

文章编号:1001-8166(2008)07-0707-06

流域绿水研究的关键科学问题*

李小雁^{1,2}

(1. 地表过程与资源生态国家重点实验室,北京师范大学,北京 100875;

2. 北京师范大学资源学院土地资源研究所,北京 100875)

摘要:阐述了开展流域绿水研究的重要意义,分析了流域绿水研究的关键科学问题:①绿水量的测算方法与尺度转换;②流域绿水流的形成、转化及其生态水文响应机理;③流域绿水资源评价与管理。指出流域水资源评价与管理要以降水为基本水资源,综合考虑蓝水和绿水两部分,协调流域上、中、下游生态、生产和生活用水,充分开发利用非生产性绿水资源,平衡自然生态和人类用水。

关键词:绿水;蓝水;水管理;流域

中图分类号:P33 **文献标志码:**A

1 引言

绿水概念是1995年瑞典水文学家 Falkenmark^[1]针对农业与粮食安全问题的提出,认为降水在陆地生态系统中被分割成两部分:蓝水(Blue water)和绿水(Green water)。蓝水是降水中形成地表水和地下水的部分,是可见的液态水流,包括河流、湖泊以及地下含水层中的水。绿水是降水下渗到非饱和土壤层中用于植物生长的水,是垂向进入大气的不可见水,可以认为是蒸散发(Evapotranspiration)^[1-3]。Rockstrom^[4,5]把植物蒸腾部分称为生产性绿水,它直接影响植物的生物量,而把土壤、地表填洼以及植物截留的蒸发通称为非生产性绿水。

从水循环的全过程和水量平衡的全要素来看,绿水是森林、草地、湿地和农田通过蒸散消耗掉的水量,它是支撑陆地生态系统和雨养农业生产的主要水源,在全球尺度上占总降水的65%,但却是被传统水资源评价忽略掉的水资源。传统意义上的水资源是占全球降水35%的蓝水,是可以被人类直接利用的地表水和地下水。然而,仅把蓝水当作水资源,则局限了人类对水资源的全面利用;绿水概念的提

出拓宽了传统水资源的范畴,更新了水资源的思维,是对水资源全面而更真实的理解,引起国际社会和科学家的广泛关注^[6,7],为解决全球水危机和粮食安全以及实现“联合国千年目标”提供了新的思路^[3]。

目前斯德哥尔摩国际水资源研究中心、国际农业发展基金和全球水系统项目组等已开展绿水在解决粮食安全等方面的研究工作,但国内仍未启动相关研究计划。在国内,程国栋^[6]率先详尽介绍了绿水的概念及其在陆地生态系统中的作用,并极力倡导开展我国绿水研究,将绿水资源纳入未来的水资源评价中。本文在总结国外已有研究的基础上,分析流域绿水研究的关键科学问题,为在国内开展绿水研究提供参考。

2 流域绿水研究的必要性

流域是最基本的水文地貌单元,它是以河流为中心,被分水岭所包围的区域。流域是水循环和人类开发利用水资源的完整系统,它是以水为纽带,由水、土、气、生等自然要素和人口、社会、经济等要素共同构成的自然、社会、经济的复合系统。流域也是

* 收稿日期:2008-05-05;修回日期:2008-05-22.

* 基金项目:全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目“半干旱区雨水集流系统主要水文过程与水循环调节机理”(编号:200426);国家自然科学基金项目“荒漠灌木树干茎流的集水机理与生态水文效应”(编号:40571023)资助。

作者简介:李小雁(1970-),男,甘肃静宁人,教授,主要从事干旱区水文与水资源研究。E-mail:xyli@ires.cn

各种水变化因素作用下的综合体,这些因素是降雨、蒸发、下渗、土壤湿度及地下水位等的时空分布与组合^[8]。在流域内,地表水和地下水之间、水量和水质之间、土壤和水之间、上游和下游之间、左岸和右岸之间、干流和支流之间、河道和坡岸之间,以及防洪和兴利之间,都存在着非常密切的关系^[9]。降水是流域内的陆地和水生生态系统的共同水源,也是自然和人类社会共享的水源。目前国内外绿水量估算大多集中在全球或区域大尺度上,精度不高,并且与实际流域水资源管理情况差距较大。因此,需要开展流域尺度的绿水研究,为平衡生态用水和人类用水,建立人与自然和谐的流域水资源管理体系提供科学依据。

我国的绿水资源总量约3.4万亿 m^3 ,占降水水资源总量的54%。绿水空间分布很不均衡,西北地区绿水占降水的比例在70%以上,而南方地区平均比例为48%,说明在我国西北干旱半干旱地区绿水资源的开发潜力较大^[10]。我国西北内陆干旱区位于亚洲中部,干旱少雨,水资源极度短缺,降水量仅为全国平均降水量的23.7%,径流深为全国平均径流深的11.3%^[11]。降水的空间分布极不均衡,过分集中于山区,一般可达300~700 mm左右,由此发育众多内陆河系,山区地表径流量基本代表每条河流或每一流域的总水资源量。在广大干旱平原区,水资源基本集中于平原河流网,降水量一般小于200 mm,蒸发量却高达2 000~3 000 mm以上^[12],绿水主要用于生态耗水。在黑河流域,绿水占有量达77%,其中非生产性绿水占52.4%^[10,12]。在内陆河流域,径流形成于上游山区,开发利用于山前中游灌溉绿洲带,而耗散于下游荒漠绿洲带,绿水和蓝水在不同生态带之间相互转化。程国栋等^[12]的研究结果表明在黑河流域23%的蓝水资源中,中游消耗达3/4,其中82%转化为绿水用于粮食生产,进入下游的蓝水量为 $7.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,实际下泄到额济纳旗的水量只有 $3 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8 \text{ m}^3$,这部分水中有71%转化成绿水维持非地带性植被的生长。同时,在干旱地区的内陆河流域,蓝水在降水中所占比例随着高山冰雪冻土带、高寒草甸带、森林草原草甸带、荒漠草原和干草原带依次减少,而绿水则依次升高^[10]。

由于在内陆河流域,降水从降落到陆地至出山断口形成径流的过程中,从上游到下游经历着多种不同且复杂的路径流动,受气候、土壤、植被和人类活动(土地利用/覆被变化、人工取水)等多种因素

影响,绿水和蓝水在不同生态带之间发生着复杂的转化,因此,需要开展内陆河流域绿水系统研究,为流域水资源的科学管理与可持续发展提供科学依据。

3 流域绿水研究的关键科学问题

3.1 绿水量的测算方法与尺度转换

尽管绿水研究近年来受到广大科学家的关注,但绿水在水资源管理、规划与政策实施方面显得无从下手,如何在水资源评价体系中体现绿水量以及如何和管理中实现绿水高效利用都成为难点问题,其中与之相关的关键科学问题是绿水量的准确测算。绿水量包括植物截留量、土壤蒸发、自由水面蒸发和植物蒸腾,这几个水文要素的形成过程和产生机理迥异,测量方法复杂,同时土壤蒸发和植物蒸腾分割很困难。目前国内外绿水量估算大多采用区域水量平衡和水分利用效率与产量的乘积来估算,精度不高,不能反映流域尺度绿水量及其时空变异特征对绿水流的影响。

绿水量的估算需要通过蒸散发的测定来实现,而蒸散发的测定方法较多,并且各有优缺点。蒸发器皿和小型蒸渗仪适合点上的蒸散发测定和估算,不能反映时空动态变化过程。波文比、涡度相关和热量平衡方法只能适合小范围的蒸散发估算,在流域尺度转换时存在问题。农业或水文气象站点的蒸发资料,其时空代表性的局限很大;采用水文方法计算的蒸散发值,又常是针对整个流域的年或季的结果,时空分辨率过于粗略。近年来遥感技术在流域尺度蒸散发估算方面的优势备受关注,遥感技术虽不能直接测量蒸散发,但比起传统的气象学和水文学方法,遥感技术有两方面重要作用:首先,遥感技术提供了外推站点测量或将经验公式应用到更大区域的方法,包括气象资料稀少的地区;其次,遥感资料可以用于计算能量和水分平衡中的变量,能够确定区域尺度上的日蒸散发量^[13]。因此,绿水测算及其不同尺度的转换需要结合地面观测和遥感方法来实现。Jewitt^[14]认为大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)和陆面能量平衡法(SEBAL)对估算南非流域尺度绿水量的效果很好,能够反映植被类型和土地利用类型的绿水流特征。LAS的工作距离为0.5~5 km,可以观测近地面数千米尺度上的感热通量,进而可推算潜热通量;同时它通过独立验证站点各项资料的分析,不仅可以对遥感算法(如SEBAL)的蒸散发作精度评判,也可对有关算法

的具体计算步骤,特别是对主要模型变量的参数化方案进行改进。王介民等^[15]报道了SEBAL被“全球环境基金(GEF)海河流域水资源与水环境综合管理”项目采用,计算从日到季和年,从每个县每种土地利用到全流域的蒸散发分布,取得较好的效果,并且认为通过遥感监测的蒸散发进行流域水资源管理(即力求在可持续发展的前提下,把流域的蒸散发降下来),才能实现真实节水,这事实上反映了通过绿水进行水资源管理的思路。

把绿水在量上进行生产性绿水和非生产性绿水分割具有很重要的意义,这样可以区分无效蒸发和有效蒸发所占的量和比例,确定通过水汽转换(vapor shift)提高绿水利用的潜力以及适宜的绿水资源管理方式。非生产性绿水也被称为白水^[16],包括植物截留、地表填洼和土壤蒸发。植物截留对流域的产汇流过程影响较大,而且与降雨特征参数和树冠结构密切相关。在热带雨林,树冠降水截留量可达年降水的30%以上;在干旱半干旱区,灌木和草地的降水截留量为年降水的10%~20%^[17]。然而,植物截留在干旱区水文分析中常常被忽略,通常被合并到土壤蒸发项中。土地利用方式/覆被变化影响植物截留过程,进而影响绿水和蓝水的转换以及绿水的有效利用,因此,有必要开展流域不同植被类型和土地利用方式对降水截留的影响研究,分析植物截留对绿水的贡献量及其生态功能。土壤蒸发(E)在计算中常常和植物蒸腾(T)集总于蒸散发(ET)项中,目前对于分离E和T的研究还不够,而且在研究方法、生态系统的类型和时间与空间方面均非常有限^[11]。土壤蒸发和植物蒸腾与土壤类型、气象条件和植物的生长阶段都有关系,在作物生长初期阶段,土壤蒸发比例较高,植物蒸腾所占比例较少;但随着植株的生长,土壤蒸发减少,植物蒸腾增加;因此需要全面系统研究不同作物和植被类型及其不同管理方式下蒸散规律以及土壤蒸发和植物蒸腾对绿水的贡献量。对于点尺度E和T的分割,树木蒸腾可以通过热脉冲和热电偶方法测定,但禾本科植物的蒸腾量测定存在困难,刘昌明等用大型称重式蒸渗仪与小型蒸发器相结合方法测定小麦蒸腾和棵间蒸发^[18,19]。流域尺度的E和T的分割仍是一个科学难题,“三温模型”结合遥感技术分别估算流域E和T的研究正在进行中,有望取得较好的结果^[20,21]。

3.2 流域绿水流的形成、转化及其生态水文响应机理

绿水代表水文循环的垂直通量部分,是建立在

以降水为基本淡水资源的基础上,从估算降水量开始,分析水在陆地生态系统中如何被分割成蓝水和绿水部分。降水在土壤表面有2个分割点:首先,降水被分割为坡面流和土壤入渗流;其次,入渗土壤水被分割为土壤蒸发、植物蒸腾和地下水补给量^[22]。绿水的空间异质性大,受气候、土壤、植被和土地管理等多种因素影响,绿水研究必须考虑与蓝水的相对独立与统一的关系,需要在以流域为整体统一单元的基础上,通过分析蓝水和绿水在流域上、中和下游的形成过程与相互转换关系和作用机制,才能建立合理的水资源管理模式。例如在我国干旱区内陆河流域,绿水和蓝水在流域上、中和下游不同生态带之间存在着非常复杂的转换关系,上游山区为蓝水(径流)形成区,绿水主要向蓝水转化,在平原区蓝水主要向绿水转化^[12]。上游的蓝水量和中游灌溉绿洲中蓝水向绿水的转化量都影响下游的蓝水和绿水利用量。由于流域水文循环和水量平衡各分量之间的变化和转化关系受气候变化和人类活动的影响较大,因此还需研究流域绿水流对全球变化和人类活动的响应和反馈机理。

绿水的贮存能力与土壤的物理性质密切相关^[12],需要加强土壤结构的定量化研究及其对绿水动态变化过程的影响研究,应用水文土壤学(hydropedology)的原理和理论在水平方向上研究微观尺度(土壤孔隙和团聚体)、中观尺度(土体或土链)和宏观尺度(流域、区域或全球)的绿水流变化特征,在垂直方向上研究不同下垫面包气带,即土壤根层(0~1 m)和地下水水面以上的深层非饱和土壤层的水分运移过程及其对绿水有效性的影响^[23~25]。

3.3 流域绿水资源评价与管理

绿水是降水下渗到土壤中而又通过土壤蒸发和植物蒸腾散发到大气中的气态流,它不能像地表水和地下水一样为人类作为开采资源加以直接提取、运输、利用和管理,但是可以通过一些间接的方法来开发利用。绿水研究还是一个崭新的研究方向,它的概念和研究范围正在发展之中,如何评价和管理绿水及其进行绿水资源化的研究还未真正展开。绿水是水文循环主要要素之一,同时又可以通过改变土地利用方式和种植结构进行调控,具有其它水资源共有的循环再生性和可调控特性,因此绿水可以看作是一种资源。

绿水和土壤水以及绿水资源和土壤水资源既有联系又有区别,土壤水和绿水首先是代表两个基本水文过程,即降水下渗并贮存到土壤中的水和土壤

水被蒸发和蒸腾掉的水,它们具有相同的来源(降水)。绿水只能是土壤水的一部分,可以说它是可以更新和被植物利用的土壤水,相当于田间持水量与凋萎含水量之间的一部分水,不包括凋萎系数以下的“死库容”土壤水(不参与水分循环的那一部分蓄量)。土壤水作为资源已被普遍认同,而关于土壤水资源的范畴迄今仍未得到统一,土壤水资源评价的内容和方法也不相同。绝大多数的研究者对土壤水资源的研究从农业角度出发,认为土壤水资源是指可被作物根系吸收利用的浅层土壤孔隙中的水,常利用土壤蓄水量来评价土壤水资源量^[26]。而绿水资源的评价和计算在垂直方向上应包括整个地下水水面以上的包气带,而不仅仅是土壤根层;同时绿水资源评价应像地表水资源一样,通过水文过程分析和水量平衡计算来实现,绿水资源评价可包括资源量计算及开发利用条件分析论证。流域多年平均可更新的绿水资源量可参考夏自强和李琼芳提出的土壤水资源评价方法^[27],通过多年平均蒸散发量计算来确定,因此蒸散发量的准确测算对绿水资源量的确定至关重要。绿水资源评价还需要查清绿水的空间分布和动态变化规律,分析不同土地利用/覆被和生态系统类型下绿水的年、季变化及其补给特征,计算流域绿水资源量的多年平均值,丰水、平水、枯水年出现的频率及相应水量,确定适合不同利用方式的绿水量。

可利用绿水资源量是绿水资源评价的另一个重要内容。在绿水中,白水部分是一种没有被利用的水资源量,但这部分水资源是可以为植被和作物利用的,是可开发利用的绿水的主要组成部分。白水中的土壤蒸发可以通过保水、节水和集水(如地表覆盖、滴灌和集雨补灌)等人工方法转化成可为植物利用的蒸腾流,提高绿水利用效率。一般来说,土壤的无效蒸发有2个阶段,一是休闲期的土壤蒸发,二是作物生长发育期的棵间土壤蒸发,而大量的土壤无效蒸发是发生在休闲期和作物的苗期,在北方地区,休闲期的土壤蒸发占全年总蒸散发量的60%以上。白水中的植物截留和地表填洼也可以通过调整土地利用方式、作物结构和耕作等转化成生产性绿水。在生产性绿水量中,即植物蒸腾量,是植被和作物生长发育过程中所利用的一部分水资源量,是植被和作物生存和发育必需的水量,它由两部分组成,一是植物或作物生长发育过程中必需的有效利用的散发量;二是植物或作物生长过程中对其生长发育不起作用的无效散发量,从更深层次的水资源

开发利用的观点来看,这也是可利用的绿水资源量,如可以通过抗蒸腾剂和保水剂提高绿水利用效率^[27]。因此可利用绿水资源量可通过土壤蒸发和植物蒸腾以及植物蒸腾量中无效散发量和有效散发量的分割来实现,这还需要系统深入的研究来解决。

流域水资源管理必须要关注水安全、粮食安全和生态安全,平衡自然生态和人类用水,促进流域水—生态—经济协调发展。目前需要扩展传统蓝水资源评价和利用方法,以流域降水为基本水资源总量,综合考虑绿水资源,构建以垂向“绿”水为中心的流域水循环模拟与绿水资源评价系统,建立流域上、中、下游绿水高效利用土地利用方式,提出流域尺度水资源综合管理模式。

4 结 语

绿水概念的提出为流域水资源管理提供了新的思路,流域水资源评价与管理要以降水为基本水资源,综合考虑蓝水和绿水两部分,协调流域上、中、下游生态、生产和生活用水,充分开发利用非生产性绿水资源,平衡自然生态和人类用水。本文在总结国外已有绿水研究的基础上,分析流域绿水研究的关键科学问题,为在国内开展绿水研究提供参考。

参考文献(References):

- [1] Falkenmark M. Coping with Water Scarcity under Rapid Population Growth [R]. Conference of SADC Minister, Pretoria, 1995.
- [2] Ringersma J, Batjes N, Dent D. Green Water: Definitions and Data for Assessment (ISRIC Report) [R]. Wageningen, 2003.
- [3] Falkenmark M, Rockström J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, 132(3): 129-132.
- [4] Rockstrom J. On-farm green water estimates as a tool for increased food production in water-scarce regions [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 1999, 24(4): 375-383.
- [5] Rockstrom J, Gordon L. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2001, 26(11/12): 843-851.
- [6] Cheng Guodong, Zhao Wenzhi. Green water and its research progresses [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(3): 221-227. [程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 221-227.]
- [7] Liu Changming, Li Yuncheng. Green water and water saving: Connotation of water resources in China [J]. *Impact of Science on Society*, 2006, (1): 16-20. [刘昌明, 李云成. “绿水”与节水: 中国水资源内涵问题讨论 [J]. 科学对社会的影响, 2006, (1): 16-20.]

- [8] Lei Yutao. Necessity and innovative countermeasures of water resource management in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(32):10 421-10 422. [雷玉桃. 我国水资源流域管理的必要性分析及其创新对策[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(32): 10 421-10 422.]
- [9] Huang Xiquan. Hydrology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993. [黄锡荃主编. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.]
- [10] Li Xiaoyan, Ma Yujun, Song Ran, *et al.* Assessment of the green water resource and its exploitation by rainwater harvesting techniques in the terrestrial ecosystem[J]. *Science & Technology Review*, 2007, 25(24): 52-57. [李小雁, 马育军, 宋冉, 等. 陆地生态系统绿水资源开发与雨水集流技术潜力分析[J]. 科技导报, 2007, 25(24): 52-57.]
- [11] Kang Ersi, Chen Rensheng, Zhang Zhihui, *et al.* Some scientific problems facing researches on hydrological processes in an inland river basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 940-953. [康尔泗, 陈仁升, 张智慧, 等. 内陆河流域水文过程研究的一些科学问题[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 940-953.]
- [12] Cheng Guodong, Zhao Chuanyan. Study on ecological water demand in arid area of northwestern China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(11): 1 101-1 108. [程国栋, 赵传燕. 西北干旱区生态需水研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1 101-1 108.]
- [13] Wu Xianing, Hu Tiesong, Wang Xiugui, *et al.* Review of estimating and measuring regional evapotranspiration[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(10): 257-262. [武夏宁, 胡铁松, 王修贵, 等. 区域蒸散发估算测定方法综述[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 257-262.]
- [14] Jewitt G. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, 31: 753-762.
- [15] Wang Jiemin, Liu Shaomin, Sun Minzhang, *et al.* Monitoring ET with remote sensing and the management of water resources on a basin scale[J]. *Arid Meteorology*, 2005, 23(2): 1-7. [王介民, 刘绍民, 孙敏章, 等. ET的遥感监测与流域尺度水资源管理[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 1-7.]
- [16] Savenije H H G. Role of Green Water in Food Production in Sub-Saharan Africa[R]. Rome: FAO, 1999.
- [17] Brooks K N, Ffolliott P F, Gregersen H M, *et al.* Hydrology and the Management of Watersheds[M]. Iowa: Iowa State University Press, AMES. 1991.
- [18] Carl C, Simmonds L P, Wallace J S, *et al.* Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 65: 159-173.
- [19] Liu Changming, Zhang Xiying, You Maozheng. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large-scale weighing lysimeter and micro lysimeter[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 10: 36-39. [刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. 水利学报, 1998, 10: 36-39.]
- [20] Qiu G Y, Ben-Asher J, Yano T, *et al.* Estimation of soil evaporation using the differential temperature method[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1999, 63: 1 608-1 614.
- [21] Qiu Guoyu, Wang Shuai, Wu Xiao. Three temperature (3T) model—A method to estimate evapotranspiration and evaluate environmental quality [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2): 231-238. [邱国玉, 王帅, 吴晓. 三温模型——基于表面温度测算蒸散和评价环境质量的方法 I. 土壤蒸发[J]. 植物生态学报, 2006, 30(2): 231-238.]
- [22] Falkenmark M, Rockstrom J. Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach to Ecohydrology [M]. EarthScan, UK, 2004.
- [23] Lin H S, Bouma J, Wilding L, *et al.* Advances in hydrology [J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 85: 1-97.
- [24] Lin H S, Bouma J, Pachepsky Y, *et al.* Hydrology: Synergistic integration of pedology and hydrology [J]. *Water Resource Research*, 2006, 42: 1-13.
- [25] Li Xiaoyan, Ma Yujun. Hydrology: A new interdisciplinary field related to soil science and hydrology [J]. *Science & Technology Review*, 2008, 28(9): 78-82. [李小雁, 马育军. 水文土壤学: 一门新兴的交叉学科 [J]. 科技导报, 2008, 28(9): 78-82.]
- [26] Wang Hao, Yang Guiyu, Jia Yangwen, *et al.* Connotation and assessment index system of soil water resources [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(4): 389-394. [王浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 土壤水资源的内涵及评价指标体系 [J]. 水利学报, 2006, 37(4): 389-394.]
- [27] Xia Ziqiang, Li Qiongfang. Study on soil water resource and its evaluating methodology [J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(4): 535-540. [夏自强, 李琼芳. 土壤水资源及其评价方法研究 [J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 535-540.]

Key Scientific Issues for Green Water Research in the Watershed

LI Xiaoyan^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *Institute of Land Resources, College of Resources Sciences and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: This paper highlighted the importance of research on green water in watershed and proposed key scientific issues for future studies: (1) Estimation or measurement of green water flow and scaling: Green water are considered to comprise both evaporation and transpiration components. The evaporation component is made up of evaporation of intercepted water evaporation from plant surfaces as well as free water surfaces and evaporation from the soil. There are challenges associated with estimating green water flow. First, difficulties exist in determining the spatial and temporal variation of evaporation over large areas. Secondly there are very few methods which allow for estimates of transpiration and evaporation separately. The promising methods for estimates of green water flow may be the application of the scintillation method and remote sensing combination. (2) Formation, transformation and ecohydrological impacts of green water flow in the watershed: Formation of green water is very complicated the in the upper, middle and lower reaches of the watershed due to human activities (land use/cover changes) and climate impacts; in the upper reach of the inland basin of China, green water is mainly transformed into blue water, but in the middle and lower reaches, blue water is mainly transformed into green water, both of them are interlinked in the hydrological cycle on the watershed scale. Researches should also pay attention to unsaturated zone and soil structure quantification for dynamic green water flow in the soil profile, and the spatial scale should include microscopic (*e. g.*, pores aggregates), mesoscopic (*e. g.*, pedons and catenas), and macroscopic (*e. g.*, watersheds, regional, and global) scales. (3) Assessment and management of green water flow: Assessment of green water includes total amount of green water and available green water, which still needs further study. In a word, we need to consider rainfall as the basic water resources and to incorporate green water and blue into integrity to harmonize water consumption for ecological, domestic and productive uses in the upper, middle and lower reaches of the watershed, thus fully exploiting nonproductive green water and balance water between nature and human.

Key words: Green water; Blue water; Water management; Watershed.