

南水北调与水利科技(中英文)

South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology

ISSN 2096-8086,CN 13-1430/TV

《南水北调与水利科技(中英文)》网络首发论文

题目: 水源涵养内涵及估算方法综述
作者: 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 李宗省, 缪驰远, 狄振华, 龚伟
收稿日期: 2021-03-22
网络首发日期: 2021-07-28
引用格式: 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 李宗省, 缪驰远, 狄振华, 龚伟. 水源涵养内涵及估算方法综述. 南水北调与水利科技(中英文).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210728.1026.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

水源涵养内涵及估算方法综述

王云飞¹，叶爱中¹，乔飞²，李宗省³，缪驰远¹，狄振华¹，龚伟¹

(1. 北京师范大学地理科学学部，地表过程与资源生态国家重点实验室，陆地表层系统科学与可持续发展研究院，北京 100875；2. 中国环境科学研究院，北京 100012；3. 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室，兰州 730000)

摘要：水源涵养与生态系统过程和人类生产生活紧密相关，深入研究水源涵养对维持生态系统健康和人类社会可持续发展至关重要，对促进人与水和谐共生具有指导意义。随着对水源涵养研究与应用的深入，水源涵养内涵逐渐丰富，评估方法愈加多样，但以往的研究中水源涵养定义模糊，缺乏对各种评估方法的综合性对比分析，因此急需明确界定水源涵养内涵，分析各种估算方法的适用性。采用文献分析法系统梳理了水源涵养研究历程，将其划分为认识与萌芽期、理论发展期、定量计算阶段和模型综合评估 4 个阶段；从定义、水量与功能 3 个方面明确界定了水源涵养内涵，从原理、时空尺度、适用范围及优缺点方面对已有水源涵养量估算方法进行了对比和分析，并展望了水源涵养研究的未来发展方向。

关键词：水源涵养；定义；功能；计算方法；模型

中图分类号：TV213:P343 **文献标志码：**A

生态系统服务是指人们从生态系统中获取的所有直接和间接收益^[1-2]，与人类福祉和社会可持续性发展紧密相关，近年来在国内外备受关注。当前水环境恶化和气候变暖造成了日益严峻的水资源问题，水资源需求量的增加则加剧了水资源短缺^[3]，与水有关的生态系统服务受到高度重视。由于水是连接各生态系统过程及人类活动的重要纽带，水源涵养在众多生态系统服务中占据中心地位，是表征生态系统状况的关键指标。水源涵养的变化不仅直接影响流域内自然要素状况与生态系统过程^[4]，也会对下游地区的生态系统和水资源产生间接影响，引起新一轮的人水互动协同效应。因此，研究我国生态系统的水源涵养功能，明确不同区域水源涵养功能与生态系统过程和人类活动的关系，识别水源涵养重要区，对当地生态屏障优化，应对气候变化风险及下游地区水资源优化配置具有重要的现实意义，同时对缓解我国水资源问题，发展完善“人-土-水”最优布局，促进区域可持续性发展与生态文明建设具有重要指导意义。

自 20 世纪以来，学者在我国开展了广泛的水源涵养功能研究，为水土综合管理和新时代的全国生态文明建设做出了重要贡献。但不同学者所界定的水源涵养内涵不同，缺乏统一的标准，实际工作中采用的研究方法多样，致使水源涵养量的估算结果往往存在较大差异。因此，本文对水源涵养研究进行梳理与概括总结，阐明水源涵养内涵，分析已有估算方法的有效性与适用性，以规范水源涵养评估过程，为我国水源涵养研究与生态文明建设提供指导。

收稿日期：2021-03-22 修回日期：2021-07-15

基金项目：第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0405）；国家自然科学基金（51879009）

作者简介：王云飞(1998-)，女，山东莒南人，主要从事生态水文学研究。E-mail: yfei2050@163.com

通信作者：叶爱中(1978-)，男，安徽安庆人，教授，博士，主要从事水文集合预报研究。E-mail: azye@bnu.edu.cn

1. 水源涵养研究历程

1.1 认识与萌芽期

人类从农牧时代对水源涵养就有所认识,我国有明确文字记载的水源涵养是清朝梅曾亮 1823 年在《书棚民事》中的记述:“每天雨,从树至叶,从叶至土石,历石罅,滴沥成泉。水缓,故低田受之不为灾,而半月不雨,高田犹受其浸溉。”该文分析了树木水源涵养对降水的截流、洪水消峰、基流增加及灌溉作用,此时人们初步认识到树木的水源涵养作用。水源涵养的研究起源于人们对森林与水关系的认识,可以追溯至 19 世纪。1864 年,德国学者 Ebmayr 在巴伐利亚地区观测林区地表的蒸发,首次探究影响蒸发的因素,1879 年又在奥地利观测森林对降水的截留量^[5]。1900 年,在瑞士 Bernese Emmental 山区开展了两个集水区对比试验,以探究植被对集水区径流量的影响,揭开了试验森林水文学的序幕^[6]。随后,众多国家开展了小流域对比试验,研究有林地和无林地水源涵养的差异^[7-8]。而我国的森林水文研究起步较晚,始于 20 世纪 20 年代,罗德民和李德毅在我国多地开展了森林对径流和水土保持影响的观测研究^[9-10]。美国学者 Kittredge 在 1948 年提出“森林水文学”的概念,推动了森林水文过程的研究,也为森林水源涵养功能的研究奠定了基础^[11]。从 19 世纪初至 20 世纪 50 年代可以看作水源涵养的认识与萌芽阶段,此时水源涵养的概念不明确,主要指森林对径流的影响,研究方法单一,主要利用观测数据来分析森林与水的关系。

1.2 理论发展期

20 世纪 60 年代,美国学者 Bormann 和 Liken 在小集水区范围内研究森林生态系统与水文过程,首次将森林生态系统与水文学研究相结合^[12]。在 70 年代,森林植被对河流水质的影响得到关注,国外开展了森林对改善水质的研究,将净化水质视为水源涵养功能的一种表现形式^[13]。与此同时,森林水文过程的研究得到重视,开展了林冠截留、枯落物持水、土壤蓄水与林地蒸散发等森林水文过程的研究,积累了大量的实测资料,发展了 Rutter^[14]、Gash^[15]林冠截留模型,出现了众多计算枯落物持水量、土壤蓄水量、林地蒸散发量的经验公式,森林水文过程研究的发展丰富了水源涵养研究的理论基础。

20 世纪 60、70 年代可以看作水源涵养研究的理论发展阶段,这一时期在森林水文学领域取得了众多研究成果,对林冠截留、枯落物持水、土壤蓄水等水文过程的认识愈加明确。但是,这一阶段的研究对象仅限于森林生态系统,仍将水源涵养视为森林水文过程的一部分,并未明确界定水源涵养概念^[16]。

1.3 定量计算阶段

20 世纪 80 年代以来,逐渐进入到水源涵养功能的定量评估阶段。早期主要实地测量林区不同作用层的降水截留率、土壤入渗率及蒸散发,在实测数据的基础上计算森林不同作用层的持水量^[17]。1997 年,Constanza 定义了生态系统服务的概念,水源涵养开始作为生态系统的一项服务功能而受到关注^[18]。研究者在实测数据的基础上估算了众多小流域范围内生态系统的水源涵养量及价值^[19-20]。由于学者对水源内涵的理解不同,在实际工作中采取的估算方法多样。典型方法有水量平衡法、降

水贮存法、年径流法、地下径流增长法、林冠截留剩余法、土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法、多元回归法以及影子工程法等。

20世纪80年代至21世纪初可以看作水源涵养研究的缓慢增长期，此时森林生态系统的水源涵养概念逐渐明确，涌现出众多水源涵养估算方法。但水源涵养量的估算主要集中在样地尺度或小流域范围，计算结果受观测数据影响较大，不同计算方法得到的结果相差较大，缺乏可比性。

1.4 模型综合评估阶段

近十余年来，国内外学者逐渐采用模型方法在区域范围内综合评估水源涵养功能，众多水文模型、生态模型广泛应用于水源涵养功能的研究中，如SWAT模型、InVEST模型、元胞自动机模型、SEBS和SCS模型、Terrain Lab模型等。与此同时，水源涵养的尺度问题受到关注，王晓学等^[21]从不同时空尺度探讨了森林水源涵养功能的内涵，界定了不同时空尺度下的水源涵养功能。此外，水源涵养的内涵不断丰富，其研究对象也由单一的森林生态系统向草地^[22-23]、湿地^[24]、都市农业^[25]等其他生态系统扩展。

总的来看，人们对水源涵养的认识处于一个动态发展的过程中（图1）。当前的水源涵养，研究内容更加综合，不仅关注流域内部的生态水文过程（降水截留、蒸散发等），并研究多个水文过程与生态系统产生的综合效应（对降水的影响、调节气温等）；研究对象由森林扩展到其他陆地生态系统，对比不同生态系统水源涵养能力的差异；研究范围进一步扩大，在空间上由样地尺度发展到流域、区域尺度，在时间上研究年、月、日不同时间尺度及不同时间序列下水源涵养功能的动态变化；相应的估算方法更加丰富，特别是采用众多综合模型评估水源涵养功能，对其进行更深层次的量化，同时注重结果的可视化表达，强调流域范围内水源涵养功能的空间差异性。

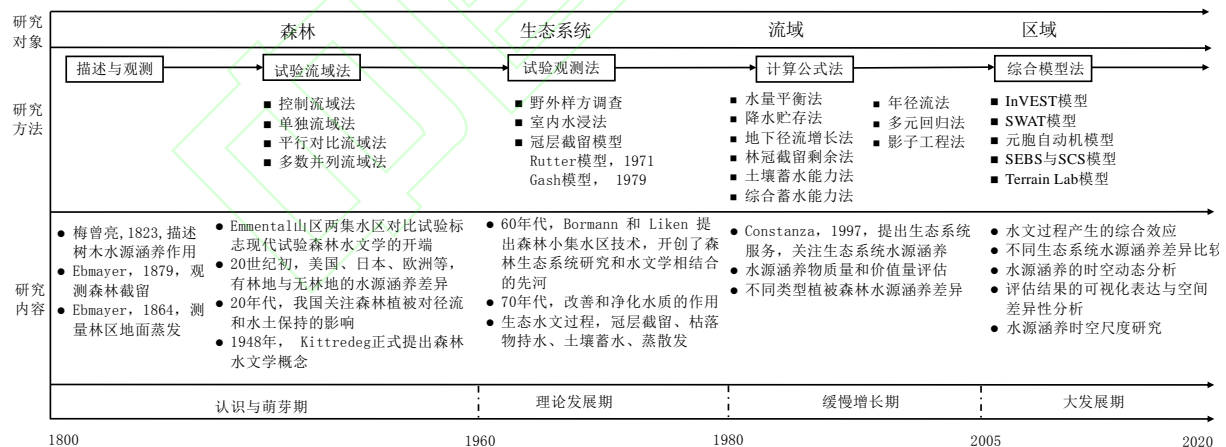


图 1 1823-2020 年水源涵养内涵与计算发展历程

Fig.1 Connotation and calculation development of water retention from 1823 to 2020

2. 水源涵养内涵界定

随着研究的深入，水源涵养内涵逐渐丰富，不同学者的理解不同，尚未形成统一的定义。研究的早期将水源涵养视为森林对河流径流量的影响^[26]。随着森林水文过程研究的逐渐成熟，水源涵养内涵扩展为森林生态系统通过林冠层、枯落物层及土壤层截留和贮存降水，表现出的补充地下水、

调节河川径流等功能^[27-29]。慢慢地，森林对降水的影响、净化水质的作用也视为水源涵养功能。这一时期水源涵养量定义为冠层截留、枯落物持水和土壤蓄水量三者之和，研究对象仅限于森林生态系统。而如今，水源涵养的研究对象由森林生态系统扩展到具备涵养水源能力的区域，水源涵养量定义为某区域在一定时段内收入与支出水量之差^[30-34]。总之，虽然不同学者界定的水源涵养内涵存在一定的重叠与差异，但基本都将水源涵养视为森林或草地、湿地生态系统对降水的截留贮存能力，以及在此过程中体现出的调节径流、水源供给与净化水质等功能。

综上所述，水源涵养可以从功能、对象、水量三个方面界定其内涵。

水源涵养是指在一定时空范围内，生态系统通过林冠层、枯落物层和土壤层、湖泊、水库水体等对降水进行截留、下渗以及贮存等过程，将水分充分保持在系统中的过程和能力，不仅满足系统内部对水源的需求，并且可以向外部及中下游地区提供水资源（图2）。

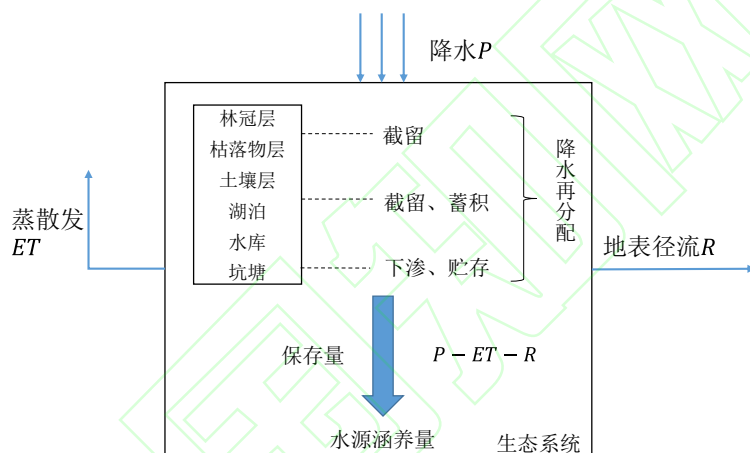


图2 水源涵养过程

Fig.2 Process of water retention

2.1 水源涵养功能

水源涵养功能指生态系统在涵养水源的过程中参与流域水循环，调节水文过程并产生生态效益的能力，对维持生态系统平衡至关重要，同时可提供众多调节和供给服务^[35-36]。作为多时空尺度下生态系统与水文过程综合作用的结果，水源涵养功能涉及的载体、生态水文过程及时间尺度特征众多，而且表现形式多样。从表现形式（表1）来看，水源涵养功能主要有水源供给、调节径流、拦蓄洪水、净化水质、水土保持和调节局地气温等。从水源涵养功能所涉及的载体、过程、表现形式及时间尺度特征来看，可以从狭义和广义的角度进行区分（图3）。狭义的水源涵养功能是指涵养水源过程中森林-草地-土壤所形成的生态系统与水的相互作用，包括拦蓄洪水、调节径流、水源供给等；广义的水源涵养功能则包含了水文过程对局地气候、水土产生的综合影响与生态效益，不仅考虑森林-草地-土壤所形成的生态系统，还加入湖泊-水库-坑塘进行的水源涵养，不仅包括了水源供给、调节径流及拦蓄洪水，还有净化水质、水土保持和调节局地气温等。

表1 水源涵养功能表现形式

Tab.1 Forms of water retention function

功能	解释
水源供给	稳定地提供水量供流域内部使用，多余的水分可提供给中下游地区，补给中下游地区的生态耗水、人类活动用水等
调节径流	水源涵养区可看作天然水库，在雨期储存降水、补充地下水、削减洪峰，在旱季补充河道水量，增加河流径流量
拦蓄洪水	降水事件中，不同作用层截留降水，改变暴雨产流过程，削减洪峰流量，延长洪水时间
净化水质	降水经过生态系统内部的层层截留，发生吸附过滤作用及一些物理化学过程，水质发生明显的改善，净化水质作用在森林中表现的最明显
水土保持	地表植被和枯落物对降雨吸收和缓冲，减缓了降雨对土壤表层的侵蚀和冲刷
调节气温	通过截留、贮存降水以及蒸散发等过程，参与流域水循环，对局地小范围内降雨量、温度和湿度产生影响

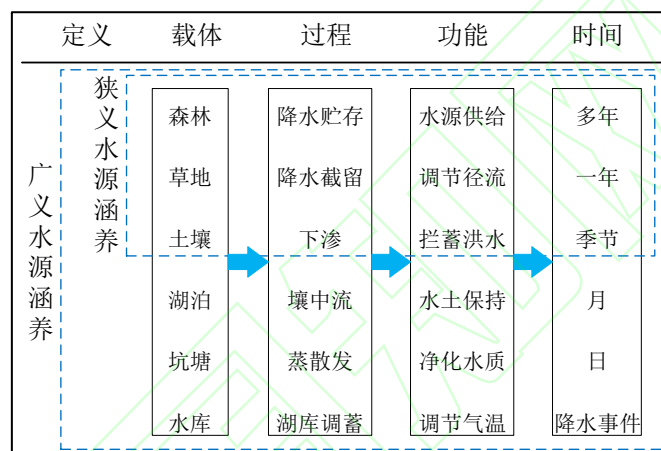


图 3 水源涵养功能界定

Fig.3 Definition of water retention function

2.2 水源涵养量

水源涵养量是指某时段内生态系统存储的水量，其大小常用来评估水源涵养功能，其实质是指生态系统在一定的时空范围与条件下对降水的调蓄能力，即非雨期的蒸发与土壤产流量。在计算水源涵养量时应考虑时间尺度（场次降水、月、年），对于场次降水，其水量是降水减雨期蒸发与产流；对于月、年大时间尺度，其水量是总降水量减雨期蒸发和地表产流。水源涵养量可分为潜在水源涵养量与实际水源涵养量，前者指对生态系统充分供水情况下，生态系统对降水的最大调蓄能力；后者指实际降水与气候条件下，生态系统对降水的实际调蓄能力。潜在水源涵养量是实际水源涵养量的最大值。水源涵养量最小值是 0，出现在不透水地面情况，所有降水均被蒸发和地表产流；水源涵养量最大值是降水量，当地表植被覆盖度足够高或者直接降水到湖泊水库中，降水雨强与雨量达不到地表产流条件，所有降水均被滞蓄在生态系统中。

3. 基于概念模型的水源涵养定量评估方法

水源涵养量评估即定量计算生态系统内存储的水量，与水源涵养内涵相适应。由于学者定义的

水源涵养概念不同及研究区的差异性，实际工作中采取的计算方法多样，主要有水量平衡法、降水贮存法、年径流法、地下径流增长法、林冠层截留剩余法、土壤蓄水能力法、综合蓄水能力法及多元回归法等，每种方法都存在一定的优势、局限性与适用范围（表2）。

上述方法大多从某一个维度来计算水源涵养量，不同方法所表征的水源涵养量有所差别，如土壤蓄水能力法将土壤中贮存的水量视为水源涵养量，综合蓄水能力法将冠层截留量、枯落物持水量和土壤蓄水量三者之和视为水源涵养量，这使得不同方法得到的计算结果可比性差。综合蓄水能力法考虑了不同作用层涵养的水量，与水源涵养内涵较为接近，并且可对比不同作用层对总水源涵养量的贡献，应用范围相对较广^[37-39]。水量平衡法将某区域在一定时段内收入水量与支出水量之差视为水源涵养量，与水源涵养内涵最为匹配，时空尺度适用性较强，是目前应用最广的方法^[29, 40]。聂亿黄^[41]将地表径流量视为水源涵养量，利用水量平衡法估算了青藏高原地区的水源涵养量，结果表明青藏高原地区多年（1982-2003年）平均水源涵养量为 $3.45129 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，东南部水源涵养量大，而西北地区水源涵养能力很弱。龚诗涵等^[4]将降水量与地表径流量及蒸散发量的差视为水源涵养量，利用水量平衡法估算了全国生态系统的水源涵养量。结果表明2010年全国水源涵养总量为12224.33亿 m^3 ，在空间上呈现东南高西北低、由东到西递减的趋势。

表2 水源涵养计算方法

Tab.2 Calculation methods of water retention

序号	方法	解释	公式	优缺点	适用范围	最适尺度		参考文献
						空间	时间	
1	水量平衡法	降水量与蒸散发量之差 ^[43-44]	$W = P - ET$	“黑箱”原理，公式简单，所需经验数据少；结果准确性受蒸散发值的影响较大，该法减去了蒸发中包含的部分水源涵养量，计算值偏小	空间差异较小的区域	所有尺度	所有尺度	肖寒，欧阳志云等，2000；张彪，李文华等，2008
		降水量与蒸散发量及其他消耗水量的差值 ^[45]	$W = P - ET - R$					
2	降水贮存法	由森林蒸散发的历史观测值，确定树冠、树干、树木的蒸腾和扩散占降水量的比例，剩余部分为水源涵养量 ^[46-47]	$W = \beta \times P \times \alpha$	公式简单，所需参数可由观测得到；忽略地表径流，蒸散发占降水比例难以准确计算	部分有经验常数的林区	所有尺度	月	张三焕，赵国柱等，2001；司今，韩鹏等2011
3	年径流法	假设水源涵养量等于林区年径流量，不同土地覆盖类型每年消耗水量相等。水源涵养量为森林覆盖率与年径流量之积 ^[48]	$W = \alpha \times R$	方法简便；未考虑林地与其他土地利用类型蒸散发的差别，计算误差较大	有森林覆盖的区域	流域尺度	年	张彪，李文华等，2009
5	地下径流增长法 ^[49-50]	森林可将地表径流转化为地下径流，有林区地下径流比无林区多。水源涵养量为有林区相比与无林区增加的地下径流量	暂无统一的公式	所需参数较少，并且可由实地观测得到；忽视了林地地上部分的持水量，计算值偏小	有林地	所有尺度	月、年	李金昌等，1999；吴波等，2006
6	林冠层截留剩余法	未被林冠截留而落到地面的水量为水源涵养量，用降雨量与林冠截留率计算 ^[28]	$W = (1 - \phi) \times P$	涉及参数少，计算简单，可行性强；但未考虑地表径流和蒸散发，计算结果略大于实际值	森林覆盖率高的地区	所有尺度	所有尺度	邓坤枚，石培礼等，2002
7	土壤蓄水能力法 ^[20, 51]	涵养的水分贮存在土壤中，水源涵养量为土壤非毛管孔隙度对降水的短期滞蓄量，可用土壤厚度和非毛管孔隙度相乘 ^[10]	$W = 10^4 \times \lambda \times h$	方法简便，便于操作；但仅计算土壤贮存水量，忽略其他层拦蓄的水量和森林消耗水量	森林覆盖地区	所有尺度	所有尺度	马雪华等，1993；刘世荣等，1996；姜志林，1984；刘敏

8	综合蓄水能力法	冠层截留量、枯落物持水量和土壤蓄水量三者之和 ^[37, 38, 52]	$W = I + K + Q$	分别计算林冠层、枯落物层和土壤层的涵养水量，可对比不同作用层的涵养能力；需要较多实测值，忽略森林蒸散发，计算结果是理论上的最大值	降水丰沛的地区	小流域尺度	所有尺度	超，李迪强等，2006 郎奎建，李长胜等2000；Zhan等2008；刘璐璐，曹巍，邵全琴等，2016
9	多元回归法	根据下垫面特征和气象因子，得到计算水源涵养量的多元线性回归模型 ^[53]	暂无统一的公式	充分考虑水源涵养的影响因子，逻辑缜密；但建模需要大量的实测数据，且模型难以推广	获取回归模型的参数地区	流域尺度	月、年	张庆费，周晓峰等1999

注：表中 W 为水源涵养量，mm； P 为降水量，mm； ET 为实际蒸散发量，mm； R 为地表径流量，mm； I 为冠层截留量，mm； K 为枯落物层持水量，mm； Q 为土壤层蓄水量，mm； β 为森林降水贮存量占降水量比率，%； α 为森林覆盖率，%； ϕ 为林冠截留率，%； λ 为土壤非毛管孔隙度，%； h 为土壤厚度，cm。

水源涵养是生态系统与水文过程综合作用的结果，与生态系统类型、气候条件、下垫面性质及人类活动等多种因素有关，是一个复杂的综合性概念^[41-42]，如何在多时空尺度下精确地计算水源涵养量仍然是当下研究的难点与重点。根据本文所界定的水源涵养内涵，水源涵养量应该是降水落到地面后，扣除雨期蒸发与地表产流量均为地表生态系统（包含湖泊水库）的水源涵养量，所以建议采用具有物理机制的水文模型计算水源涵养量。通过水文模型模拟出雨期实际蒸发（ ET_I ）与地表产流量（ Rs ）。水源涵养量 $W = P - Rs - ET_I$ 。非雨期的蒸散发、壤中流及土壤含水量均为水源涵养量的一部分。本文建议采用日尺度分布式水文模型计算水源涵养量，在一场完整的洪水或月、年等长时间尺度上，利用模型直接计算出雨期水源涵养量并在计算时段内求和即是总水源涵养量。

4. 基于动力模型的水源涵养定量评估方法

随着对水源涵养理解的深入，以水文循环过程为理论基础，借助 GIS、RS 和计算机技术，发展了一系列水源涵养综合评估模型。水源涵养评估逐渐由上述传统计算方法发展到基于动力模型的综合评估方法（表3），这些模型能够实现水源涵养功能的动态模拟分析，已成为定量评价水源涵养功能的主要途径。模型可分为两大类，一类是传统的水文模型，以 SWAT 模型为代表，另一类是新兴的生态系统服务评估模型，以 InVEST 模型为代表^[54]。水文模型侧重于水源涵养的驱动因素，更加关注水源涵养过程的模拟；新兴的生态系统服务评估模型，关注最终的生态系统服务及评估结果在景观尺度上的可视化表达。

表3 水源涵养评估模型

Tab.3 Calculation models of water retention

模型	公式	尺度		优缺点	参考文献
		时间	空间		
InVEST	$R = \min\left(1, \frac{249}{V}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{sw}}{300}\right) \times Y$ $Y = \left(1 - \frac{AET}{P}\right) \cdot P$	年	30m-10km 的网格单元；流域	可视化、动态性强；但输入数据多，只能模拟年平均水源涵养量	Richard Sharp, 2018; 余新晓, 2012
SWAT	$Q_1 = \sum_{i=1}^n (P_i - ET_i - SURQ_{ij}) \cdot A_i$	日，月，年	水文响应单元；流域	物理机制强，水文过程模拟准确，时间分辨率为日，时间步长；模型参数的不	Jha, Manoj, 2012; 林峰, 2020

元胞自动机模型	$Q_2 = \sum_{i=1}^m W_{(t+1)i} + D_{(t+1)} \bar{E} \cdot n_i \cdot \Delta t$	降水事件	水文响应单元; 元胞单元	确定性大, 校正困难 提供尺度上推的方法; 模型只适用于降水季节 (7-8月份)	王晓学, 李叙勇等, 2010
SEBS 与 SCS 模型	$R = P - ET - Q$ $E_{\text{daily}} = 8.64 \times 10^7 \Lambda \times \frac{R_n}{\lambda \rho_w}$ $Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, P \geq 0.2S$	年	区域	蒸散发和地表径流计算准确; 未考虑损失的地下径流, 结果偏大	聂忆黄, 2010; 张海波, 2012
Terrain Lab	暂无统一的公式	日	网格单元; 流域	考虑植被-土壤系统垂直方向的差异性, 水文参数计算准确; 实际应用中需进行水量平衡验证	Jing M. Chen 等, 2005; 杨金明, 2014

注: 表中 R 为水源涵养量, mm; V 为流速系数; TI 为地形指数; K^{sat} 为土壤饱和导水率, cm/d; Y 为产水量, mm; AET 为实际蒸散发量, mm; P 为降水量, Q_1 为水源涵养总量, m^3 ; ET 为蒸散发, mm; $SURQ$ 为地表径流量, mm; A 为 HRU 的面积, km^2 ; i 表示第 i 个 HRU; n 为 HRU 的总个数; j 为不同时间尺度 (年、月、日) 所对应的值; Q_2 为 $t+1$ 时刻森林涵养水源总量; \bar{E} 为饱和林冠的平均蒸发速率; $W_{(t+1)}$ 为 $t+1$ 时刻元胞单元水库涵养水源量; $D_{(t+1)}$ 为 $t+1$ 时刻向深层土壤的渗漏量; i 表示第 i 个元胞单元; m 表示所模拟区域的元胞单元的总数; n_i 为模拟次数; Δt 为时间步长; Q 为地表径流量, mm; E_{daily} 为实际日蒸散量, mm; Λ 为日蒸散比; ρ_w 为水的密度; R_n 为地面净辐射通量; S 为流域当时的可能滞留量, mm。

4.1. InVEST 模型

生态系统服务与权衡综合评估模型 (InVEST, The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool) 由美国斯坦福大学、世界自然基金和大自然保护协会联合开发, 是评估生态服务的有效工具, 能够以量化、价值化和可视化的方式表达生态系统服务, 并预测未来情景下的生态服务。Nelson 等人^[55]将 InVEST 模型应用于美国威拉米特河流域, 模拟预测了不同土地利用/覆盖情景下生态服务 (水质、土壤保持、碳储量)、生物多样性保护和商品生产水平的变化, 为当地自然资源的管理和开发利用提供决策依据。此后, 国内外众多学者使用 InVEST 模型评估了不同地区的多种生态系统服务^[56-58], 并探讨了模型的敏感性与适用性, 结果表明该模型在不同区域均有较好的模拟效果^[59-61]。

InVEST 模型由众多子模块组成, 其中的产水量模块是与水相关的生态服务评估的重要组成部分, 常用于计算生态系统的水源涵养量^[62], 能够体现区域范围内水源涵养功能的空间差异, 目前已在美国、西非、中国的黄土高原、三江源、北京山区等地区进行了应用, 并取得了良好的模拟效果^[30, 63-67]。产水量模块以水量平衡为基本原理, 通过 Budyko 理论^[68]计算实际蒸散发, 在此基础上计算栅格单元的产水量, 其定义为降水量减实际蒸散发量。然后根据地表特征对产水量值进一步修正, 得到最终的水源涵养量, 主要计算公式如表 3 所示。

InVEST 模型是目前应用最广泛的水源涵养评估模型, 具有独特的优势性, 但也存在一定的局限性。主要优势有: (1) 以地图的形式展现水源涵养量的空间分布特征, 有助于分析区域内水源涵养功能的空间差异, 识别水源涵养重要区。(2) InVEST 模型可以评估水源涵养、土壤保持、碳储量等

多种生态系统服务，综合评估与权衡多种生态系统服务，为生态保护与资源管理提供决策依据^[69]。

(3) 模型的动态性强，可以预测不同土地利用/覆盖情景、气候情景下的水源涵养量^[70]。主要局限有：(1) 在计算产水量时忽略了地表径流和土壤水之间的动态作用，计算结果存在一定的误差。(2) 时间尺度为年，不能反映水源涵养量的年内及洪枯水期变化特征。(3) 产水量模块需要输入较多栅格数据和生物物理参数，对输入数据敏感，结果精度受输入数据影响较大^[71]。

4.2. SWAT 模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业研究部研发的分布式水文模型，用于分析和预测复杂流域内水文过程的长期变化，该模型物理机制强，能精确模拟分析蒸散发、径流、土壤水和基流等水文过程的时空变化^[61]。目前已经在加拿大、北美寒区、中国的黑河、三江源等地区广泛应用，取得了较好的模拟效果^[72-74]。

在 SWAT 模型中，首先将流域划分为子流域，然后根据地表特征将子流域划分为水文响应单元(HRU)^[75]。以水文响应单元为最小模拟单元，进行蒸散发、地表径流、地下水、土壤水等过程的模拟^[76]，将水源涵养量定义为降水量减蒸散量及其他消耗水量之差。

SWAT 模型可以计算空间上不连续分布景观的水源涵养量^[76]，揭示不同植被类型水源涵养能力的差异。此外，模型可以分析年、月、日不同时间尺度上的水源涵养量，日尺度可以分析短期洪水的变化量，月尺度可以研究径流年内变化，分析调节径流功能，年尺度可以研究水源供给的能力。但模型校正困难，受参数影响大。

4.3. 其他模型

除上述 InVEST 模型和 SWAT 模型外，还有学者依据自身对水源涵养内涵的理解提出一些计算模型，如王晓学等^[77]提出了基于元胞自动机的森林水源涵养量计算模型，能够计算森林生态系统在不同空间、时间尺度上的水源涵养量，提供了由小尺度上推到大尺度的计算方法。但由于计算复杂，目前尚未推广应用。聂忆黄^[42]、张海博^[78]等将 SEBS 蒸散发模型和 SCS 径流估算模型相结合来计算水源涵养量，蒸散发和地表径流计算较为准确，但未考虑地下径流部分，最终计算的水源涵养量比实际值偏大。

一些分布式水文模型也用于水源涵养量的计算中，这些水文模型多侧重于对水文循环过程的模拟，计算蒸散发、地表径流、土壤水等，在此基础上结合水量平衡原理得到流域水源涵养量，如 Terrain Lab 模型。Terrain Lab 模型是在 Wigmosta 提出的分布式水文-植被模型的基础上发展而来^[79]，以像元为单位进行水文过程的模拟，可以计算实际蒸散发、土壤含水量及土壤湿度等水文过程参数^[80-81]。Terrain Lab 模型充分考虑了植被-土壤系统在垂直方向的特征，对水文过程参数的模拟准确，适用于森林生态系统水源涵养量的计算。但模型缺乏流域范围内水量平衡的验证，实际应用中需要进行验证。

5. 水源涵养价值评估

水源涵养作为生态系统一项重要的服务功能，为人们提供众多生态效益，是生态系统服务评估

的一项重要内容。水源涵养价值评估就是从货币价值的角度出发，将生态系统的水源涵养能力进行价值化表达，常用于不同生态服务之间的权衡分析、生态系统服务总价值核算以及生态补偿中。一般是在水源涵养物质量计算的基础上，采用各种方法将生态系统涵养的水量换算为价值，用价值大小评价水源涵养功能^[82-84]。目前多采用替代的方式间接计算水源涵养价值，影子工程法是应用最广泛的方法。此外，姜文来从构成水资源价值因素的角度出发，提出了计算森林水源涵养价值的模糊数学模型^[85]。

5.1 影子工程法

影子工程法又称替代工程法，其原理是将生态系统视为天然水库，假定存在一个与生态系统水源涵养能力相同的工程（人工水库等），那么此工程的修建费用或价值即可用来替代生态系统的水源涵养价值，将工程的修建费用或价值视为影子价格，水源涵养总物质量与影子价格相乘即水源涵养价值（公式1）^[1, 86-87]。

$$V = W \times P_0 \quad (1)$$

式中： V 为水源涵养价值，元； W 为水源涵养总量， m^3 ，上文的水源涵养量乘以研究区面积即为此处水源涵养总量； P_0 为影子价格，元/ m^3 。

影子工程法计算水源涵养价值重点在于：（1）水源涵养物质量的准确计算；（2）选取合适的影子价格。水源涵养物质量的计算方法众多，前文已经讨论过。影子价格的选取方式不统一，总结起来主要有以下几种^[88]：（1）水库工程的修建成本，通常采用单位库容水库的造价；（2）供用水的商品价格；（3）电能生产成本；（4）级差地租；（5）水资源的跨区域运费；（6）海水淡化费用。其中，实际应用中使用最多的是前两种方法。

在早期的研究中，研究者在利用影子工程法计算水源涵养价值时，常选用单位库容造价 0.67 元/ m^3 作为影子价格。例如，欧阳志云等采用水量平衡法和影子工程法分析了我国陆地生态系统涵养水源的经济价值，结果表明涵养水源价值为 2.71×10^{11} 元/a^[11]。邓坤枚等采用林冠截留剩余法和影子工程法评估了长江上游森林生态系统的水源涵养功能，算得水源涵养年经济价值为 1606.179×10^8 元，表明当地森林有巨大的水源涵养效益^[28]。刘敏超等从凋落物和土壤层的蓄水能力角度研究三江源地区生态系统的水源涵养能力，并使用影子工程法计算水源涵养价值，结果表明三江源区水源涵养总价值为 1.1034×10^{10} 元^[51]。

随着社会与经济的发展，依旧选取 0.67 元/ m^3 作为单位库容造价显然不符合实际，近些年来，研究者在选取影子价格时结合当下经济发展状况，选取的影子价格更合理。例如，赖敏等在评估三江源区水源涵养功能时，使用 InVEST 模型和影子工程法计算水源涵养价值，选用单位库容造价 7.02 元/ m^3 作为影子价格，算得 2008 年三江源区水源涵养价值为 1.07×10^{11} 元^[40]。刘菊等使用 InVEST 模型和影子工程法评估岷江上游生态系统水源涵养能力，选用供水价格 0.83 元/ m^3 作为影子价格，结果表明 2010 年岷江上游水源涵养总量为 49.19 亿 m^3 ，水源涵养价值为 40.83 亿元^[89]。

影子工程法作为估算水源涵养价值的一种有效方法，其理论基础完备，实际应用中可操作性强，在我国水源涵养价值评估中广泛应用。但影子价格的选取方法众多，选取标准的不同使同一研究区

的计算结果也可能存在较大差异，导致结果的可比性差。此外，在确定影子价格时应结合社会经济发展现状，考虑当下的水库修建成本与水资源价格，选取更加符合实际的影子价格。

5.2 森林水源涵养价值模糊数学模型

除上述应用广泛的影子工程法之外，姜文来提出了计算森林水源涵养价值的模糊数学模型（公式 2、公式 3）。模型将森林水源涵养价值系统视为复杂的模糊系统，充分考虑构成水源涵养价值的三类因素：自然因素、社会因素和经济因素，从理论方面来看能准确计算森林涵养水源的经济价值。但由于模型考虑的因素众多，在实际应用中较难操作，目前很少应用，有待进一步的发展。

$$V = (A * R) * S \quad (2)$$

$$S = (P, P_1, P_2, P_3, 0) \quad (3)$$

式中：V为森林水源涵养价值；A为要素评价的权重值；R为影响森林水源涵养单要素评价矩阵组成的综合评价矩阵；S为水资源价格向量。

6. 结论与展望

本文在分析水源涵养已有研究成果的基础上，主要得出如下结论：

(1) 水源涵养研究历程可划分为四个阶段：①认识与萌芽期（1800s-1950s），主要基于观测数据分析森林与水的关系，将水源涵养视为森林对河流流量的影响；②理论发展期（1960s-1970s），对林冠截留、枯落物持水、土壤蓄水等过程的认识逐渐深入；③定量化计算阶段（1980s-2000s），水源涵养概念逐渐明确，水源涵养量估算方法得到空前发展；④模型综合评估阶段（近十余年），主要采用综合模型评估区域范围内的水源涵养功能。

(2) 水源涵养是指在一定时空范围内，生态系统通过植被层、枯落物层和土壤层、湖泊、水库水体等对降水进行截留、下渗以及贮存等过程，将水分充分保持在系统中的过程与能力，不仅满足系统内部对水源的需求，同时向外部及中下游地区提供水资源。

(3) 水源涵养功能是一个动态发展中的概念，其内涵不断丰富扩展，可以从狭义和广义的角度进行区分。狭义的水源涵养功能是指涵养水源过程中森林-草地-土壤所形成的生态系统与水的相互作用，包括拦蓄洪水、调节径流、水源供给等；广义的水源涵养功能则包含了水文过程对局地气候、水土产生的综合影响与生态效益，不仅考虑森林-草地-土壤所形成的生态系统，还加入湖泊-水库-坑塘进行的水源涵养，不仅包括了水源供给、调节径流及拦蓄洪水，还有净化水质、水土保持和调节局地气温等。

(4) 水源涵养评估可以从物质量和价值量两方面展开，相关的计算方法和评估模型众多，每种方法都存在一定的优缺点、时空尺度、适用范围等，实际应用中需灵活选择评估方法。

已有研究存在如下几条不足：

(1) 水源涵养内涵不统一。不同的研究者，给出自己的水源涵养内涵，然后根据内涵给出水源涵养量的计算公式，所计算的结果即使在同一时段同一区域也会有很大的差异。

(2) 水源涵养量计算对象不全。现有的计算仅仅考虑植被土壤的水源涵养量，而忽略了湖泊水

库坑塘在水源涵养中的贡献。在青藏高原大量内陆湖区域会存在很大的计算不确定性。

(3) 水源涵养量计算中水循环过程过于简化。水源涵养量计算时多采用年与月尺度进行简化计算, 水量平衡考虑不足, 导致各个水文要素计算存在很大的不确定性。水源涵养计算时很多是降水减蒸发与径流。由于非雨期的蒸发与壤中流应该是水源涵养的部分水量, 简单重复计算很可能会出现负值, 显然不合理。

针对以上的不足, 水源涵养研究与应用的核心发展方向是: “统一标准, 完善对象, 加强水循环, 耦合多模型, 实现精准水源涵养计算”。可从以下五个方面开展进一步深入的研究:

(1) 统一水源涵养的概念和内涵。基于水源涵养的发展与机理的研究, 深挖水源涵养的内涵, 给出合理的水源涵养定义, 根据定义统一评价指标, 规范水源涵养功能评估。

(2) 完善水源涵养的研究对象。水源涵养不仅仅需要考虑植被、土壤, 更应该考虑冻土、湖泊、坑塘和水库的蓄水功能, 所以在计算水源涵养时, 需将研究区域中植被、土壤、冻土、湖泊、坑塘、水库、河道作为研究对象, 进行综合考虑, 从而减小水源涵养计算的不确定性。

(3) 加强水循环计算, 实现多模型的耦合。利用最新的发展的分布式水文模型, 精确计算研究区域(或流域)的水循环过程, 为获得更高精度的水源涵养提供准确的水文要素。生态模型、水文模型、湖泊模型、冻土模型的耦合能够更加综合地研究水源涵养, 同时弥补单一模型的不足, 以更加系统的视角看待水源涵养。

(4) 气候变化和土地利用变化情景下水源涵养的预测。已往研究表明气候变化和土地利用变化是影响水源涵养功能的重要因素, 合理预测水源涵养功能有助于水资源的综合管理和决策, 应对未来变化和防范风险。

(5) 加强区域相关性研究。当下的研究主要关注单一流域内的水源涵养功能, 而很少考虑上游水源涵养区的变化对中下游生态系统、水量与人类活动产生的影响, 加强区域相关性研究能够更好地发挥水源涵养作用。

致谢

本文写作过程中得到了中国农业科学院农业自然资源和农业区划研究所姜文来教授指导, 多位匿名审稿人及期刊编辑对本文提出了很多宝贵的修改意见与建议, 提高了本文的质量, 特此提出感谢。

参考文献 (references) :

- [1] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613. (OU YANG Z Y, WANG X K, MIAO H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 607-613. (in Chinese))
- [2] DAILY G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D. C.: Island Press, 1997.
- [3] 姜文来. 水资源价值论[M]. 北京: 科学出版社, 1998. (JIANG W L. Theory of water resources value[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese))

- [4] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462. (GONG S H, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2455-2462. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201512012406.
- [5] 王礼先, 于志民. 水源涵养林效益研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999. (WANG L X, YU Z M. Research on benefits of water conservation forest[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [6] ENGLER A. Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf den stand des der Gewässer[J]. *Mitt Schweiz Zentralans forslische Versuchs*, 1919, 12:1~626.
- [7] BURT T P, SWANK W T. Flow frequency responses to hardwood - to - grass conversion and subsequent succession[J]. *Hydrological Processes*, 1992, 6(2): 179-188. DOI:10.1002/hyp.3360060206.
- [8] BOSCH J M, HEWLETT J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration[J]. *Journal of hydrology*, 1982, 55(1-4): 3-23. DOI:10.1016/0022-1694(82)90117-2.
- [9] 片冈顺, 王丽. 水源林研究述评[J]. 水土保持科技情报, 1990(4): 44-46. (PIAN G S, WANG L. Review on the study of water conservation forest[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 1990(4): 44-46. (in Chinese))
- [10] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993. (MA X H. Forest hydrology[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993. (in Chinese))
- [11] KITTREDGE J. Forest influences: The effects of woody vegetation on climate, water, and soil, with applications to the conservation of water and the control of floods and erosion[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1948.
- [12] F. HERBERT BORMANN, GENE E. Likens. Pattern and Process in a Forested Ecosystem[M]. New York: Springer-Verlag New York, 1979. DOI:10.1007/978-1-4612-6232-9.
- [13] 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): 78-82. (GAO C D, YU X X. Review on researches of water conservation forests[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(5): 78-82. (in Chinese)) DOI:10.13332/j.1000-1522.2000.05.016.
- [14] RUTTER A J, KERSHAW K A, ROBINS P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine[J]. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9: 367-384. DOI:10.1016/0002-1571(71)90034-3.
- [15] GASH J H C. An analytical model of rainfall interception by forests[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, 105(443): 43-55. DOI: 10.1002/qj.49710544304.
- [16] 侯晓臣, 孙伟, 李建贵, 等. 森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 121-127. (HOU X C, SUN W, LI J G, et al. The progress of research and forecast on the quantification of the forest water conservation capacity[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(1): 121-127. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2018.019.
- [17] 刘向东, 吴钦孝. 六盘山林区森林树冠截留, 枯枝落叶层和土壤水文性质的研究[J]. 林业科学, 1989, 25(3): 220-227. (LIU X D, WU X Q. Studies on rainfall interception in canopy, litter and soil hydrological characteristics of forests in Liupanshan mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1989, 25(3): 220-227. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-7488.1989.03.001.
- [18] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature* 1997, 387(6630): 253-260. DOI:10.1038/387253a0.
- [19] 姜志林. 森林生态学(六):森林生态系统蓄水保土的功能(2)[J]. 生态学杂志, 1985, (2): 59-63. (JIANG Z L. Forest Ecology (6): functions of water and soil conservation in forest ecosystem (2)[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1985(02): 61-65. (in Chinese)) DOI:10.13292 /j.1000-4890.1985.0038.
- [20] 姜志林. 森林生态学(五):森林生态系统蓄水保土的功能(1)[J]. 生态学杂志, 1984, (6): 58-61, 63. (JIANG Z L. Forest Ecology (5): functions of water and soil conservation in forest ecosystem (1)[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1984, (6): 58-61, 63. (in Chinese)) DOI: 10.13292 /j . 1000 -4890.1984.0098.
- [21] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030. (WANG X X, SHEN H T, LI X Y, et al. Concepts, processes and

- quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(4): 1019–1030. (in Chinese) DOI:10.5846/stxb201206130852.
- [22] 刘兴元, 龙瑞军, 尚占环. 草地生态系统服务功能及其价值评估方法研究[J]. *草业学报*, 2011, 20(1): 167–174. (LIU X Y, LONG R J, SHANG Z H. Evaluation method of ecological services function and their value for grassland ecosystems[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(1): 167–174. (in Chinese) DOI:doi:10.11686/cyxb20110124.
- [23] 张雪峰, 牛建明, 张庆, 等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(4): 814–821. (ZHANG X F, NIU J M, ZHANG Q, et al. Spatial pattern of water conservation function in grassland ecosystem in the Xilin River basin, Inner Mongolia[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(4): 814–821. (in Chinese) DOI:10.13866/j.azr.2016.04.18.
- [24] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(4): 47–51. (CUI L J, Evaluation on functions of Poyang Lake ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(4): 47–51. (in Chinese) DOI:10.3321/j.issn:1000-4890.2004.04.011.
- [25] 陈山山, 周忠学. 西安都市农业水源涵养功能测评[J]. *干旱区地理(汉文版)*, 2014, 37(3): 579–586. (CHEN S S, ZHOU Z X. Evaluation of water conservation service on urban agriculture in Xi'an[J]. *Arid Land Geography(Chinese Version)*, 2014, 37(3): 579–586. (in Chinese) DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.03.019.
- [26] A A 莫尔察诺夫 杨山. 森林的水源涵养作用[J]. *林业科学*, 1960, 6(2): 161–174. (A. A. MO E C N F, YANG S. Water conservation function of forest[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1960, 6(2): 161–174. (in Chinese))
- [27] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析[J]. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49–54. (CHEN D L, YU X X, LIAO B H. Analysis on the function of conservation water of the Chinese forest ecosystem[J]. *World Forestry Research*, 2005, 18(1): 49–54. (in Chinese) DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2005.01.010.
- [28] 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. (DENG K M, SHI P L, XIE G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits[J]. *Resources Science*, 2002, 24(6): 68–73. (in Chinese))
- [29] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995 (SUN L D, ZHU J Z. Research and evaluation on comprehensive benefits of soil and water conservation forest system[M]. Beijing: Science and technology of China press, 1995. (in Chinese))
- [30] BAI Y, OCHUODHO T O, YANG J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA[J]. *Ecological indicators*, 2019, 102: 51–64. DOI:10.1016/j.ecolind.2019.01.079.
- [31] 曾莉, 李晶, 李婷, 等. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化[J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1809–1822. (ZENG L, LI J, LI T, et al. Optimizing spatial patterns of water conservation ecosystem service based on Bayesian belief networks[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1809–1822. (in Chinese) DOI:10.11821/dlxb201809015.
- [32] 胡海川, 曹慧, 郝志军. 生态补偿标准确定方法研究[J]. *价值工程*, 2018, 37(3): 100–103. (HU H C, CAO H, HAO Z J. Research on the method of determining ecological compensation standard[J]. *Value Engineering*, 2018, 37(3): 100–103. (in Chinese) DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2018.03.041.
- [33] XU W, XIAO Y, ZHANG J, et al. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(7): 1601–1606. DOI:10.1073/pnas.1620503114.
- [34] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 789–797. (FU B, XU P, WANG Y K, et al. Spatial pattern of water retention in Dujiangyan County[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 789–797. (in Chinese) DOI:10.5846/stxb201203260410.
- [35] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191–5196. (LÜ Y H, HU J, SUN F X, et al. Water retention and hydrological regulation: harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5191–5196. (in Chinese) DOI:10.5846/stxb201404140717.
- [36] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 等. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 585–593. (LI S M, XIE G D, ZHANG C X, et al. Flow process of water conservation service of forest ecosystem[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(4): 585–593. (in Chinese) DOI:10.11849/zrzyxb.2010.04.007.

- [37] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 603-611. (LIU L L, CAO W, SHAO Q Q. Water conservation function of forest ecosystem in the Southern and Northern Pan River watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 603-611. (in Chinese)) DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2016.04.015.
- [38] BIAO Z, WENHUA L, GAODI X, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological economics, 2010, 69(7): 1416-1426. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.09.004.
- [39] 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. (QIN J L, YANG W Q, ZHANG J. Assessment of ecosystem water conservation value in the upper Minjiang River, Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009, 15(4): 453-458. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1145.2009.00453.
- [40] 赖敏, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 三江源区生态系统服务间接使用价值评估[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1): 38-50. (LAI M, WU S H, DAI E F, et al. The Indirect Value of Ecosystem Headwaters Services in the Three-River Region[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(1): 38-50. (in Chinese)) DOI:10.11849/zrzyxb.2013.01.005.
- [41] 聂忆黄, 龚斌, 衣学文. 青藏高原水源涵养能力评估[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 210-212. (NIE Y H, GONG B, YI X W. Water conservation valuation of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 210-212. (in Chinese))
- [42] 聂忆黄. 基于地表能量平衡与 SCS 模型的祁连山水源涵养能力研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 269-275. (NIE Y H. A study of the water conservation of Qilian Mountains based on surface energy balance and SCS model[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(3): 269-275. (in Chinese))
- [43] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484. (XIAO H, OU YANG Z Y, ZHAO J Z, et al. Forest ecosystem services and their ecological valuation: A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 481-484. (in Chinese)) DOI:10.13287/j.1001-9332.2000.0119.
- [44] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 北京市森林生态系统的水源涵养功能[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5618-5624. (ZHANG B, LI W H, XIE G D, et al. Characteristics of water conservation of forest ecosystem in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5618-5624. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2008.11.046.
- [45] 余新晓, 周彬, 吕锡芝, 等. 基于 InVEST 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. (YU X X, ZHOU B, LV X Z, et al. Evaluation of water conservation function in mountain forest areas of Beijing based on InVEST model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(10): 1-5. (in Chinese) DOI:10.11707/j.1001-7488.20121001.
- [46] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2100-2109. (SI J, HAN P, ZHAO C L. Review of water conservation value evaluation methods of forest and case study[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(12): 2100-2109. (in Chinese)) DOI:10.11849/zrzyxb.2011.12.009.
- [47] 张三焕, 赵国柱, 田允哲, 等. 长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2001, 27(2): 126-134. (ZHANG S H, ZHAO G Z, TIAN Y Z, et al. Study on value the ecological environment valuation of forestry resources--For case by Hunchun forestry in Changbai Mountain[J]. Journal of Yanbian University:Natural Science, 2001, 27(2): 126-134. (in Chinese)) DOI:10.16379/j.cnki.issn.1004-4353.2001.02.012.
- [48] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534. (ZHANG B, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation function and Its measurement methods of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 529-534. (in Chinese)) DOI:10.13292/j.1000-4890.2009.0089.
- [49] 李金昌. 生态价值论[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1999. (LI J C. Ecological value theory[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1999. (in Chinese))
- [50] 吴波, 石培礼, 井学辉, 等. 大兴安岭东部林区植被蓄水潜力与价值的评估[J]. 林业科学研究, 2006, 19(6): 706-712. (WU B, SHI P L, JING X H, et al. Water conservation capacity and its value evaluation of vegetation types in Eastern Daxing'anling Mountain forest area[J]. Forest Research, 2006, 19(6): 706-712. (in Chinese))

- DOI:10.3321/j.issn:1001-1498.2006.06.006.
- [51] 刘敏超, 李迪强, 温琰茂, 等. 三江源地区生态系统水源涵养功能分析及其价值评估[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 405-408. (LIU M C, LI D Q, WEN Y M, et al. Function and value of water-holding in Sanjiangyuan region[J]. Resources and Environment in the Yangtza Basin, 2006, 15(3): 405-408. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1004-8227.2006.03.026.
- [52] 郎奎建, 李长胜, 殷有, 等. 林业生态工程 10 种森林生态效益计量理论和方法[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(1): 1-7. (LANG K J, LI C S, YIN Y, et al. The measurement theory and method of 10 forest ecological benefits for forestry ecological engineering[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 28(1): 1-7. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-5382.2000.01.001.
- [53] 张庆费, 周晓峰. 黑龙江省汤旺河和呼兰河流域森林对河川年径流量的影响[J]. 植物资源与环境学报, 1999, 8(1): 23-28. (ZHANG Q F, ZHOU X F. Influence of forest on runoff discharges in Tangwang River and Hulan River basins of Heilongjiang Province[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 1999, 8(1): 23-28. (in Chinese))
- [54] VIGERSTOL K L, AUKEMA J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services[J]. Journal of environmental management, 2011, 92(10): 2403-2409. DOI:10.1016/j.jenvman.2011.06.040.
- [55] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4-11. DOI:10.1890/080023.
- [56] TERRADO M, ACUÑA V, ENNAANAY D, et al. Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin[J]. Ecological indicators, 2014, 37: 199-209. DOI:10.1016/j.ecolind.2013.01.016.
- [57] BANGASH R F, PASSUELLO A, SANCHEZ-CANALES M, et al. Ecosystem services in Mediterranean river basin: climate change impact on water provisioning and erosion control[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458: 246-255. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.04.025.
- [58] LEH M D K, MATLOCK M D, CUMMINGS E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2013, 165: 6-18. DOI:10.1016/j.agee.2012.12.001.
- [59] REDHEAD J W, STRATFORD C, SHARPS K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569: 1418-1426. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.06.227.
- [60] HAMEL P, GUSWA A J. Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(2): 839-853. DOI:10.5194/hess-19-839-2015.
- [61] ARNOLD J G, MORIASI D N, GASSMAN P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1491-1508. DOI: 10.13031/2013.42256.
- [62] CANQIANG Z, WENHUA L, BIAO Z, et al. Water yield of Xitiaoxi river basin based on InVEST modeling[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 50-54. DOI:10.5814/j.issn.1674-764x.2012.01.008.
- [63] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170. (LIU Y Y, LIU X Y, ZHANG B, et al. Spatial features analysis of water conservation function in the hilly areas of the Loess Plateau based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6161-6170. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201910102108.
- [64] ZHENG H, LI Y, ROBINSON B E, et al. Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016, 14(10): 527-532. DOI:10.1002/fee.1432.
- [65] LEH M D K, MATLOCK M D, CUMMINGS E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2013, 165: 6-18. DOI:10.1016/j.agee.2012.12.001.
- [66] SU C, FU B. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. Global and Planetary Change, 2013, 101: 119-128. DOI:10.1016/j.gloplacha.2012.12.014.
- [67] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于 InVEST 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. (PAN T, WU S H, DAI E F, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of Chi- na based on INVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 183-189. (in Chinese)) DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0140.
- [68] BUDYKO M I, MILLER D H, MILLER D H. Climate and life[M]. New York: Academic press, 1974.
- [69] BAI Y, OUYANG Z, ZHENG H, et al. Modeling soil conservation, water conservation and their tradeoffs: a case study in Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3): 419-426. DOI:10.1016/S1001-0742(11)60790-0.
- [70] 王保盛, 陈华香, 董政, 等. 2030 年闽三角城市群土地利用变化对生态系统水源涵养服务的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 484-498. (WANG B S, CHEN H X, DONG Z, et al. Impact of land use change on the water conservation service of ecosystems in the urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 484-498. (in Chinese)) DOI:10.5846/stxb201902180286.
- [71] PESSACG N, FLAHERTY S, BRANDIZI L, et al. Getting water right: A case study in water yield modelling based on precipitation data[J]. Science of the Total Environment, 2015, 537: 225-234. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.07.148.
- [72] 乔飞, 富国, 徐香勤, 等. 三江源区水源涵养功能评估[J]. 环境科学研究, 2018, 31(6): 1010-1018. (QIAO F, FU G, XU X Q, et al. Assessment of Water Conservation Function in the Three-River Headwaters Region[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(6): 1010-1018. (in Chinese)) DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2018.03.45.
- [73] 张永勇, 张士锋, 翟晓燕, 等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 71-82. (ZHANG Y Y, ZHANG S F, ZHAI X Y, et al. Runoff Variation in the Three Rivers Source Region and Its Response to Climate Change[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 71-82. (in Chinese)) DOI:10.11821/xb201201008.
- [74] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 22-26. (HUANG Q H, ZHANG W C. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River basin, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences), 2004, 28(2): 22-26. (in Chinese) DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.2004.02.00.
- [75] 万荣荣, 杨桂山. 流域 LUCC 水文效应研究中的若干问题探讨[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 25-33. (WAN R R, YANG G S. Discussion on some issues of hydrological effects of watershed land use and land cover change[J]. Progress in Geography, 2005, 24(3): 25-33. (in Chinese)) DOI:10.11820/dlkxjz.2005.03.004.
- [76] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 等. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 179-192. (LIN F, CHEN X W, YAO W Y, et al. Multi-time scale analysis of water conservation in a discontinuous forest watershed based on SWAT model[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1065-1078. (in Chinese)) DOI:10.11821/dlxb202005013.
- [77] 王晓学, 李叙勇, 莫菲, 等. 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法——概念与理论框架[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5491-5500. (WANG X X, LI S Y, MO F, et al. Exploration of a new modeling method for forest water conservation based on cellular automata: concept and theoretical framework[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5491-5500. (in Chinese))
- [78] 张海博. 基于 SEBS 与 SCS 模型的区域水源涵养量估算研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2012. (ZHANG H B. Estimation of regional water conservation based on SEBS and SCS model: a case study of mountainous area in northern Beijing[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2012. (in Chinese))
- [79] WIGMOSTA M S, VAIL L W, LETTENMAIER D P. A distributed hydrology - vegetation model for complex terrain[J]. Water resources research, 1994, 30(6): 1665-1679. DOI:10.1029/94WR00436.
- [80] 杨金明. 基于分布式水文模型的森林水源涵养功能评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014. (YANG J M. Evaluation of water conservation function based on distributed hydrological model -taking Xinlin watershed as an example[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014. (in Chinese))
- [81] CHEN J M, CHEN X, JU W, et al. Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs[J]. Journal of Hydrology, 2005, 305(1-4): 15-39. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.08.029.
- [82] 李志沛, 张宇清, 朱清科, 等. 中国平原林业工程涵养水源生态服务功能价值估算[J]. 水土保持

- 研究, 2012, 19(3): 242-244. (LI Z P, ZHANG Y Q, ZHU Q H, et al. Evaluation on ecological service values of water conservation function of forestry in the plain of China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 242-244. (in Chinese))
- [83] 张舟, 吴次芳, 谭荣. 生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用: 瓶颈和展望[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 556-562. (ZHANG Z, WU C F, TAN R. Application of ecosystem service value in land use change research: Bottlenecks and prospects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 556-562. (in Chinese)) DOI:10.13287/j.1001-9332.2013.0191.
- [84] 陈骏宇, 刘钢, 白杨. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养服务价值评估[J]. 水利经济, 2016, 34(2): 25-29. (CHEN J Y, LIU G, BAI Y. Evaluation of service value of water conservation in Taihu Lake basin based on InVEST model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34(2): 25-29. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1003-9511.2016.02.006.
- [85] 姜文来. 森林涵养水源的价值核算研究[J]. 水土保持学报, 2003(2): 34-36, 40. (JIANG W L. Theory and method to accounting value of forest water conservative[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003(2): 34-36. (in Chinese)) DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2003.02.010.
- [86] 李晶, 任志远. 秦巴山区植被涵养水源价值测评研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 132-134. (LI J, REN Z Y. Study on function and value of vegetation water conservation on Qinba Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(4): 132-134. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1009-2242.2003.04.036.
- [87] 李晶, 任志远. 陕北黄土高原生态系统涵养水源价值的时空变化[J]. 生态学杂志, 2008, 27(2): 240-244. (LI J, REN Z Y. Spatiotemporal change of water conservation value of Loess Plateau ecosystem in northern Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(2): 240-244. (in Chinese)) DOI:10.13292/j.1000-4890.2008.0074.
- [88] 侯元兆, 王琦. 中国森林资源核算研究[J]. 世界林业研究, 1995(3): 51-56. (HOU Y Z, WANG Q. Study on forest resource accounting in China[J]. World Forestry Research, 1995(3): 51-56. (in Chinese)) DOI:10.13348 /j . cnki . sjl yyj . 1995 . 03 . 008.
- [89] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 577-585. (LIU J, FU B, ZHANG C H, et al. Assessment of ecosystem water retention and its value in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST model[J]. Resources and Environment in the Yangtza Basin, 2019, 28(3): 577-585. (in Chinese)) DOI:10.11870 /cjlyzyyhj201903008.

The review on service of water retention and computing method

WANG Yunfei¹, YE Aizhong¹, QIAO Fei², LI Zongxing³, MIAO Chiyuan¹, DI Zhenhua¹, GONG Wei¹

(1. Beijing Normal University, Faculty of Geographical Sciences, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Institute of Land Surface System Science and Sustainability Studies, Beijing 100875, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

3. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Under the scenario of increasing demand for water resources and global climate change, the shortage of water resources in China is becoming increasingly serious, so it is particularly important to strengthen the protection and rational development and utilization of water resources. As an important storage form of water resources, water retention affects the hydrological cycle at different scales, plays an important role in the balance and stability of the ecosystem, and also provides people with services such as flood storage, water quality purification, and water supply, which is closely related to people's production and life. Many scholars have carried out extensive studies on the function of water conservation and had a deep understanding of it. However, due to the rich connotation and diverse functions of water retention, there are many existing definitions and calculation methods of water retention, and there is still a lack of unified standard, more systematic and accurate definition and calculation method of water source conservation are needed. Here, we summarized the concepts, functions, and calculation methods of water retention gave the definition, and analyzed the calculation models of water retention.

This paper summarized the history of water retention research, which can be roughly divided into four

stages: the stage of understanding and experimental observation, the stage of forest hydrological process, the stage of quantitative calculation, and the stage of comprehensive model evaluation. On this basis, the concept and connotation of water retention are defined from the three aspects of function, object, and quantity, the definition of water retention is given, and the function of water retention is distinguished from the narrow and broad perspectives. The calculation methods of water retention based on conceptual model mainly include water balance method, precipitation storage method, annual runoff method, underground runoff growth method, canopy interception method, soil water storage capacity method, comprehensive water storage capacity method, multiple regression method, and alternative engineering method. The above calculation methods are compared and analyzed from the principle, application scope, application scale, advantages, and disadvantages. The methods of water retention evaluation based on the dynamic model include SWAT, InVEST, cellular automata model, SEBS and SCS model, etc. The models are compared and analyzed from the aspects of model principles, spatiotemporal scale, and advantages and disadvantages.

Most of the calculation methods based on the conceptual model are suitable for forest ecosystems, and the calculation results are often larger or smaller than the actual value. Among them, the water balance method has good adaptability in space-time scale, and the comprehensive water storage capacity method can compare and analyze the water retention capacity of different action layers, which are two widely used methods at present. InVEST model is the most widely used model for water retention assessment, which is suitable for annual water retention function assessment and prediction analysis. SWAT has a strong physical mechanism, which can simulate water retention under different time scales of year, month, and day.

Water retention refers to the process and ability of the ecosystem to fully maintain water in the system through the interception, infiltration, and storage of precipitation in vegetation layer, litter layer, soil layer, lake, and reservoir in a certain space-time range. It not only meets the demand for water resources in the system but also provides water resources to the external, middle, and lower reaches of the system. It is suggested that the hydrological model with a definite physical mechanism should be used to calculate the water retention mass, and the water retention quantity should be precipitation minus surface runoff and evaporation during the rain period. In the future, further research can be carried out from the following five aspects: unifying the concept and connotation of water retention, strengthening the coupling of multiple research objects and models, forecasting water retention under climate change and land-use change scenarios, strengthening the research on regional correlation.

Keywords: water retention; definition; function; computing method; model