DOI:10.11705/j. issn. 1672 - 643X. 2015. 02. 17

新安江上游生态系统产水服务及价值

葛菁1,吴楠1,何方2,方降龙1,冯朝阳3

(1. 安徽省环境科学研究院,安徽 合肥 230071; 2. 安徽农业大学 资源与环境学院,安徽 合肥 230036;

3. 中国环境科学研究院,国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

摘 要:为模拟新安江上游下垫面水分存储因素对其实际供水能力的影响,采用降雨和潜在蒸散发及下垫面特征参数,结合耗水量模拟 2010 年新安江上游实际供水量及水资源的能值价值。结果表明:流域为下游贡献汇流量 71.1 × $10^8~\text{m}^3$,总价值达到 29.9 亿元。率水、街源河子流域供水能力较强。中部河谷平原区由于人为耗水过程,原本产水高值区成为实际供水的低值区。模拟产水量精度达 97.0%,适用性较好,但下垫面参数仍需结合实测进一步优化。

关键词:土地覆被;下垫面;水分存储;产水服务;实际供水量;经济价值;新安江上游

中图分类号:X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0090-07

Service and value of water yield of ecosystem in upper reaches of Xin an River

GE Jing¹, WU Nan¹, HE Fang², FANG Xianglong¹, FENG Chaoyang³

(1. Anhui Academy of Environmental Science, Hefei 230071, China; 2. Department of Resource and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to make distributed simulation for the impact of surface water storage factor on the ability of actual water supply in the upper reaches of Xinan river, the paper took the precipitation, potential evaportranspiration, characteristic parameter of underlying surface and combined water consumption to simulate the actual amount of water and its economic value in the upper reaches of Xinan river watershed in 2010. The results showed that actual water supply to downstream is 71.1×10^8 m³ and the total economic value of water resource is 29.9×10^8 Yuan. The ability of water supply in Lushui and Jieyuan River watershed is stronger. The ability of water supply in these subwatersheds is much stronger such as Shuaishui and. Dew to the process of artificial water consumption in the watershed of central river valley, the higher value area of water yield has become the lower value one of water yield. The simulation accuracy of water yield in the upper reaches of Xinan river is 97.0%. The stability and applicability of the model is better, but the parameters of underlying surface need further optimum combining accurate situation.

Key words: land cover; underlying surface; water storage; service of water yield; actual water supply; economic value; upper reaches of Xin'an river

生态系统通过蒸发,植被蒸腾,水汽输送,降水, 地表径流,下渗,地下径流等水循环过程供给陆地各 类生物赖以生存的淡水资源,使其得以饮用和利用, 从而体现出各种以水为介质的生态系统服务。

陆地上的水资源最终都来自于大气降水,从大

气降水到水资源之间,存在各种耗水过程。潜在的水资源是陆地生态系统所有形式产水的总和,等于大气降水除去蒸散和渗漏后所有的液态和固态水^[1]。若忽略流域边界地下水的渗漏,虽然植被蒸散发耗水对于陆地生态系统产水服务来说,是一种

收稿日期:2014-10-20; 修回日期:2014-11-20

基金项目:安徽省省级环保科研计划项目(2011-001(1)号;2012-006号);"十二五"农村领域国家科技计划项目 (2012BAJ21B07-02)

作者简介:葛菁(1981-),女,安徽黄山人,硕士,工程师,主要从事生态规划与生态评价研究。

通讯作者:冯朝阳(1979-),男,山东临沂人,博士,副研究员,主要从事生态系统服务研究。

负的贡献,但正负抵消,对于一个尚未被人类充分开发、改造的水文系统(自然闭合流域),人类的日常生产生活用水及动植物生长需水主要来自于本地区自然生态系统的产水(water yield)。

新安江水系发达、支流众多。主源率水在屯溪与支流横江汇合后至歙县浦口汇练江经街口入浙江省境内。下游是浙江重要的饮用水源地,也是我国长三角的战略备用水源——千岛湖。由于千岛湖入湖水量中有60%以上来自安徽,上游来水水量和水质对千岛湖水环境安全起决定性的作用。2007年,国家发改委、财政部、环保总局等国家有关部委将新安江流域列为全国首个跨省流域生态补偿机制建设试点。后又以跨省界的街口断面水质作为唯一考核指标,与年度补偿资金量挂钩,开展了两省生态补偿的实际运作[2]。

考虑到流域出口的水质与水量在年时间尺度上存在密切相关性,并且下游的决策者和民众更多的关心上游产水和供水能力的变化将会对新安江电站的发电效益和千岛湖优质的水量产生怎样的影响。从补偿规则的完备性和公平性来说,引入水量作为辅助指标,开展水量补偿试点可能会逐步提上议程^[3]。同时,在"最严格的水资源管理制度"背景下^[4],区域的用水总量、用水效率控制将严守"红线",对新安江上游实际的供水量进行科学考核,也具有一定的示范意义。

闭合流域下垫面的水分存储因素对其实际供水能力影响显著。新安江上游的决策者关注本区域内土地覆被结构的改变,供水能力将如何响应。为了科学、有效的评估新安江上游陆地生态系统产水服务的物质量和价值量,协调服务提供者和受益者的利益关系,本研究构建了基于土地覆被(Land Cover,LC)的流域内每个栅格像元(cell)对于出口断面(pour point)实际总供水量(realized water supply)及其经济价值贡献的评估模型,并以2010年数据在新安江上游(安徽省境内)进行了应用研究。相关结果对该跨省流域生态补偿和生态交易机制的完善以及上游综合生态系统管理(Integrated Ecosystem Management,IEM)提供一定的参考。

1 研究区概况

安徽省内新安江流域(文中称:新安江上游)地 跨黄山、宣城2市,东南以天目山、白际山脉为界与 浙江省毗邻,西南部与江西省鄱阳湖水系接壤,北以 长江、新安江分水岭为界。新安江上游属副热带季 风湿润气候,四季分明,雨量充沛,湿润温暖,日照较少,小气候特点显著。上游河道全长 242.3 km,流域面积 5 865 km²。境内地形复杂,是一个"八山一水半分田,半分道路和庄园"的中低山丘陵区。植被以马尾松等常绿针叶林为主,森林覆盖率为77.4%,呈东疏西密的特点。

上游水系发育、支流众多,主要一级支流有率水、横江、练江等,大洲源河、昌源河、棉溪河和街源河直接入千岛湖。5-7月份丰水期的降雨量占全年的52%,洪水暴涨暴落,洪峰持续时间短,但在一年中出现多次,每一次洪水过程时多在3~5d。汛期与降水量一致,其水量要占年总量的65%。枯水期为9月至翌年3月。枯水季节上游的水量在安徽全省亦属最大的河流之一。屯溪水文站建站以来的实测资料中,均未见断流(除1978年沿河逐段筑坝抽水灌溉而人为形成断流外)。全年有一半的天数日平均流量在15~60 m³/s 之间。这在全省各条河流中绝无仅有,反映出新安江上游自然生态系统极高的水源涵养、调节径流能力。

但随着全球气候变化,新安江上游近年来出现了干旱化趋势。降雨的时空分布不均,导致季节性缺水率达80%。同时,整个上游至今尚无大型生态用水调蓄工程,枯水期大部分干支流地表水径流量锐减。

2 研究方法及数据来源

2.1 生态系统年产水量的模拟

产水量的评估模型基于生态系统水循环过程的"水量平衡"和"能量平衡"原理,参考刘克岩等^[5]提出的 Budyko 经验拟合曲线,由不同 LC 类型的下垫面特征参数进行模拟。根据水资源统计资料获得流域每种 LC 单位面积年耗水量,相减得到流域内每个栅格像元对于其出口断面实际年总供水量。价值量则采用能值理论和方法来测算。以 ArcGIS9.2 作为界面和控制平台,采用栅格数据形式,进行模型的构建。评估技术流程参见图1。

在宏观尺度(空间上为流域或区域尺度,时间尺度为一年或多年尺度)上,研究水文循环及其控制因素的变异性,表现为流域范围内的每个栅格像元产水量遵循"水量平衡"和"能量平衡"原理。若忽略流域地下水的补给和土壤蓄水变量,只关注其年降雨量(输入)和年实际蒸散发量(输出),取两者差值即为生态系统年实际产水量。采用下式进行计算:

$$Y_{xj} = P_x - AET_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right)P_x \tag{1}$$

式中: Y_{xj} 为像元 x 上的 j 种 LC 类型的年产水量, mm/a; P_x 为像元 x 上的年降雨量, mm/a; AET_{xj} 为像元 x 上的 j 种 LC 的年实际蒸散发量, mm/a。

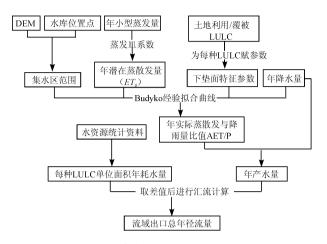


图 1 生态系统产水服务能力评估技术流程

区域(流域)实际蒸散量(E)是受大气、土壤和 植被等环境因子影响的复杂过程, Budyko 在 1958 年指出陆地表面的蒸发量主要受降水量(P)和热 量(用潜在蒸发能力 E_0 表示)的影响。极端干燥条 件下,全部降水将消耗于蒸发, $E/P \rightarrow 1$, $E_0/P \rightarrow \infty$ 。 当年降水量很大,辐射平衡余热全部用于蒸发耗热, $E \rightarrow E_0$, $E_0/P \rightarrow 0$ 。一般地区的实际情况则在这两种 极端情况之间变化。Schreiber、Budyko、Pike 等先后 通过建立一系列降水和热辐射平衡间的经验模型, 来估算区域蒸散量,缺点是没有考虑下垫面特征因 素影响,可能会产生严重误差。Milly 认为区域实际 蒸散量决定于降水和潜在蒸发能力,这个过程受到 下垫面水分存储因素影响。傅抱璞利用量纲分析和 微分方程理论确定并推导了相关计算数学模型,并 考察了中国的山地、平原以及盆地等不同地貌区与 地形、植被、土壤及降水性质有关的参数确定方法。

为了探讨不同植被类型及其变化对流域多年平均水量平衡的影响,Zhang Lu 等^[5]对全球29 个国家257 个流域(面积 1~60 万 km²,以研究径流对植被变化响应的对比流域和单个流域为主)的不同植被条件下的流域平均水量平衡进行了比较,获取了模型下垫面参数ω的适用值及对不同植被类型代表的意义,可以用来估算区域(流域)尺度植被变化前后的蒸散量及其他水循环要素的变化量。他提出的拟合 Budyko 曲线的经验公式为式(2)。该模型参数少,简便且有一定精度:

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + \frac{1}{R_{xi}}}$$
(2)

式中: R_{xj} 是像元 x 上的 j 种 LC 类型的 Budyko 干燥 度指数(无量纲),被 Budyko 在 1974 年定义为潜在 蒸散发与降雨量的比率。

$$R_{xj} = \frac{ET_{ox}}{P} \tag{3}$$

式中: ET_{0x} 为像元x 上的年潜在蒸散发量, mm/a, 可根据研究流域 LC 的组成结构特点以及数据的可获得状况选择适当的测定、估算方法。

 ω_x 是像元 x 上无量纲的表征宏观植被类型影响下的流域下垫面特征参数。张橹等^[5-6]对世界 257 条流域实测资料进行最小二乘方拟合分析以及国内相关研究表明,随植被种类不同,取值在 $0.1 \sim 2.0$ 之间变化。未利用地的 ω 值,一般小于 0.5。矮草与庄稼为 0.5,森林为 2.0,草场、庄稼与林地混合型为 1.0 左右。为每种 LC 类型赋相应的推荐 ω 参数。

2.2 实际供水量及价值的测算

年汇流至流域出口断面的总水量,由流域生态系统产水量扣除人类生产、生活的耗水量得到。根据评估年份研究流域的水资源统计资料和 LC 数据,得到单位面积每种 LC 类型上评估年份的耗水量,进而得到研究流域耗水量的空间分布特征。

由式(1)模拟得到的流域产水量及上述耗水量图层在 ArcGIS9.2 的栅格计算器(Raster Calculator)中进行相减,并将此结果作为权重图层(weight raster),结合流向数据,利用水文分析工具集(Hydrology Tools)中的汇流量计算工具(Flow Accumulation)计算汇流,得到实际供水量的空间分布数据,查询该栅格图层的最大值即为评估年汇流至流域出口断面的总水量。

鉴于传统的水资源定价方法通常难以考虑水资源的天然循环、能量转换等自然属性,无法客观科学地解释水文循环过程和天然水资源的自身价值。故实际供水量的价值 Value_{water_yield}基于能值理论和方法进行测算^[7]。

将研究区内的降雨作为其水资源的能量来源,根据水资源能量转换过程的概念模型和分析方法,计算研究区雨水化学能与太阳能值,以及实际供水量的化学能、太阳能值转换率、单位太阳能值、单位供水价值等。相关的计算公式为:雨水(实际供水量)化学能=水量×吉布斯自由能×密度;雨水太阳能值=雨水化学能×雨水太阳能值转换率;实际

供水太阳能值转换率 = 雨水太阳能值/实际供水量 化学能;单位供水量太阳能值 = 实际供水太阳能值/ 实际供水量;单位供水价值 = 单位供水太阳能值/能 值货币比率。

2.3 数据来源及前处理

覆盖新安江上游流域范围 1:10 万的 LC 数据来源于全国生态环境 10 年变化(2000-2010)遥感调查与评估数据库,时间为 2010 年。利用遥感影像提取 LC 信息主要通过目视解译。

气象数据来源于中国气象信息中心气象资料室,时相为2010年,数据内容包括全国各个气象站点的编号、经纬度和海拔,以及每个气象站点的年降水量(mm)、年小型蒸发量(mm)。对气象参数以数字高程模型(DEM)作为协变量,采用专业气象插值软件 ANUSPLIN 按年份逐个进行空间插值处理,生成的栅格像元大小设为100m×100m。进而计算获取流域2010年降水及小型蒸散发插值面。小型蒸发量数据通过蒸发皿系数以及水面与陆面蒸发转换系数折算成陆面年均潜在蒸散量(ET₀)^[8]。

DEM 来源于美国国家航空航天局陆面过程分布式数据存档中心(Land Processes Distributed Active Archive Center, LP DAAC)搭载于 Terra 卫星(地球观测系统 EOS 星座的第一颗卫星)的 ASTER 传感器所获得的全球 30m 分辨率 DEM 数据。

根据《2010年安徽省水资源公报》^[9],安徽省境内新安江流域2010年农田灌溉用水3.21亿 m³,林牧渔畜用水0.11亿 m³,工业用水0.97亿 m³,城镇公共用水0.24亿 m³,居民生活用水0.44亿 m³,生态环境用水0.04亿 m³。平均耗水率52.9%。假设农田灌溉耗水发生于农田上,工业、城镇和生活耗水发生于建设用地上,忽略林牧渔畜和生态用水。根据流域的LC数据,得出单位面积农田和建设用地2010年耗水量(参见表1),进而得到上游耗水量的空间分布。

表 1 2010 年新安江上游农田及建设用地单位面积耗水量

类型	面积/km²	单位面积年耗水量/		
		$10^4 (m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$		
农田	944.86	17.98		
建设用地	66.97	130.33		

基于能值理论和方法计算天然水资源经济价值,其中相关参数的选取为:雨水的吉布斯自由能取4.94 J/g(固体物质溶解量为10 ppm);雨水的太阳能值转换率取1.82×10⁴ sej/J;地表水的平均固体

物质溶解量取为 56.9 ppm;研究区域 2010 年能值/货币 比率 取 2008 年全省平均值 2.85万亿美元/sej^[10];人民币汇率取 2010 年全年平均6.83元/美元。由此计算得到新安江上游平均单位水资源价值为 0.42元/m³。涉及到的 GIS 数据均以栅格(raster)形式集成到同一坐标系统下,统一分辨率为 100 m×100 m,在 ArcGIS 9.2 的栅格计算器(Raster Calculator)中进行运算。

3 结果与分析

3.1 生态系统实际蒸散发与产水量

运用公式(1)~(3)模拟了新安江上游2010年平均实际蒸散发量及产水量的空间变异特征(参见图2b、2c)。按照不同LC类型进行分区统计(Zonal Statistics),结果参见表2。2010年流域内各类LC上降水量的差异不大。可能由于一方面盖度较好的林草区具有一定的改善当地小气候的作用,另一方面林草区的海拔相对较高,气温较低,空气达到过饱和的条件较好,使得林草区上平均单位面积降水略大于其它区域。

平均实际蒸散发量变化范围为 14.3 万~52.8 万 m³/(km²·a),森林生态系统最高达到 53.4 万 m³/(km²·a),这是由于森林类覆被的根系通常较低矮覆被(农田、草地或裸地)深,森林根系可以从深层土壤汲取土壤水分用于植被蒸腾。另外森林生态系统的叶面积指数(Leaf Area Index,LAI)较大,因此可以获得更多的冠层净辐射能量用于植被蒸腾[11]。整个新安江上游实际蒸散发总量达到 29.5 亿 m³。由于森林区的单位面积实际蒸散发量较大,加之分布面积最大,使其实际蒸散发总量达到25.0 亿 m³/a,占整个上游的 84.7%。

由于 6 种 LC 类型上平均年降水量差异不显著,使得平均单位面积产水量的变化规律同实际蒸散发量相反,平均产水量变化范围为 124.3~158.5 万 m³/(km²·a),其中建设用地最高达到 158.5 万 m³/(km²·a)。这是由于以不透水为主要特点的建设用地下垫面,降水渗入其土壤的水分很少,极易形成地表径流。林地的产水量最低,达到 124.3 万 m³/(km²·a)。这是由于森林生态系统土壤自由水蓄水容量较大,蓄水能力强,且林冠层和枯落物层具有一定的截留降水能力。新安江上游地区 2010 年产水总量达到 73.7 亿 m³/a,其中由于林地分布面积较大,使得森林生态系统产水量贡献超过 80%,达到 59.0 亿 m³/a。

类型	面积 - 比例/%	降水量		实际蒸散发量		产水量	
		平均值/	总值/	平均值/	总值/	平均值/	→ は / フ ³
		(万 m³·km ⁻²)	亿 m³	(万 m³·km ⁻²)	亿 m³	(万 m³·km ⁻²)	总值/亿 m³
农田	16.11	172.5	16.3	41.2	3.9	131.3	12.4
林地	81.14	177.1	84.3	52.8	25.0	124.3	59.0
草地	0.68	186.1	0.7	44.6	0.2	141.4	0.6
水体	0.92	173.1	0.9	48.7	0.3	124.4	0.7
建设用地	1.14	172.8	1.2	14.3	0.1	158.5	1.1
未利用地	0.02	175.2	0.0	25.4	0.0	149.8	0.0
合计	100.00		103.4		29.5		73.7

表 2 2010 年流域不同 LC 类型降水、实际蒸散发和产水量

3.2 实际供水量及其经济价值

2010 年由流域产水量及耗水量的差值模拟为新安江下游的实际供水量(参见图 2e)达到 71.1 亿 m³/a。基于能值理论和方法计算上游每个栅格实际供水量的经济价值,再按 LC 类型进行分区统计(Zonal Statistics),结果参见表 3。

各种生态系统平均供水贡献量变化范围 28.1 万~149.8 万 m³/km²。尽管建设用地平均单位面积年产水量最高,但其生活及工业用水、耗水量巨大,使其单位面积年实际供水量最低,仅为 28.1 万 m³/km²。

未利用地的植被覆盖条件差,截留降水及土壤蓄水的能力弱,且未有耗水过程,因此其单位面积年实际供水量最大,达到 149.8 万 m³/km²,但由于其分布面积过小,总供水量近似为 0。2010 年模拟为新安江下游贡献汇流量为 71.1 亿 m³。实际供水资源的总经济价值达到 29.9 亿元,各 LC 对其贡献率及平均单位面积价值贡献量大小关系与实际供水量相同,在此不再赘述。

表 3 2010 年流域不同 LC 类型实际供水量及经济价值

	面积	实际供水	:量	供水资源价值	
类 型	比例/	平均值/	总值/	平均值/	总值/
	% ()	$\vec{j} \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	亿 m ³	(万元・km ⁻²)	亿元
农田	16.11	113.3	10.7	47.6	4.5
林地	81.14	124.3	59.0	52.2	24.8
草地	0.68	141.4	0.6	59.4	0.2
水体	0.92	124.4	0.7	52.2	0.3
建设用地	1.14	28.1	0.2	11.8	0.1
未利用地	0.02	149.8	0	62.9	0
合计	100.00		71.1		29.9

3.3 模拟结果的空间变异

评估涉及的年降水量、实际蒸散发量、产水量以及分子流域的平均单位面积产水量的空间变异特征

参见图2。

新安江上游地区降水量的分布总体呈现出西南高、东北低的空间格局。可能是地形的原因,使降水量高值区多分布在南部的白际、天目、五龙山脉和西北部的黄山南坡地区(参见图 2a)。实际蒸散发量的空间分布特征则相对降水较为离散,但仍与其保持着一定的相关性(参见图 2b)。由降水与实际蒸散发的差值可获得产水量,其高值区总体上多位于流域中部的河谷平原区和南部山脉一线(参见图 2c)。

按照子流域界线分区统计(zonal statistics)产水量的平均值,发现低值区都集中在东北部棉溪河、扬之河和昌溪子流域,而西南的率水、街源河和横江子流域平均水资源产生量较大、产水能力较强(参见图2d)。流域中部河谷平原区一带人类活动频繁,作物种植、生产生活耗水过程相对较多,原本产水高值区成为实际供水的低值区(参见图2e)。实际供水量按子流域分区统计平均值(参见图2f),鉴于新安江上游总体水资源较为丰富,人为耗水量相对于其自然产水量仍属较小,因此实际供水量子流域分区的整体高低趋势与产水量差异不大。

3.4 模拟结果验证

模拟 2010 年新安江上游产水总量 73.7 亿 m³。《安徽省水资源公报 2010》^[9]中指出,新安江流域地表水资源量 89.4 亿 m³,地下水资源量 13.41 亿 m³,地下与地表水资源不重复量为 0,因此扣除重复计入的地下水资源量(忽略地下水的补给),实际上游产水量为 76.0 亿 m³,相对误差控制在 3.03%,可见在新安江上游产水量的模拟中得到了较好应用。

4 结 语

以发展作为导向的区域 LC 变化,往往追求其 既定领域产出和短期经济利益的最大化,而其结果

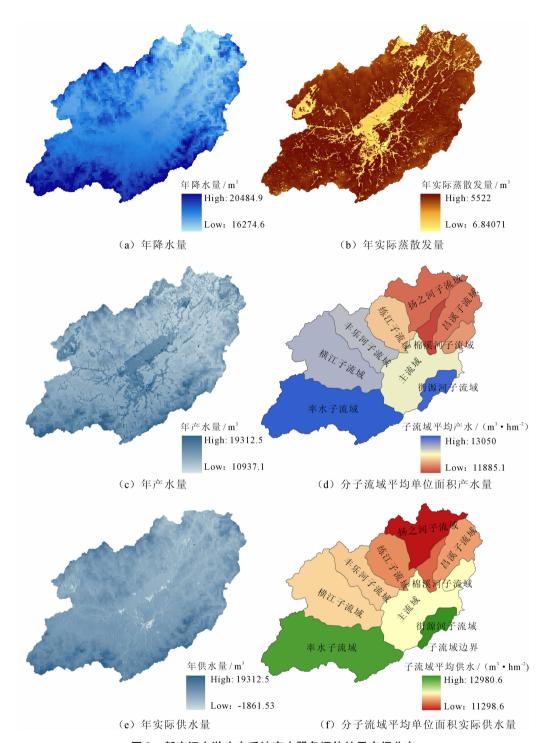


图 2 新安江上游生态系统产水服务评估结果空间分布

却常对生物多样性保育和其他相关生态系统服务产生不可逆转的破坏。作为水源涵养重要生态功能区的新安江上游,在我国首例跨省流域生态补偿项目试点背景下,它所面临的"保护"与"发展"的矛盾日益尖锐。分析该区基于 LC 的产水贡献空间变异以及经济价值,便于决策者识别影响流域出口水量的关键区,加强对这些局部地区的水资源管理和规划。也为当前以两省交界断面水质目标作为唯一指标的

补偿运作方式提供更多的辅助参考。

综上研究,2010 年模型模拟新安江上游产水总量达到73.7 亿 m³/a,精度达97.0%,适用性较好。汇流量71.1 亿 m³,总价值达到29.9 亿元。森林的纵向多层性使其蓄水能力强,单位面积产水贡献量最低,而不透水的建设用地产水量最高。但在考虑耗水过程后,建设用地单位面积的实际供水量反而最低;流域中部河谷平原区一带人类活动频繁,原本

产水高值区成为实际供水的低值区。率水、街源河子流域平均供水能力较强。

需要说明的是,本研究所采用的下垫面特征参数ω仅仅为 Zhang 等人研究的推荐值,是在不同降雨地区对比流域试验结果的基础上概化而来的一般性参数。在新安江上游,地形、地质等其他因素对流域产流的影响可能会很大,所以仍然需要对参数进行区域化的校正处理。本案例研究缺失这一环节,今后需要以特征小流域的实测数据为基础,对参数ω进行修正,以适合新安江上游各种特征 LC,进一步提高产水量的模拟精度。

另外,若单纯对此项生态系统服务过度的强调,则可能会导致其他相关的生态系统调节服务能力的退化或丧失。当流域下垫面全部为无植被覆盖或全部为不透水的硬化地面时,对下游的实际供水量无疑最大。那么,自然植被对产汇流的滞缓集流过程(有利于减小洪峰和形成基流),防止土壤侵蚀、泥沙淤积,维持河道形态和净化水质等调节服务能力的丧失,也必将引发一系列相关环境问题的产生。而通过研究未来 LC 情景下更多相关的调节服务及价值的响应,来权衡综合服务效益,将作为下一步研究重点。

参考文献:

- [1] 周国逸, 黄志宏. 中国大陆面向生态的水资源管理与调控战略[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 435-440.
- [2] 中华人民共和国财政部,中华人民共和国环境保护部.

- 关于印发《新安江流域水环境补偿试点实施方案》的函(财建函[2011]123号)[Z]. 2011-09-26.
- [3] Liu Junwei, Lü Huijin. Economic value of water resources of the upper reaches of the Xin'an river basin, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 87-92.
- [4] 国务院. 关于实行最严格水资源管理制度的意见[EB/OL].[2012-02-16][2014-10-10]http://www.gov.cn/zwgk content_2067664.htm.
- [5] Zhang Lu, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale [J]. Water Resources Research, 2001, 37 (3): 701-708.
- [6] 刘克岩, 张 橹, 张光辉, 等. 人类活动对华北白洋淀流域径流影响的识别研究[J]. 水文, 2007, 27(6): 6-10.
- [7] 吕翠美, 吴泽宁, 胡彩虹. 水资源价值理论研究进展与展望[J]. 长江流域资源与环境,2009, 18(6): 545 549.
- [8] 周振民. 蒸发皿系数 k_p 计算方法研究[J]. 水文, 2003, 23(1): 21-23.
- [9] 安徽省水利厅. 2010 年安徽省水资源公报[EB/OL]. [2012-10-19][2014-10-10] http://guanli.wswj.net/news_file/201210123507349.pdf.
- [10] 李 恒. 安徽省生态经济系统的能值分析与可持续发展研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2011.
- [11] Hundecha Y, Bardossy A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff gerneration of a river basin through parameter regionalization of a watershed model[J]. Journal of Hydrology, 2004, 292(1-4): 281-295.

(上接第89页)

参考文献:

- [1] 张捷斌. 新疆水资源可持续利用的战略对策[J]. 干旱 区地理,2001,24(3):217-222.
- [2] 董新光,姜卉芳,邓铭江. 新疆水资源短缺原因分析 [J]. 新疆农业大学学报,2001,24(1):10-15.
- [3] 张 巍, 蒋军成, 张明广, 等. 城市重大危险源普查与分级 技术探讨[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(4):105-108.
- [4] 张军民. 伊犁河流域地表水资源优势及开发利用潜力研究[J]. 干旱区资源与环境,2005,19(7):142-146.
- [5] 邵 磊. 跨界突发性大气环境风险源分级评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [6] 肖佳媚. 基于 PSR 模型的南麂岛生态系统评价研究 [D]. 厦门:厦门大学,2007.
- [7] 国家环境保护总局. 中华人民共和国地表水环境质量标准[EB/OL]. [2002 04 26] [2014 06 01]. http://wenku. baidu. com/view/a03d26fe770bf78a6529541b. html.

- [8] 国务院国有资产监督管理委员会办公厅. 关于在财务统计工作中执行新的企业规模划分标准的通知[EB/OL]. [2003-11-04][2014-06-01]. http://gzw. jl. gov. cn/fg/200508/t20050826_34256. htm
- [9] 胡二艳. 基于熵权法的水质模糊综合评价[J]. 科技信息,2011(16):373-374.
- [10] 陈 锋,吴壮海,黄宇容. 基于模糊层次分析法的水库移 民安置区优选[J]. 水电能源科学,2014,32(10):135 – 137.
- [11] 王学全,卢琦,李保国. 应用模糊综合评判方法对青海省水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠,2005,25(6):944-949.
- [12] 凌敏华,左其亭. 水质评价的模糊数学方法及其应用研究[J]. 人民黄河,2006,28(1):34-36.
- [13] 陈建春. Visual C⁺⁺开发 GIS 系统:开发实例剖析(第2版)[M]. 北京:电子工业出版社,2004.