

水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法

左其亭¹,王骄阳¹,杨峰²,宋全香³

(1. 郑州大学水利科学与工程学院,河南 郑州 450001; 2. 河南省出山店水库建设管理局,河南 信阳 464043;
3. 河南省水利勘测设计研究有限公司,河南 郑州 450016)

摘要:为深刻理解水源涵养相关概念,在综述国内外相关研究的基础上,对水源涵养、水源涵养功能及水源涵养能力代表性概念进行了梳理和辨析,提出了内涵明确、外延清晰的定义。分析认为,水源涵养是生态系统截留降水、贮存水分、调节径流、净化水质、维持生态的过程和现象;水源涵养功能有狭义和广义之分,狭义的水源涵养功能是针对拦蓄降水、调节径流、影响降水量的功能,广义的水源涵养功能除狭义的功能外还包括水土保持、减少植被退化、改善下垫面条件、保护生物多样性、调节气候等生态环境保护功能;水源涵养能力应为水源涵养功能作用大小的定量体现,狭义的水源涵养能力计算主要是对水量的计算,广义的水源涵养能力计算应包括水量、水质及一些生态指标的综合计算。以黄河源区为例,介绍了黄河源区水源涵养能力的不同计算结果及应用说明。

关键词:水源涵养;水源涵养功能;水源涵养能力;生态系统

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)02-0013-07

Concept analysis of water conservation and calculation methods of water conservation capacity//ZUO Qiting¹, WANG Jiaoyang¹, YANG Feng², SONG Quanxiang³ (1. School of Hydraulic Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Chushandian Reservoir Construction and Administration of Henan Province, Xinyang 464043, China; 3. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: To have a deep understanding of the concepts related to water conservation, the representative concepts of water conservation, water conservation function and water conservation capacity were sorted out and differentiated based on reviewing of relevant researches both at home and abroad and the definitions with clear connotations and denotation were put forward. Water conservation is a process and phenomenon in which the ecosystem intercepts precipitation, stores water, regulates runoff, purifies water quality and maintains ecology. Water conservation function has both narrow and broad sense. In the narrow sense, water conservation function is holding precipitation, runoff regulation and influencing precipitation. In the generalized sense, water conservation includes soil and water conservation, degradation reduction of vegetation, underlying surface conditions improvement, biodiversity and ecological environment protection functions such as regulating climate, as well as the special features in the narrow sense. Water conservation capacity is the quantitative embodiment of water conservation function. The water conservation capacity calculation is the calculation of water quantity in the narrow sense while in the broad sense, it should be the comprehensive calculation of water quantity, water quality and some ecological indexes. Finally, taking the source region of the Yellow River as an example, different calculation results and application of water conservation capacity are introduced.

Key words: water conservation; water conservation function; water conservation capacity; ecosystem

21 世纪以来,在人口急速增长、经济社会快速发展及全球气候变暖的背景下,人类对水资源的需求不断提高。由于水资源的不合理开发利用及极端降雨频发,大量河流年内水量分布不均问题进一步加剧,不少河段甚至出现断流现象。因此,如何涵养水源,改善水源水量、水质成为高度关注的问题。

水源涵养作为生态系统的重要服务功能之一,

是生态系统水量调节服务的核心^[1],且不断影响养分循环、系统生产力等多项功能^[2],具有极其重要的研究价值。国内外学者对水源涵养及相关概念进行了深入的探讨,但由于水源涵养具有动态性、复杂性、时空性,对其概念的探讨从未停止,水源涵养功能的范围也随着研究深入不断扩展。目前,对水源涵养能力的研究主要集中在定量评价上,而不少学者还将

水源涵养与水源涵养功能等同,定性概念尚不清晰。综上,目前的研究尚未对水源涵养、水源涵养功能和水源涵养能力这3个专业名词的概念进行系统梳理,其概念、内涵存在多种不同解读,而由于概念不够清晰,水源涵养能力估算结果的合理性也有待商榷。

本文基于国内外水源涵养相关研究,对水源涵养相关代表性概念进行归纳、辨析及总结,提出全面、合理的水源涵养、水源涵养功能及水源涵养能力的定义,并总结归纳水源涵养能力计算方法。由于黄河源区对国民经济、生态保护等各方面的重要意义,其水源涵养能力一直是国内外学者研究的重点,且相关研究成果较为丰富,因此本文以黄河源区为例对水源涵养能力计算结果进行分析说明。

1 水源涵养相关概念辨析

1.1 研究历程

水源涵养的相关研究起源于人们对森林拦蓄、调节降水能力的认识。19世纪末,国外学者开始对水源涵养进行研究,1900年 Bernese Emmental 进行的流域对比试验是森林水文学研究的开端^[3],随后,美国、日本等发达国家开始陆续展开森林水文现象观测试验,并开展了多流域不同土地覆盖类型的水源涵养作用研究。随着对森林生态系统的进一步研究,20世纪中叶,各国学者开始探讨森林与水之间的相互作用机制。20世纪60年代,Bormann等^[4]将水文学与森林生态系统研究结合;70年代,国外的一些专家学者开始认识到森林对水质的净化作用^[5],进而拓展了森林对水源作用功能的范围;随后,各国从林冠、枯落物、林地及土壤等多方面、多角度对森林水文过程进行了研究,开发了多种林冠截留模型^[6-7]和土壤蓄水及蒸发量的经验公式,积累了大量实测资料,奠定了水源涵养研究的理论基础,但还未有学者对“水源涵养”这一概念进行阐述,大多认为水源涵养就是森林对水的作用过程。1997年,随着生态系统服务概念的提出,人们开始着眼于水源涵养研究^[8]。我国水源涵养的研究始于20世纪初,刘亮等^[9-10]在河南、陕西及淮河、黄河流域开展了土壤侵蚀和水土保持影响的观测研究,人们开始关注森林对水土保持的作用,开始探讨森林的水源涵养功能。20世纪80年代以来,我国开始研究水源涵养机能及原理,同时也开展了大量的水源涵养功能计量研究^[11]。进入21世纪后,学者们普遍认为水源涵养功能一般表现在拦蓄降水、调节径流、影响降水量以及净化水质等方面。目前国内外估算水源涵养能力的方法很多,且随着地理信息技术、水文模型的开发及广泛应用,InVEST模型、SWAT模型、

元胞自动机模型等与水源涵养功能评价相结合,逐渐丰富了水源涵养评价体系^[10]。2010年以来,相关研究不再局限于森林生态系统的水源涵养,而是不断扩展、延伸至湿地^[12]、林地^[13]等生态区。关于水源涵养能力的研究目前还比较模糊,国内外学者对水源涵养能力评价的研究主要集中于对林冠层^[14]、土壤层^[15]、枯落物层^[16]等某一特定层的研究,而在整体层次的关注及研究还不够深入。

总体来说,水源涵养及相关研究起源较早,且随着研究的深入,逐渐从理论偏向应用。目前对水源涵养及相关概念的认识比较混乱,对概念的界定不清晰,对内涵的理解不深入且对评估的结果认同不统一。为解决这一问题,本文对目前代表性的概念进行辨析,并总结提出新的定义。

1.2 水源涵养概念对比与归纳

水源涵养是一个具有复杂性和动态性的概念。从20世纪末开始,各国学者不断探索、丰富其概念、内涵,深入剖析其功能机制,对水源涵养的认识和研究不断取得突破性进展。但目前大多数学者的关注点都在如何对水源涵养功能进行定量研究上,对基础概念还未达到统一的认识。19世纪初,国外学者将水源涵养理解为“自然地、缓慢地保护水源地”,并就其机能展开了激烈讨论^[17]。20世纪末,人们认为水源涵养是森林对河流流量增减的影响^[18];之后研究对象不再局限于森林,认为水源涵养是生态系统保持水分、滋养水源的能力^[19];21世纪以来,又不断将其作用拓展,并对概念进行进一步的扩充,突出水源涵养的作用及机理^[20]。王云飞等^[10]根据水源涵养功能狭义与广义的双重内涵,不再按照土地利用类型进行叙述,而是按照作用的主体,将其细化为植被层、枯落物层和土壤层,并将水库、湖泊作为主体加入水源涵养定义中,扩展了水源涵养概念的范围。虽然目前水源涵养内涵解读众多,但不同解读差异较大,其定性概念仍较为模糊,需要进一步的探讨和总结。本文根据水源涵养的主体、对象、目的、范围对水源涵养进行定义,即水源涵养是指在一定时空范围内,通过自然调节或生态工程建设,生态系统截留降水、贮存水分、调节径流、净化水质、维持生态的过程和现象。

1.3 水源涵养功能概念对比与归纳

水源涵养功能是水源涵养所具备的对水和自然界的有利作用。通过梳理水源涵养功能相关文献,从作用主体来看,20世纪以来,国内外学者普遍认为水源涵养功能是以森林生态系统为主体,通过林冠层、枯落物层和土壤层调节水分,以达到涵养水源的作用^[1,20-21]。2010年以后,广义的水源涵养功能

认为湖泊、水库等能够截留降水的区域也具有水源涵养功能^[10]。从功能内容来看,早期专家学者认为水源涵养功能是森林生态系统对降水拦截、吸收和积蓄的功能,后来认为净化水质、调节径流和影响降水量等功能也包括在内^[22-23],但这些功能只考虑了水源涵养对水资源方面的作用功能,而忽略了生态环境方面。水源涵养对生态环境、水土保持、减少植被退化、改善下垫面条件、保护生物多样性、调节气候等也有一定作用。因此,将水源涵养功能定义为狭义与广义两种,狭义的水源涵养功能是指森林、草地、林地等生态系统拦蓄降水、调节径流、影响降水量的功能;广义的水源涵养功能将更广泛的作用主体及功能考虑进来,定义为森林、草地、林地、沼泽、湖泊等生态系统及水库等水利工程起到的拦蓄降水、调节径流、影响降水量及净化水质,以改善或保持水源地水体质量、数量的作用以及包含的水土保持、减少植被退化、改善下垫面条件、保护生物多样性、调节气候等生态环境保护功能。

1.4 水源涵养能力的概念

目前,大多数研究认为水源涵养能力为水源涵养功能的作用大小^[24]。虽然已有学者评估了不同地区的水源涵养能力,但其中不少研究将水源涵养功能与水源涵养能力概念混淆。水源涵养能力应为水源涵养功能作用大小的定量体现,目前主要是通过计算水源涵养量这一关键指标来体现。

根据水源涵养功能的定义,亦可将水源涵养能力分为狭义水源涵养能力和广义水源涵养能力,狭义水源涵养能力就是表征水源涵养区对水量的作用大小,广义水源涵养能力则代表水源涵养区对水量、水质及生态调节的综合作用大小。

2 水源涵养能力计算方法

2.1 计算指标和方法概述

水源涵养能力与流域下垫面情况、气候要素等因素有很大关系,其反映出的功能大小也需要从多方面考虑。狭义的水源涵养能力计算主要是对水量进行计算,目前水量采用水源涵养量表示。水源涵养量是指在一定时间段内生态系统储存的水量,包括年径流量、年内径流量过程(月径流量)、最大和最小流量。水源涵养量实质是表征生态系统在一段时间内对降水的存储能力。广义的水源涵养能力计算应包括水量、水质及一些生态指标的综合计算,其计算方法涉及水文学、生态学、林学、环境科学等学科。

2.2 水源涵养量计算代表方法

目前计算水源涵养量的方法有很多,代表性方法^[10]有:①水量平衡法。该方法运用广泛,计算简

单,但受蒸散量影响较大,且忽略降水及蒸散发的空间差异性,结果准确性不高。②降水储存量法。该方法可操作性强,但忽略了地表径流及地表蒸散发等因素的影响,较难反映水源涵养量的空间变化。③土壤蓄水量法。该方法计算简单,可操作性强,但只能反映静止状态土壤的暂时蓄水量,计算值偏小。④综合蓄水能力法。该方法综合考虑了生态系统对于降水的拦蓄作用,计算全面,但需要的数据量较大,计算复杂且没有考虑蒸散的影响,不适合大范围的应用。⑤林冠截留剩余量法。该方法的计算包括土壤拦截、渗透以及储存的雨水等,计算简便,但没有考虑蒸散和地表径流因素,计算结果偏大。⑥年径流量法。该方法假定林区的年径流量就是水源涵养量,计算简单,可操作性强,但计算误差较大。⑦地下径流增长法。该方法数据需求量少,方便操作,但计算结果一般低于实际值。⑧多因子回归法。该方法反映出各个因子的变化情况对水源涵养量的影响,但需要的数据量太大且获取困难,实际应用较为困难。这些方法均得到了广泛应用,在实际计算时应根据各方法特点、研究区条件选取合适的方法。

随着水文模型的广泛应用,为精确、合理地计算水源涵养量,许多学者引入水文模型对水源涵养量进行综合评估。例如:乔飞等^[20]将 SWAT 模型与水源涵养能力传统评估模型相结合,从供给水源、调节径流和调蓄洪水 3 方面对三江源区水源涵养能力进行了定量评价;陈骏宇等^[25]从经济视角运用 InVEST 模型动态评估了太湖流域水源涵养服务价值。SWAT 和 InVEST 模型是目前水源涵养能力评估方面应用最广泛的模型,也有一些学者采用 CLUE、元胞自动机、Terrain Lab、SEBS 和 SCS 等模型。

2.3 广义水源涵养能力计算方法

广义水源涵养能力的计算需采用不同的量化方法。例如:康萍等^[26]等通过计算年净化水质价值来确定林地生态系统净化水质能力大小;石丽娜等^[27]通过监测 18 个常用水质指标分析水质变化;姜龙等^[28]通过 MODIS 遥感影像数据,采用像元二分模型法、最大值合成法等方法计算植被覆盖度的增减,进而说明植被增多或退化及下垫面时空变化情况;王芳等^[29]构建了包括生境质量、物种多样性和景观多样性 3 个评价指标的生物多样性综合指数来分析生物多样性的时空变化情况;黄颖等^[30]通过 InVEST 模型计算碳总量,通过固碳量反映气候调节能力水平。当然,各个学科对于水源涵养能力的计算有不同的指标和方法,这些指标和方法可以通过相互结合,融会贯通地从多方面来阐述水源涵养功能的作用大小。图 1 为水源涵养各概念关系。

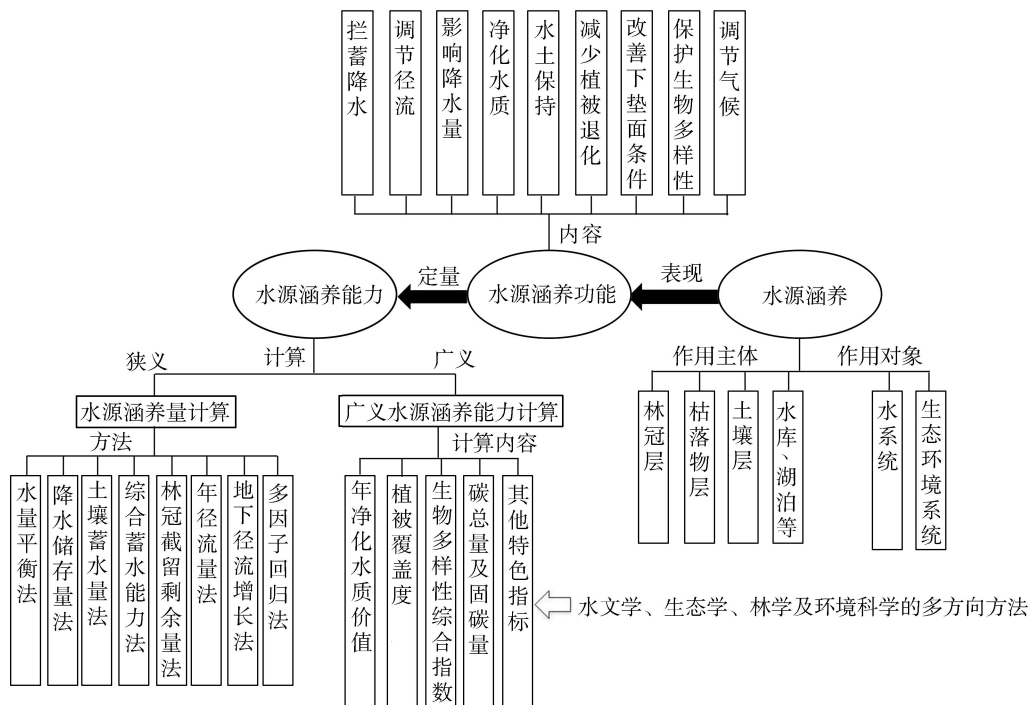


图1 水源涵养相关概念的关系

3 水源涵养能力计算实例分析

3.1 黄河源区水源涵养能力计算分析

黄河源区地处青海、甘肃、四川三省的交界地带,指的是黄河干流唐乃亥水文站断面以上区域,海拔2675~6253 m,多年平均降水量约为508 mm,多年平均天然径流量为205亿 m^3 ,降水夏秋多、春冬少。黄河源区是黄河流域的主要产流区和水源涵养区。黄河源区的面积占整个流域的16.2%^[31],但产水量占33%^[32],是下游经济社会发展的重要支撑。

近年来,由于气候变化和人类活动的强烈作用,黄河源区大量的草地、湿地、冻土、冰川退化,出现了明显的沙漠化,甚至出现了多次断流现象^[33],直接导致黄河源区水源涵养能力下降。许多学者对黄河源区水源涵养能力进行了计算,本文介绍几个代表性计算实例,不再进行重新计算。①尹云鹤等^[34]基于改进的LPJ模型,结合水量平衡法计算水源涵养量来表征水源涵养能力大小。黄河源区北部的大部分地区水源涵养量(年降水量与年蒸发量之差)不高于100 mm,南部地区大多在200 mm以上,中部地区水源涵养量介于两者之间。在时间尺度上,1981年以来黄河源区水源涵养量变化的总体趋势为持续下降,在2002年之前,减小趋势明显,变化速率达-4.12 mm/a,但变化速率呈逐年变缓趋势,多年平均变化速率为-1.15 mm/a。在空间尺度上,黄河源区水源涵养量呈现明显的空间分布差异,北部地区水源涵养量呈逐年增大趋势,东南地区减小趋势显

著。②王道席等^[35]通过计算径流量变化来反映水源涵养能力。研究表明,自20世纪60年代以来,黄河源区径流量呈现“丰—枯”交替现象,多年平均径流量为329.7亿 m^3 ,但在当前低植被覆盖情况下,黄河流域地下径流量将减少200.1亿 m^3 ,水量锐减反映出水源涵养能力下降显著。③石丽娜等^[27]通过监测18个常用水质指标分析黄河源区水质状态及变化,反映净化水质能力大小。④张志强等^[36]运用像元二分模型、一元线性回归模型和Hurst指数计算了黄河流域植被覆盖度的空间格局和时序变化。⑤刘彩红等^[37]分析了1960—2019年黄河源区平均气候与极端气候变化,可反映水源涵养区改善气候的能力。

3.2 黄河源区水源涵养能力影响因素

提升黄河源区水源涵养能力是国家绿色发展和生态安全屏障构建的重要组成部分。为确保黄河源区水源涵养能力改善,实现水源涵养功能最大化,应综合考虑多种影响因素,确定主要影响因子,采取相应的应对措施。

降水和潜在蒸散是影响黄河源区水源涵养能力的重要气候指标。降水量增加将对水源进行补给,水源涵养量提高。潜在蒸散越大,说明水源涵养区大气对水分需求能力越强,从而导致水源涵养量减小,水源涵养能力下降。20世纪80年代以来,黄河源区降水量呈减少趋势,但变化幅度不大,变化速率为-0.23 mm/a;在空间上,呈北方增多、南方减少趋势。黄河源区潜在蒸散稍有增加,变化速率为

0.72 mm/a。虽然两者均对水源涵养能力起到重要影响,但在不同干湿条件下,两者的影响程度也不相同。在较湿润的黄河源区东南部,水源涵养量的减少受到两者共同作用,而在北部干旱地区,水源涵养量的增加主要是由于降水量的增加^[34]。

下垫面变化是影响黄河源区水源涵养能力的直接因素。21 世纪以来,由于人类活动及人工沟渠建设,黄河源区草地、湿地、冻土退化明显,甚至出现严重的沙漠化现象,胡光印等^[38]研究表明目前源区沙漠化严重,占全流域沙漠化面积的 70% 左右,甚至呈上升趋势。下垫面的严重变化将导致其有效拦截降水、调节坡面径流、净化水质、调节生态等功能减弱甚至失效,直接导致水源涵养能力下降。如果不对现状进行管控和干预,黄河源区沙漠化将更加严重,水源涵养能力下降将导致恶性水循环,无法承担流域经济社会发展及生态环境维护的重任。

3.3 对提升黄河源区水源涵养能力的建议

根据上述分析,针对水源涵养能力主要影响因素,对黄河源区改善水源涵养能力提出以下建议:

a. 加强源区生态环境普查。对黄河源区进行深入研究,开展源区生态环境普查,厘清目前存在的问题,科学论证草地、林地、冻土、湿地等生态系统退化原因及恢复机制。

b. 增加植被覆盖,改善下垫面条件。水源涵养能力提升的核心是保护本地植被,加强森林、草原、湿地等生态系统的维护,保护湖泊、沼泽等生态系统,在不破坏当地水源涵养功能的前提下,加强水库等地表蓄水工程的建设。建造人工林地、草地,改善土壤理化性质,提高储水及输水能力。

c. 统筹兼顾生态系统保护与农牧业发展。黄河源区大部分区域为少数民族聚集地及牧区,而人类活动会时刻影响生态环境。应严守生态保护红线,合理利用草原资源,加强法制建设,禁止过度放牧,禁止污水过量排放,正确处理好生态保护和改善民生之间的关系。

4 结 论

a. 水源涵养是生态系统截留降水、贮存水分、调节径流、净化水质、维持生态的过程和现象。水源涵养功能分狭义与广义两种,狭义水源涵养功能是针对拦蓄降水、调节径流、影响降水量的功能;广义水源涵养功能除狭义的功能外还包括水土保持、减少植被退化、改善下垫面条件、保护生物多样性、调节气候等生态环境保护功能。水源涵养能力应为水源涵养功能大小的定量体现,狭义水源涵养能力计算采用水源涵养量这一指标,广义水源涵养能力计

算除水源涵养量指标外还有其他多种指标。

b. 黄河源区水源涵养能力呈下降趋势,且在空间上由南向北逐渐呈减小趋势;影响水源涵养能力的重要气候指标是降水和潜在蒸散,下垫面的改变是直接影响因素。改善水源涵养能力应从加强源区生态环境普查、增加植被覆盖、改善下垫面条件及统筹兼顾生态系统保护与当地经济社会三方面进行。

参考文献:

[1] 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. (LYU Yihe, HU Jian, SUN Feixiang, 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))

[2] LIU Shirong,SUN Pengsen,WEN Yuanguang. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China[J]. Acta Phytocologica Sinica,2003 (1):16-22.

[3] MCCULLOCH J S G, ROBINSON M. History of forest hydrology[J]. Journal of Hydrology,1993,150(2/3/4): 189-216.

[4] BORMANN H F,LIKENS G E. Pattern and process in a forested ecosystem[M]. New York:Springer,1994.

[5] 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 Chengde, YU Xinxiao. Review on researches of water conservation forests[J]. Journal of Beijing Forestry University,2000, 22(5):78-82. (in Chinese))

[6] 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.

[7] 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.

[8] COSTANZA R,D' ARGE R,DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics,1998,25(1):3-15.

[9] 刘亮. 罗德民、芬次尔在中国的科学研究、人际关系与社会影响[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2018,17(3): 28-33. (LIU Liang. Scientific research, interpersonal relationship and social influence of Lowdermilk and Fenzel in China[J]. Journal of Beijing Forestry University(Social Sciences),2018,17(3): 28-33. (in Chinese))

[10] 王云飞,叶爱中,乔飞,等. 水源涵养内涵及估算方法综述[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6): 1041-1071. (WANG Yunfei, YE Aizhong, QIAO Fei,

- et al. The review on service of water retention and computing method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19 (6): 1041-1071 (in Chinese))
- [11] 金小麒. 水源涵养的计量研究[J]. 贵州林业科技, 1990 (3): 64-72. (JIN Xiaolin. Quantitative study on water conservation [J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 1990(3): 64-72. (in Chinese))
- [12] 朱林. 湿地土壤水源涵养功能探讨[J]. 农业与技术, 2016, 36 (7): 53-54. (ZHU Lin. Study on water conservation function of wetland soil [J]. Agriculture and Technology, 2016, 36(7): 53-54. (in Chinese))
- [13] 孙天宇, 张丽萍, 费凯, 等. 林地土壤水源涵养多因素复合模拟研究: 以苕溪流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40 (8): 2707-2714. (SUN Tianyu, ZHANG Liping, FEI Kai, et al. Multi-factor composite simulation of soil water conservation in forest land: a case study of the Tiaoxi River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (8): 2707-2714. (in Chinese))
- [14] 刘世海, 余新晓. 北京密云水库库区水源涵养林冠层水文特征研究[J]. 林业科学, 2005 (1): 194-197. (LIU Shihai, YU Xinxiao. Hydrological properties of the canopy of water resource protection stands in the Miyun Reservoir Watershed, Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005 (1): 194-197. (in Chinese))
- [15] 罗航, 何介南, 康文星, 等. 湘南红壤区互叶白千层人工林枯落物层及土壤水源涵养能力研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41 (5): 102-109. (LUO Hang, HE Jienan, KANG Wenxing, et al. Water conservation capacity of litter and soil of melaleuca alternifolia plantation in red soil area, Southern Hunan [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41 (5): 102-109. (in Chinese))
- [16] 黄承标, 吴仁宏, 黎家春, 等. 三匹虎自然保护区森林枯枝落叶层及土壤层涵养水源功能分析[J]. 中国水土保持, 2009(7): 16-18. (HUANG Chengbiao, WU Renhong, LI Jiachun, et al. Function of water conservation in forest litter and soil layer of Sanpihu Natural Reserve [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009 (7): 16-18. (in Chinese))
- [17] 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 Gangshun, WANG Li. A review of water source forest research [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 1990 (4): 44-46. (in Chinese))
- [18] 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: 科学出版社, 1995.
- [19] BEKELE W, DRAKE L. Soil and water conservation decision behavior of subsistence farmers in the Eastern Highlands of Ethiopia: a case study of the Hunde-Lafto area [J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 437-451.
- [20] 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 Fei, FU Guo, XU Xiangqin, 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))
- [21] 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]. 生态学报, 2009, 28 (3): 529-534. (ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, et al. Water conservation function and its measure methods of forest ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28 (3): 529-534. (in Chinese))
- [22] 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 Shihan, XIAO Yang, ZHENG Hua, 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))
- [23] ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value [J]. Ecological Economics, 2008, 69(7): 1416-1426.
- [24] 程唱, 贺康宁, 俞国峰, 等. 干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究[J]. 生态学报, 2021, 41 (5): 1979-1990. (CHENG Chang, HE Kangning, YU Guofeng, et al. Comparative study on water conservation capacity of different forest types of artificial forest in arid and semi-arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41 (5): 1979-1990. (in Chinese))
- [25] 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 Junyu, LIU Gang, BAI Yang. 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))
- [26] 康萍, 郭秀明, 赵鹏权. 建设项目使用林地对林地生态效益影响的定量评价[J]. 湖南林业科技, 2019, 46 (2): 27-32. (KANG Ping, GUO Xiuming, ZHAO Pengquan. Quantitative evaluation of the forest ecological effects in construction projects using forestland [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2019, 46 (2): 27-32. (in Chinese))
- [27] 石丽娜, 赵旭东, 倪天茹, 等. 青海省三江源黄河源区地表水水质状况[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(4): 220-223. (SHI Lina, ZHAO Xudong, NI Tianru, et al. Quality of surface water in Yellow River headwater area of the origin of Three Rivers in Qinghai Province [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40 (4): 220-223. (in Chinese))
- [28] 姜龙, 董鑫, 古晓东. 四川省大熊猫国家公园植被覆盖度时空变化分析[J]. 四川环境, 2021, 40(4): 191-198. (JIANG Long, DONG Xin, GU Xiaodong. Spatial-temporal variation analysis of vegetation coverage in Giant Panda National Park in Sichuan Province [J]. Sichuan

- Environment,2021,40(4):191-198. (in Chinese))
- [29] 王芳,袁兴中,熊森,等. 重庆澎溪河湿地自然保护区生物多样性空间格局及热点区[J]. 应用生态学报,2020,31(5):1682-1690. (WANG Fang, YUAN Xingzhong, XIONG Sen, et al. Spatial patterns of biodiversity and hotspots in Chongqing Pengxi River Wetland Nature Reserve, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(5):1682-1690. (in Chinese))
- [30] 黄颖,李鑫. 1995—2015 年淮河生态经济区生态系统服务评估与时空变化分析[J]. 生态与农村环境学报,2021,37(1):49-56. (HUANG Ying, LI Xin. Ecosystem services evaluation and spatiotemporal analysis of Huaihe River Eco-economic Zone from 1995 to 2015[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021,37(1):49-56. (in Chinese))
- [31] 牛玉国,张学成. 黄河源区水文水资源情势变化及其成因初析[J]. 人民黄河,2005,27(3):31-33. (NIU Yuguo, ZHANG Xuecheng. Preliminary analysis on variations of hydrologic and water resources regime and its genesis of the Yellow River source region[J]. Yellow River,2005,27(3):31-33. (in Chinese))
- [32] 王欢,李栋梁. 黄河源区径流量变化特征及其影响因子研究进展[J]. 高原山地气象研究,2013,33(2):93-99. (WANG Huan, LI Dongliang. Research progress on variations and effectors of the runoff in the source region of the Yellow River[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,2013,33(2):93-99. (in Chinese))
- [33] 可素娟,王玲,杨汉颖. 黄河源区断流成因及其对策初探[J]. 水利水电科技进展,2003,23(4):10-13. (KE Sujuan, WANG Ling, YANG Hanying. Causes of Yellow River drying up in source region and countermeasures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2003,23(4):10-13. (in Chinese))
- [34] 尹云鹤,吴绍洪,赵东升,等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响[J]. 地理研究,2016,35(1):49-57. (YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010[J]. Geographical Research,2016,35(1):49-57. (in Chinese))
- [35] 王道席,田世民,蒋思奇,等. 黄河源区径流演变研究进展[J]. 人民黄河,2020,42(9):90-95. (WANG Daoxi, TIAN Shimin, JIANG Siqi, et al. Research progress of the evolution of runoff in the source area of the Yellow River[J]. Yellow River,2020,42(9):90-95. (in Chinese))
- [36] 张志强,刘欢,左其亭,等. 2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J]. 资源科学,2021,43(4):849-858. (ZHANG Zhiqiang, LIU Huan, ZUO Qiting, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019[J]. Resources Science,2021,43(4):849-858. (in Chinese))
- [37] 刘彩红,王朋岭,温婷婷,等. 1960—2019 年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. 干旱区研究,2021,38(2):293-302. (LIU Caihong, WANG Pengling, WEN Tingting, et al. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research,2021,38(2):293-302. (in Chinese))
- [38] 胡光印,董治宝,逯军峰,等. 黄河流域沙漠化空间格局与成因[J]. 中国沙漠,2021,41(4):213-224. (HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al. Spatial pattern of aeolian desertification and its causes in the Yellow River Catchment[J]. Journal of Desert Research,2021,41(4):213-224. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-09-15 编辑:熊水斌)

(上接第 5 页)

- [16] ZI D, WANG F J, YAO F Y, et al. Numerical simulation on rectifying flow in intake system of a pumping station connected with headrace pipe[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2016,49(3):032004. DOI:10.1088/1755-1315/49/3/032004.
- [17] 张春辉,奚斌,唐鹏,等. 泵站压力出水箱涵隔墩开孔优化研究[J]. 水电能源科学,2019,37(5):172-175. (ZHANG Chunhui, XI Bin, TANG Peng, et al. Optimization study of opening of diversion pier in pressurized effluent tank culvert of pump station[J]. Water Resources and Power,2019,37(5):172-175. (in Chinese))
- [18] 黄继宏,王晓升,张晓毅. 城市排水泵站前池导流墩整流措施的数值模拟[J]. 江苏农业科学,2013,41(5):360-362. (HUANG Jihong, WANG Xiaosheng, ZHANG Xiaoyi. Numerical simulation of the rectification measures for the diversion piers of the front basin of urban drainage pumping stations[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2013,41(5):360-362. (in Chinese))
- [19] 孔梁. 袁桥泵站进水前池整流改善研究[D]. 扬州:扬州大学,2020.
- [20] 罗灿,雷帅浩,陈锋,等. 泵站进水池翼型导流板整流特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4):53-59. (LUO Can, LEI Shuaihao, CHEN Feng, et al. Numerical simulation of rectifying characteristics of the airfoil deflectors in the sump of pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(4):53-59. (in Chinese))
- [21] 成立. 泵站水流运动特性及水力性能数值模拟研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- (收稿日期:2021-11-05 编辑:熊水斌)