,地形因素通过对区域水热状况的影响来影响气候,进而影响森林植被格局、林下枯落物的积累及土壤层理化性质。因此,森林生态系统水源涵养功能受到了地形因素,特别是海拔高度的影响。根据数字高程模型对海拔高度与森林涵养水源功能进行拟合,结果发现,汉江上游森林水源涵养功能随海拔升高呈先升后降趋势(图 3),即随着海拔的升高,森林水源涵养功能呈逐渐增加趋势,峰值约出现在 2 500~3 000 m,超过 3 000 m 森林水源涵养功能出现减少的趋势。由于北部的秦岭山脉整体海拔高度较高,进一步说明了该研究区水源涵养功能空间分布格局以北部最强。

5 结论

森林生态系统是本研究区的主要生态系统类型,而森林是具有多层次结构的生态系统,其水源涵养量主要来自于土壤贮水、枯落物持水、冠层截留等,林冠截留量及枯落物蓄留量与林分密度、林冠结构、枝叶数量、枝叶表面粗糙程度、林下枯落物厚度及分解状况有关,而不同林分在林冠截流量、枯落物蓄流量、枯落物蓄留量及进入林地土壤的雨水量都存在明显差别,因此导致不同类型森林的水源涵养量之间存在较大差异。

研究表明,区域水源涵养功能既与林种有关,同时与气候、地形存在关联性,气候变化和土地利用变化是影响水源供给服务的主要因素之一。因此,必须实施生态保护和建设工程,特别是秦岭山区高海拔地区的森林生态系统,应重点保护;保护与恢复天然林植被,遏制森林生态系统减少与退化趋势,从而恢复

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. 南水北调中线水源区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.
- [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.

(上接第 212 页)