

DOI: 10.5846/stxb201404140717

吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.

Lü Y H, Hu J, Sun F X, Zhang L W. Water retention and hydrological regulation: harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5191-5196.

水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务

吕一河*, 胡健, 孙飞翔, 张立伟

中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 水与生态系统的关系是重要的科学问题, 并且受到社会广泛关注。水源涵养和水文调节都是陆地生态系统所能提供的服务, 并从生态水文和水资源角度把生态系统的健康和完整性与人类社会的持续发展紧密联系起来, 从而也要求动态和综合的视角加以深入研究。基于生态水文过程原理, 对水源涵养和水文调节的概念进行了辨析, 认为前者是后者的有机组成部分, 相对具体、应用中务求精确明晰; 后者则更具包容性、客观性和广泛适用性。文章进一步简要分析了当前国内外生态系统水源涵养和水文调节服务的主导评估方法, 结果表明, 水源涵养的评估以储水量法为主, 而水文调节则以基于降水和蒸散的水量平衡法及综合模型法(如 SWAT)为主。从生态系统服务相互作用的角度考量, 实际上水源涵养和水文调节及其相关的其它服务类型(如固碳、土壤保持、生物生产、淡水供给等)存在着复杂的动态权衡或协同关系, 在科学研究和生态系统管理实践中必须统筹考虑, 以确保对科学问题的准确把握和促进“水-生态-社会系统”的高效、可持续发展。为此, 必须加强对生态水文过程的长期观测和实验研究, 并且关注空间异质性及尺度效应、时间动态性和利益相关者需求的多维性。

关键词: 生态系统服务; 权衡与协同; 生态水文过程; 时空变异性; 长期生态研究

Water retention and hydrological regulation: harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services

LÜ Yihe, HU Jian, SUN Feixiang, ZHANG Liwei

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The relationship between water and ecosystems, an important hotspot in the scientific fields, is highly concerned by the whole human society. Water retention and hydrological regulation are both key services produced by terrestrial ecosystems, which closely link the health and integrity of ecosystems and sustainable socioeconomic development that calls for dynamic and comprehensive perspectives for advancing the research paradigm. This paper firstly clarified the scientific concepts of water retention and hydrological regulation based on the principles of eco-hydrological processes. Water retention is the capacity of ecosystems to hold part of water input from precipitation at certain spatiotemporal scales, whereas, hydrological regulation is the capacity of ecosystems influencing the hydrological cycles across space and time. In fact, water retention is an integral component of hydrological regulation. The spatiotemporal variation of water retention can have important impacts on the roles of ecosystems in hydrological regulation services. The former is specific and should be used accurately, while the latter is more inclusive, objective, and widely usable. Then, a brief analysis on the assessment methods of the two hydrological ecosystem services was given in the paper. It was found that water storage estimation at different spatial scales was the staple method for the assessment of water retention service, whereas, water balance partition

基金项目: 国家科技支撑资助项目“祁连山区水源涵养功能监测及增贮潜力评估”(2012BAC08B01)

收稿日期: 2014-04-14; **修订日期:** 2014-11-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh@cees.ac.cn

based on precipitation and evapotranspiration and complex models (e.g., SWAT) were most widely used for hydrological regulation service assessment. Anyway, spatial scaling and temporal dynamics should be incorporated in ecohydrological monitoring, assessment, and modeling, which is a weak point in contemporary research and applications. From the ecosystem services interaction point of view, there are complex trade-offs and dynamic synergies among water retention and hydrological regulation and other relevant ecosystem services (e.g., carbon sequestration, soil conservation, biomass production, and freshwater provision). More and more hydrological monitoring and experiments indicated that water retention and hydrological regulation by terrestrial ecosystems do not necessarily contribute to the fresh water provision to human society. Vegetation cover increment (e.g., from grass to forests) usually reduce the river runoff and thus the availability of water resources to human use from the surface water sources. This reduction is resulted at least partly from the increased water retention by changed ecosystem condition. Actually, the increase of water retained by ecosystems contributes to their services, such as carbon sequestration, soil conservation, biomass production, other than fresh water provision to river channel and human society. This is one of the important reasons for the trade-offs concerning ecosystem and water resources management. The trade-offs should be considered comprehensively in scientific research and ecosystem management applications, which guarantee accurate scientific understanding of the related issues and facilitating highly effective and sustainable development of the "water-ecological-social systems". As a prerequisite, long-term ecohydrological observations and experimental researches should be strengthened. Meanwhile, more attention should be paid to the spatial heterogeneity, scale effect, temporal dynamics, and the multi-dimensionality of the demands from various stakeholders pertinent to water resources and ecosystem management in integrative analyses. The advancement of the eco-hydrological understanding on hydrological services of ecosystems and related trade-offs and synergies are crucial for informing more rational and effective ecological restoration, conservation, and ecosystem management actions taken place on the ground.

Key Words: ecosystem service; trade-off and synergy; ecohydrological processes; spatiotemporal variability; long term ecological research

随着联合国千年生态系统服务评估(MEA)成果的发布^[1-5],生态系统服务科学已经成为21世纪生态学研究的一大热点领域^[6]。MEA将生态系统服务分为四大类,包括支持服务、调节服务、产品提供服务和文化服务。而生态系统的水文服务大致隶属于调节(如水量、水质调节)和供给服务(如淡水供给)。在人口增长、城市化和经济发展对水资源需求不断提高以及气候变化影响的背景下,生态系统的水文服务对于人类社会发展和维持生态安全的作用日益显现,甚至变成稀缺资源而必须加以重点保护和管理。然而,从当前国内外研究文献中看,与生态系统水量调节服务相关的概念主要有两个,即水源涵养和水文调节。笔者于2014年3月25日分别以生态系统与水源涵养和生态系统与水文调节为关键词组合,在中国知网(<http://epub.cnki.net>)期刊全文数据库中搜索2000年以来发表文献摘要中出现上述关键词组合的文献数量分别为370篇和31篇;而在篇名中出现上述关键词组合的文献数量仅分别为24篇和1篇。可见,国内的学术研究中水源涵养比水文调节应用更广泛、认知和接受率更高。但是实际应用中,特别是在针对陆地生态系统的分析,就上述概念的理解也存在不一致性,从而引起了一定的混乱甚至偏颇。

因此,本文面向陆地生态系统,从概念、方法及服务相关性和服务需求的角度对水源涵养和水文调节展开综合分析,以期理顺关系,为陆地生态系统水文服务的研究和管理提供有益参考。人类和地球上其它所有生物的生存都需要水,同时水也是构成生命体的重要物质。生物物质中所含的水分约占地球淡水总量的万分之一^[7]。陆地生态系统是陆地上一定范围生物群落及其生存环境之间通过物质循环、能量流动和信息传递等过程综合作用形成的统一体。绿色植被在陆地生态系统中作为初级生产者发挥着关键作用,所以,本文主要参照具有一定植被覆盖的陆地生态系统类型,包括森林、草地、湿地(水体除外)和荒漠等,来展开相关问题的分析和讨论。

尽管生态系统服务的研究从评估、制图到综合模拟等发展都很快,但必须强调生态系统服务产生的基础仍然是生态系统的结构、过程和功能。所以,要想充分解析生态系统服务的复杂性,就需要从根本上强化生态系统服务提供和消费的机理研究(例如,生态系统结构、过程和功能的关系,生态系统服务产生和消费的时空尺度效应等),只有这样,生态系统服务的研究才能成长为一门“脚踏实地”的学问^[8]。实际上,生态系统的结构和过程决定着生态系统的功能表现,其关系客观存在而不以人的意志为转移。然而,生态系统服务是被人类认知,对人类具有使用价值的生态系统功能^[9]。可见,生态系统服务概念具有很强的功利性或人类中心主义色彩。在中文的语境中,水源涵养和水文调节的概念首先是生态系统表现出的一种水文功能,而且长期以来认为它们对于人类具有兴水利、减水害的重要价值。所以,本文分析的基本逻辑是站在生态水文过程 and 功能的立场上讨论水源涵养和水文调节作为重要生态系统服务的科学内涵、评估方法和相互关系等内容。

1 水源涵养与水文调节概念辨析

涵养,从文字本意的角度考察:涵,《说文》水泽多也;《扬子·方言》,沉也,又容也。养,《玉篇》,育也、畜也、长也;供养也,下奉上也。现代汉语中通常对涵养有两种解释:其一为能控制情绪的修养功夫,其二为蓄积并保持。基于语义的分析不难明确,生态系统的水源涵养(Water retention 或 Water storage)应该可以表述为:在一定时间和空间范围内,生态系统保持水分的过程和能力。所以,水源涵养概念里边就蕴含了几个关键要素,包括时空尺度、形成机理和定量表达。那么,要清晰刻画生态系统的水源涵养就需要进一步明确生态系统的类型和空间范围(包括水平的和垂直边界),核算的时间(瞬时、分钟、小时、天、旬、月、季、年等),水源涵养的形成过程及定量评估方法。所以,水源涵养是生态系统在一定的时空范围和条件下,将水分保持在系统内的过程和能力,在多种因素的作用下(如生态系统类型、地形、海拔、土壤、气象等)具有复杂性和动态性特征。

水文是自然界中水的各种变化和运动的现象。生态系统的水文调节服务(Water regulation)即可理解为,生态系统对自然界中水的各种运动变化所发挥的作用,表现为通过生态系统对水的利用、滤过等影响和作用以后,水在时间、空间、数量等方面发生变化的现象和过程。所以,生态系统的水文调节服务就是生态系统对水的运动变化施加这些影响和作用的过程和能力,具体可以通过水在时间、空间、数量等方面发生变化的幅度来表征。可见,水文调节与水源涵养相比,所表达的内容更广泛,是生态系统对水循环的各种影响和作用的总称,从这个意义上说,水源涵养应该是生态系统水文调节服务的一部分。

在垂直方向上,可以对陆地生态系统进行概化(图1),包括植被层、地被层、土壤层,那么生态系统发生水源涵养和水文调节作用的功能性边界应该是植被冠层顶部和植物根系能够影响到的土壤层(甚至母质)底部。所以,要评估生态系统的水源涵养和水文调节服务,就必须对上述空间层次中水的存量和流量形成的机理和过程进行深入、定量研究。

针对图1的水量平衡方程可以简单记作:

$$P = Q_e + ET + O \quad (1)$$

式中, P 为大气降水、 Q_e 为生态系统内的水分存量(水源涵养)、 ET 为生态系统水分蒸散消耗、 O 为生态系统的水分输出。若进一步细化, Q_e 可以拆解为几部分存量和流量的综合, ET 也可以拆解为土壤和地被物蒸发、植被蒸腾。

2 水源涵养与水文调节的评价方法

根据前述概念和原理,结合当前水源涵养评估的研究文献分析,认为不管是小尺度监测还是大尺度评估,通过储水量法来求取部分或全部 Q_e 都是较为严谨和明确的方法^[10-15]。比较理想的方法是同时考虑生态系统

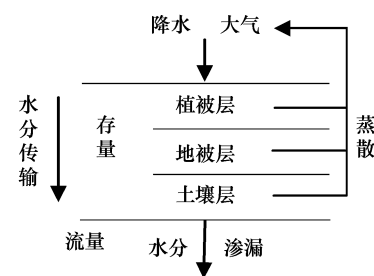


图1 陆地生态系统水源涵养和水文调节过程

Fig.1 Hydrological processes for water retention and regulation of terrestrial ecosystems

的所有储水层次,即所谓综合储水量法^[15-17]。但是,究其细节,各个储水分量中还有一些具体问题值得进一步推敲和深入研究,主要包括:(1)植被截留降水的观测或评估,基本上是一定监测或评估时段的平均概念,甚至简单认为就是多年平均的概念;(2)不论是枯落物还是土壤的蓄水,通常都监测的是最大值,也就是其持水能力、而不是现实的自然蓄水量,因此也就不能深入了解降水、截留、拦蓄等动态过程信息,从而不利于揭示生态系统水源涵养的动态过程和科学机理。以土壤水分为例,实际上土壤水分在降水随机脉冲过程驱动下表现出来的是相应的脉冲-衰减等阶段构成的非线性动态过程^[18]。并且,土壤的蓄水能力也存在一系列的阈值特征^[19],主要包括凋萎含水量、田间持水量、饱和含水量等,小于凋萎含水量的部分对植物生长无效,而大于田间持水量的部分不稳定性增强,在重力作用下向外输出,形成对地下水或径流的补给。所以,瞬时观测到的蓄水量与长期稳定的蓄水量会存在很大差异,在研究和评估水源涵养问题时,必须关注时间动态性及相关影响因素的作用,才有助于更好地揭示科学机理,提高评估的可靠性。

从概念和公式(1)可知,生态系统对降水-径流过程的所有影响都可以称为水文调节,例如降水-径流关系、径流过程的延迟、流域蓄渗能力等^[20]。事实上,当前的研究中也主要是基于水量平衡原理来定量分析和评估生态系统的水文调节作用。国内外文献中最常见的就是通过降水量减去蒸散量来推求栅格和区域尺度地表最大潜在可利用水量^[21-25]的水文调节能力评估方法。

另外一类主要方法是基于模型来模拟和预测不同尺度上生态系统水文调节的各个分量,其中最常见的为 SWAT 模型。例如,Notter 等^[26]采用 SWAT 模型并在校准和不确定性评价中辅以连续不确定性拟合模型(Sequential Uncertainty Fitting: SUFI-2),定量评估了坦桑尼亚和肯尼亚 Pangani 流域(4.3 万 km²)的生态系统水资源供给服务,结果表明流域的总体供水能力比较低,并且具有很高的空间变异性;平均状况看,在 95% 保证率下生活、养殖和工业用水供给只有 86—105 L 人⁻¹ d⁻¹,可以保证每户 1.2—1.5 hm² 生长期 3—6 月的大田作物生产需求(75% 可靠性水平),生长期更长在 6 月以上的经济作物生产只能满足每户 0.2—0.5 hm² 的用水需求。Glavan 等^[27]基于 SWAT 模型模拟和评估了 200a 来斯洛文尼亚地中海地区两个流域(Reka 和 Dragonja)土地利用对绿水(降水入渗并存储在土壤根层中的水量,通过蒸散支持植物的初级生产)、蓝水(超过土壤入渗和存储能力的降水对地表水或地下水形成补给的水量)流量及为人类供水储量的影响,结果表明土地利用变化对总水量和绿水量没有显著影响,而对季节的流量分配影响显著;在 Reka 流域,森林比例减少和草地及葡萄园的增加,对春夏两季的蓝水和绿水流量影响明显;在 Dragonja 流域,耕地减少和森林增加导致夏季绿水流量减少而蓝水流量增加。SWAT 模型实际上是一个综合性的半分布式模型,可以加深对整个流域水文过程及其影响因素(植被、土壤、地下水状况等)的理解,从而达到对径流、基流、土壤水、蒸散等水文过程参量的高精度模拟和预测^[28-29]。

3 水源涵养和水文调节的权衡与协同关系

水是生命之源,也是不同尺度上生态系统生物地球化学循环的重要驱动力和载体。而水在不同尺度生态系统中运移、转换的过程中产生着多种生态系统服务效应,它们之间有着复杂的相互作用关系。从水源涵养和水文调节来说,最大水源涵养量中可能会有一部分向径流和地下水转换,从而可以对下游产生淡水供给、径流调节等服务;稳定水源涵养量(如小于等于田间持水量的部分)主要用于植物生长发育的消耗(与绿水相当),从而发挥固碳释氧、小气候调节、生物多样性维持、生物质生产、甚至文化服务等效应,但是无法直接形成对人类社会有意义的水资源供给服务。所以,水源涵养与水文调节在形式上表现为先后隶属关系,而在生态系统服务提供上,则表现为权衡与协同并存的关系。所谓权衡,即生态系统在增加某种服务供给时,相应地削弱其它生态系统服务提供能力的现象^[30],协同就是生态系统在增加某种服务供给时也会同时增加对其它服务的供给。

可见,生态系统水源涵养能力强了(绿水增加),其水文调节作用相应提高,但并不意味着生态系统对人类的淡水供给能力增强,反而可能会降低生态系统对下游的淡水供给能力(蓝水减少)。全球范围内,这种现

象已经得到大量研究的支持。Yu 等在六盘山的研究表明,森林恢复和重建会减少径流,而且土层厚度在 70 cm 以内,随着土层增厚,减流效应增加^[31]。印度的一项研究也一定程度上证实了“入渗-蒸散权衡假说”,通过对热带天然常绿林、稀树草原(常绿林退化形成)、外来树种种植园三种覆盖类型的集水区对比观测分析表明,不同覆盖类型的降水入渗能力在权衡关系中居主导地位,决定着对地下水补给、枯水流量和干季流量^[32]。新西兰全国尺度的研究表明,新建森林能够减少 30%—50% 的径流,从而在流域尺度上抵消固碳和土壤保持增加的效益^[33];新西兰另一项集成性研究表明,健康的本地草原与其它生态系统类型相比产水量最大,22a 的对比流域实验显示人工森林恢复流域(1982 年在 310 hm² 流域的 67% 栽植松树)与天然草原为主的流域(218 hm²)相比可以减少年径流的 41%,两个流域产水量差异随恢复时间延长而增大,南非在降水量 1200 mm 区域的研究也有类似的趋势^[34]。在巴西的研究显示,宏观尺度上需要考虑气象气候条件的限制,人工林的生长主要取决于水资源条件,所以树种选择及相应管理对于节水非常重要;中观尺度上天然林的比例在减少和调控水资源利用上发挥着重要作用^[35]。美国的大尺度研究显示,流域尺度水文分解模型(Hydrological partitioning)可以区分降水中潜在和实际被植被利用部分的比例、能够体现植被水分限制和能量限制下的生态水文过程、以及植被对于干旱响应的差异性,从而对小尺度观测结果向较宏观尺度的推绎,以及量化生态水文过程对植被和气候变化的响应有重要意义^[36]。

4 结语

水源涵养和水文调节是生态系统休戚相关的水文服务,既有区别又有紧密联系,必须从降水-径流过程的角度加以甄别和深入研究。把水源涵养、水文调节,甚至生态系统养分调节和水质净化等服务类型混为一谈,对于生态水文过程的理解和深入研究,以及生态系统服务的分析都会产生不利影响。总体上,水文调节的概念包容性、客观性、适用性强,可以广泛应用。而水源涵养首先是生态系统的一项重要生态水文功能,在量上类似于“绿水”的概念,如果作为一项生态系统服务的话,人类获得的并不是淡水供给,而是生态系统在绿水支持下的其它产品和服务。所以,水源涵养的概念在使用中就要求更为精确明晰,以更好地开展学术研究并为生态系统保护、恢复和可持续管理实践提供科学基础。

水文调节和水源涵养与水资源安全息息相关,深入理解其变化过程和驱动机制,对于环境变化下的科学决策和有效管理至关重要。过去 20 年的观测和模型研究揭示了地球系统中存在着关键反馈过程,使得理解气候、土地利用或水管理的单独变化所带来的影响变得非常复杂,因为气候、生态过程、土地利用、水文过程和自然资源处于动态相互作用之中,引起水文水资源变化的任何一个过程都可能通过反馈影响到其它过程^[37]。因此,对生态系统水文调节和水源涵养服务的研究还是要从生态水文过程角度把握本质、加以深化,以更好地服务于生态系统管理和水资源安全的维持。为此,加强多尺度生态水文过程的观测与实验仍然是根本立足点^[38-39]。并且也需要更充分考虑生态系统水文调节和水源涵养服务与其它服务之间的权衡、协同关系,以及这些关系随着空间(不同区域、不同空间尺度)、时间(瞬时、日、旬、月、季、年、多年)和受益者的变化(例如,本地还是异地、短期还是长期、林业还是农业等)。

参考文献(References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Policy Responses. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Multiscale Assessments. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [6] Villa F, Voigt B, Erickson J D. New perspectives in ecosystem services science as instruments to understand environmental securities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 369(1639): 20120286, doi: 10.1098/rstb.2012.0286.
- [7] Shiklomanov I A. World Fresh Water Resources // Gleick P H. *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources* Oxford: Oxford University Press, 1993: 13-24.
- [8] Lü Y H, Liu S G, Fu B J. 2012. Ecosystem service: from virtual reality to ground truth. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(5):

- 2492-2493.
- [9] Spangenberg J H, Gorg C, Truong D T, Tekken V, Bustamante J V, Settele J. Provision of ecosystem services is determined by human agency, not ecosystem functions. Four case studies. *International Journal of Biodiversity Science Ecosystem Services and Management*, 2014, 10(1): 40-53.
- [10] 潘春翔, 李裕元, 彭亿, 高茹, 吴金水. 湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能. *生态学报*, 2012, 32(2): 538-547.
- [11] 甘先华, 郭乐东, 李召青, 周毅, 张卫强. 长潭省级自然保护区森林土壤孔隙贮蓄水分与现实吸持能力关系研究. *中国农学通报*, 2013, 29(13): 20-23.
- [12] 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. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(4): 453-458.
- [13] 鲜骏仁, 张远彬, 胡庭兴, 王开运, 杨华. 四川王朗自然保护区地被物水源涵养能力评价. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 47-51.
- [14] 张远东, 刘世荣, 罗传文, 张国斌, 马姜明. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征. *生态学报*, 2009, 29(2): 627-635.
- [15] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 周彬, 高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. *生态学报*, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [16] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 杨存建. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算. *生态环境学报*, 2013, 22(3): 451-457.
- [17] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 330-336.
- [18] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2013, 101: 122-128.
- [19] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth Science Reviews*, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [20] 王根绪, 李娜, 胡宏昌. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应. *气候变化研究进展*, 2009, 5(4): 202-208.
- [21] 肖强, 肖洋, 欧阳志云, 徐卫华, 向轼, 李勇志. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2014, 34(1): 216-223.
- [22] 赖敏, 吴绍洪, 戴尔阜, 尹云鹤, 赵东升. 三江源区生态系统服务间接使用价值评估. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 38-49.
- [23] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 盖力强. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 585-593.
- [24] Lu N, Sun G, Feng X M, Fu B J. Water yield responses to climate change and variability across the North-South Transect of Eastern China (NSTEC). *Journal of Hydrology*, 2013, 481: 96-105.
- [25] Bangash R F, Passuello A, Sanchez-Canales M, Terrado M, López A, Elorza F J, Ziv G, Acuña V, Schuhmacher M. Ecosystem services in Mediterranean river basin: Climate change impact on water provisioning and erosion control. *Science of the Total Environment*, 2013, 458-460: 246-255.
- [26] Notter B, Hurni H, Wiesmann U, Abbaspour K C. Modelling water provision as an ecosystem service in a large East African river basin. *Hydrological and Earth System Science*, 2012, 16: 69-86.
- [27] Glavan M, Pintar M, Volk M. Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments-lessons for the future. *Hydrological Processes*, 2013, 27(26): 3964-3980.
- [28] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, Abbaspour K C, White M J, Srinivasan R, Santhi C, Harmel R D, van Griensven A, Van Liew M W, Kannan N, Jha M K. SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2012, 55(4): 1491-1508.
- [29] Park G A, Park J Y, Joh H K, Lee J W, Ahn S R, Kim S J. Evaluation of mixed forest evapotranspiration and soil moisture using measured and swat simulated results in a hillslope watershed. *Korean Society of Civil Engineers, Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(1): 315-322.
- [30] Rodriguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, Cumming G S, Cork S, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28-28.
- [31] Yu P T, Wang Y H, Du A P, Guan W, Feger K H, Schwarzel K, Bonell M, Xiong W, Pan S. The effect of site conditions on flow after forestation in a dryland region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178-179: 66-74.
- [32] Krishnaswamy J, Bonell M, Venkatesh B, Purandara B K, Rakesh K N, Lele S, Kiran M C, Reddy V, Badiger S. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the "infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis". *Journal of Hydrology*, 2013, 498: 191-209.
- [33] Dymond J R, Ausseil A G E, Ekanayake J C, Kirschbaum M U F. Tradeoffs between soil, water, and carbon-A national scale analysis from New Zealand. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(1): 124-131.
- [34] Mark A F, Dichinson K J M. Maximizing water yield with indigenous non-forest vegetation: a New Zealand perspective. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2008, 6(1): 25-34.
- [35] Ferraz S F B, Lima W de P, Rodrigues C B. Managing forest plantation landscapes for water conservation. *Forest Ecology and Management*, 2013, 301: 58-66.
- [36] Brooks P D, Troch P A, Durcik M, Gallo E, Schlegel M. Quantifying regional scale ecosystem response to changes in precipitation: Not all rain is created equal. *Water Resources Research*, 2011, 47(10): W00J08, doi: 10.1029/2010WR009762
- [37] Dadson S, Acreman M, Harding R. Water security, global change and land-atmosphere feedbacks. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2013, 371: 20120412, doi: 10.1098/rsta.2012.0412.
- [38] Bachmair S, Weiler M. Interactions and connectivity between runoff generation processes of different spatial scales. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 1916-1930.
- [39] Templeton R C, Vivoni E R, Mendez-Barroso L A, Pierini N A, Anderson C A, Rango A, Laliberte A S, Scott R L. High-resolution characterization of a semiarid watershed: Implications on evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 2014, 509: 306-319.