

拓宽思路, 科学评价水资源量

——以渭河流域蓝水绿水水资源量评价为例

徐宗学, 左德鹏

(北京师范大学 水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 对蓝水和绿水的内涵进行了梳理, 并对其评价方法进行了综合分析, 认为水文模型法是同时评价蓝水和绿水资源量时空变化特征的有效方法。在此基础上以渭河流域为例, 构建了渭河流域分布式水文模型 SWAT, 并采用 SUF2 算法进行参数敏感性分析、参数率定、模型验证以及不确定性分析。根据模型输出结果, 分别在水文响应单元、控制流域以及城市/地区尺度上对渭河流域近 50 年来的蓝水资源量、绿水流和绿水储量进行了综合评价, 以期为西北干旱缺水地区的水资源规划与管理以及水资源高效利用提供科学依据。

关键词: 蓝水; 绿水; 水资源; SWAT; 渭河

中图分类号: TV 213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0012-05

Scientific Assessment of Water Resources with Broaden Thoughts: A Case Study on the Blue and Green Water Resources in the Wei River Basin

XU Zong xue, ZUO De peng

(College of Water Sciences, Beijing Normal University; Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract: In this paper, the concepts of blue water and green water were reviewed and their assessment methods were analyzed comprehensively, which concluded that the hydrological model approach is considered as an effective solution to assess the characteristics of spatial and temporal variations of blue and green water resources. In order to quantify the available water resources in the Wei River Basin (WRB), a distributed hydrological model was developed using SWAT (Soil and Water Assessment Tool), and calibrated and validated using SUF2 (Sequential Uncertainty Fitting program) based on the river discharge in the WRB. Sensitivity and uncertainty analyses were also performed to investigate the model performance. The blue water resources, green water resources, and green water storage were evaluated at the scales of Hydrological Response Unit (HRU), river catchment, and city/region in the WRB during the past 50 years. The evaluation results can provide a scientific basis for the planning and management of water resources and optimal utilization of water resources in the water scarce region in the Northwest of China.

Key words: blue water; green water; water resources; SWAT; Wei River

可更新的淡水资源为保持陆地和水生生态系统健康的基础性自然资源^[1], 也是保证粮食安全以及生态安全的战略性资源, 用途十分广泛, 如工业、农业以及生活用水。20世纪, 由降水形成的可再生的淡水资源总量基本保持不变, 而人类用水需求却激增了 6 倍, 其主要用途为提高粮食产量与工业生产^[2-3]。与此同时, 生产生活用水挤占生态环境用水

的现象频发, 部分生态系统已严重退化, 危及生态安全。目前, 全球超过 6 亿人口生活在水资源严重短缺的地区(小于 500 m³/(人·年)^[4]。因此, 日益严峻的水资源短缺以及水资源脆弱性问题已成为众多学者研究的热点^[5-9]。

目前的水资源评价方法大多仅考虑水循环中的地表水和地下水, 即“蓝水”^[10-11], 却忽视了水循环中的“绿水”。综

收稿日期: 2012-12-25 修回日期: 2013-01-18 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1132.031.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279005); 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2009ZX07212-002-003); 科技部中瑞合作资助项目(2009DFA22980)

作者简介: 徐宗学(1962-), 山东淄博人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面研究, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

合考虑水文循环的全过程和水量平衡的全要素,通过森林、草地、农田和湿地蒸散作用消耗的绿水流占全球降水总量的65%,而传统的蓝水资源量仅占全球降水总量的35%^[12]。可见,绿水资源对于发展雨养农业及维持生态系统健康来说至关重要^[12,13]。因此,开阔思路,拓宽传统水资源评价范畴,科学评价蓝水绿水资源,并将绿水资源纳入水资源评价体系,对于水资源规划与管理,解决干旱半干旱地区的水资源短缺问题具有重要的现实意义。

在我国广大西北干旱地区以及华北地区,目前的蓝水资源量十分有限,但这些地区每年仍然以其独特的干旱气候生产了大量的优质农牧业产品,其中很大一部分来源于由有限降雨量所产生的绿水资源。如何拓宽思路,科学评估这一部分水资源量,从而为西北乃至整个华北、东北干旱地区的水资源利用和管理提供科技支撑迫在眉睫。正是基于这样的背景和思路,本文以位于西北典型干旱地区的渭河流域为例,在阐述蓝水绿水基本概念和内涵,并系统总结其主要应用成果的基础上,探讨了借助分布式水文模型科学估计和评价干旱地区蓝水绿水资源量的思路与方法,以期为相似流域的水资源评价和管理工作提供参考。

1 蓝水绿水内涵

蓝水和绿水的概念由国际水资源研究所的瑞典水文学家 Falkenmark 于 1995 年首先提出^[15],他认为降落在陆地生态系统的水量包括蓝水(Blue Water)和绿水(Green Water)两部分,其中,蓝水指由降水形成的地表水和地下水,是可见的液态水流,包括河流、湖泊和含水层中的水;绿水指由降水下渗到非饱和土壤层中供给植物生长的水,是垂向进入大气的不可见水。Falkenmark 于 2006 年结合绿水的物质性和资源性扩充了绿水的概念,他认为绿水可以分为绿水流(Green Water Flow)以及绿水储量(Green Water Storage)两部分。绿水流即实际蒸散发,由土壤和水体蒸发,植物散发两部分组成;绿水储量则是指储存在土壤中的水^[14]。

自此以后,相关学者先后对蓝水和绿水的概念进行了发展和完善。蓝水为存储在河流、湖泊以及含水层中的水,也即传统水资源评价中对于可利用水资源量的定义,即地表水和地下水资源量之和,并扣除两者的重复计算量。绿水的定义目前国际上有两种:物质上,绿水被定义为蒸散发流,即进入大气的水汽流,包括农田灌溉、湿地、水面蒸发、天然植被等不同地表的水汽流^[12,16,17];资源上,绿水被定义为源于降水且存储在土壤中并被植被散发消耗的水资源^[12,18,19]。

2 蓝水绿水资源评价方法

估算一段时间内的区域/流域蓝水绿水资源量可以为水资源规划与管理,以及解决水资源短缺问题提供一种新思路。估算蓝水资源量也即传统的水资源评价,其主要方法包括统计分析法和水文模型法。其中,统计分析法对数据需求量较大,需要收集研究区的水文气象、水文地质、水利工程以及取用水等数据;水文模型法较之统计分析法来说对于数据的需求相对较少。

估算绿水资源量的方法基本可以分成以下三类:生物学方法、水文模型法以及生物水文耦合法^[17]。

(1)生物学方法主要采用生态系统生产干物质消耗的水量,即需水量,来估算绿水资源量。该类方法根据净初级生产力数据与主要生态系统单位干物质生产所需蒸散量的乘积来估算绿水流。Postel 等^[5]采用净初级生产力数据,估算了全球非灌溉植被(天然森林、草地、人工林地和雨养作物)蒸散量,并得到其它主要土地利用类型的蒸散量,称其为绿水资源量。另一种生物学方法则是结合遥感影像和蒸散量观测值估算绿水资源量。Rockström 等^[20]采用森林、草地、林地以及湿地中各生物群系的覆盖面积乘以蒸散量,并根据影响蒸散量的生态系统属性将各生物群系统进而划分为若干个植被组,最终采用水分利用效率与作物产量之积来估算绿水流。

(2)水文模型法即采用水文模型来估算流域尺度的绿水流,将水资源划分为蓝水和绿水两部分,绿水表示土壤蒸发和植被散发所耗用的水资源,蓝水表示径流,从而建立研究区水文模型来估算绿水。Jewitt 等^[21,22]分别在小尺度和大尺度流域上采用农业集水区研究单元(Agricultural Catchments Research Unit, ACRU)模型以及水文土地利用变化(Hydrological Land Use Change, HYLUC)模型,估算了非洲南部 Mutale 流域九种土地利用情景下的蓝水绿水资源量。Schulz 等^[23,24]采用 ArcSWAT 模型并结合 SUFI2 不确定性分析算法估算了西非以及整个非洲大陆的月尺度蓝水绿水资源量。Faramarzi 等^[25]在伊朗构建了 ArcSWAT 模型模拟了月尺度蓝水绿水资源量,并考虑了水库运行以及不同灌溉措施对小麦产量的影响。Menzel 等^[26]在欧洲、非洲及中亚的七个代表性流域搭建了水文模型,并分析了这些流域现状年以及未来情景下的蓝水资源量。Liu 等^[27]采用具有二源潜在蒸散发模式的半分布式水文模型,研究了我国北方老哈河流域土地覆被变化对蓝水绿水资源量的影响。吴洪涛等^[28]使用 AVSWAT 模型在碧流河流域估算了绿水资源量,研究了绿水的时空分布规律以及气候变化情景下绿水的响应。

(3)生物水文耦合法根据地表面植被动态变化过程,考虑关键生态过程如初级生产力、植被生长、植被水分生产力、碳分配、死亡率以及植物对资源竞争的动态变化,借助陆-气、碳-水交换关系,将水文模型与生物地理学以及生物地球化学相耦合,从而估算绿水流。代表性模型为近些年得到快速发展的全球植被动态模型 Lund Potsdam Jena (LPJ) 模型^[3]。王玉娟等^[29]在黄河流域三门峡地区构建适用于估算流域尺度植被生态用水的生态水文模型,对三门峡地区 20 世纪 50 年代以来的植被生态用水量进行了定量模拟,计算出不同植被类型的绿水消耗量。Siebert 等^[30]采用全球作物需水模型(Global Crop Water Model, GCWM)对 1998 年-2002 年全球作物所需蓝水和绿水资源量进行了估算。

由于水文模型可以深入揭示地表过程和水文过程的机理,因此,被认为是模拟水文过程以及评价水资源时空变化特征的有效工具。综合分析蓝水绿水的估算方法可知,水文模型法是同时评价蓝水和绿水资源量时空变化特征的唯一方法。SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型^[31]是时间上连续的分布式流域水文模型,且在全世界得到了广泛应用^[23,32,37]。SWAT 模型因其能够直接输出蓝水和绿水资源量的各个分量,被认为是一种估算蓝水绿水资源量比较有效的方法。

3 流域蓝水绿水资源综合评价——以渭河流域为例

作为我国西北经济较发达地区,渭河流域在区域经济发展以及西部大开发中占据重要地位,并具有十分重要的战略意义^[38]。因此,综合评估渭河流域蓝水绿水资源量对于高效开发利用水资源,保护我国西部地区河流生态系统健康来说具有重要的现实意义。

本文以渭河流域为例,构建渭河流域分布式水文模型 SWAT,并借助 SUF2 算法进行参数敏感性分析、参数率定、模型验证以及不确定性分析,对渭河流域近 50 年来

(1964 年- 2008 年间)的可用水资源量进行了评价。首先在水文响应单元(HRU)尺度上估算水资源分量中的蓝水资源量、绿水流和绿水储量,然后在控制流域以及城市/地区尺度上对其进行时空变化特征分析,从而为西部缺水地区的水资源规划与管理,解决水资源短缺等问题提供新的思路。

3.1 HRU 尺度上蓝水绿水资源量

为了展示各水资源分量的空间分布,1964 年- 2008 年间 95PPU(95% Prediction uncertainty)不确定性区间的平均值被用来分析各个 HRU 上降水量、蓝水资源量、绿水流和绿水储量的空间分布,见图 1。

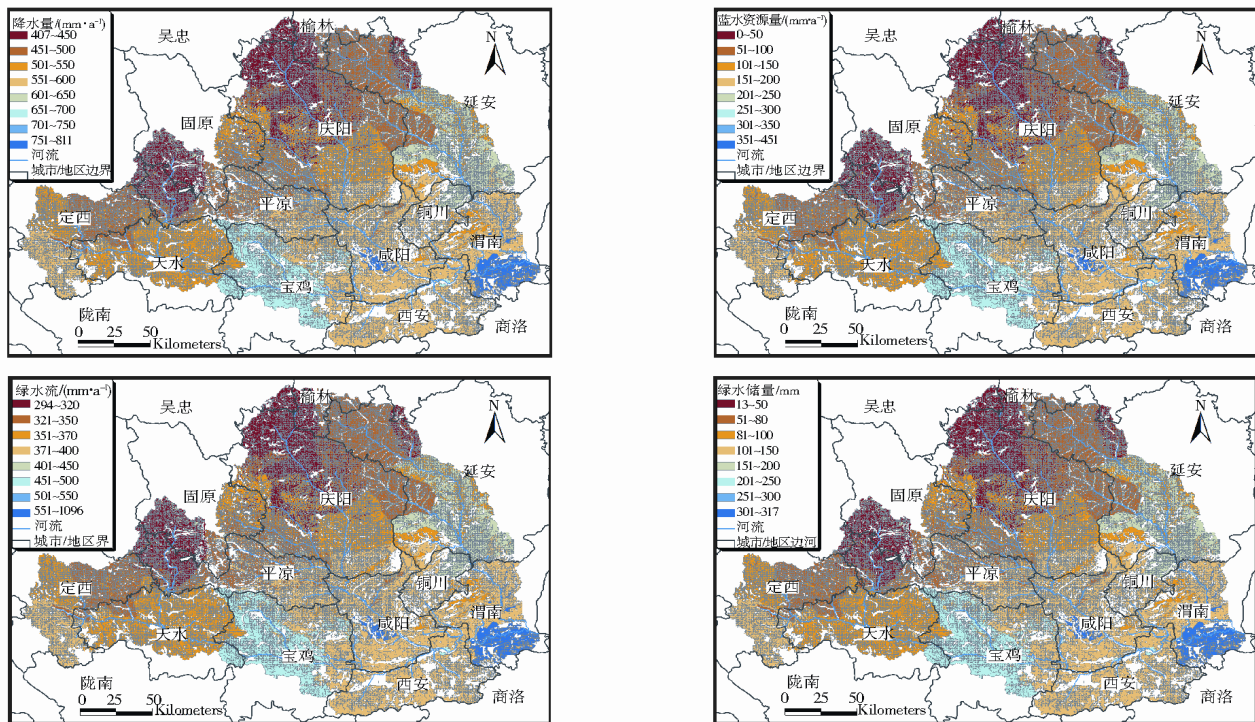


图 1 渭河流域 HRU 尺度上各水资源分量 95PPU 年均值空间分布

Fig. 1 Spatial distributions of the mean 95PPU range for different components of water resources at the HRU scale in the WRB

总体来看,整个渭河流域各个水资源分量均存在着较为明显的空间差异性。大部分地区正经受着严重蓝水资源短缺的威胁,尤其是流域北部的黄土高原地区。上游地区的蓝水资源量要少于下游地区。绿水流的空间分布和降水量的空间分布较为相似,均表现为由西北向东南递增。绿水储量的空间分布呈现较大的空间变异性,与降水和土地利用的空间分布图相比较后发现,植被覆盖较好,降水量较大的地区,绿水储量也相对较大,特别是在渭河和北洛河中游地区,表明这两个地区的降水量和绿水资源相对充足,这对于该地区雨养农业的发展十分有益。

3.2 控制流域尺度上的蓝水绿水资源量

除了空间分布以外,蓝水绿水资源量的年内以及年际变化对水资源规划与管理也非常重要。研究时段内渭河(干流)、泾河和北洛河流域蓝水资源量、绿水流和绿水储量的年际变化见图 2。渭河(干流)和泾河流域蓝水资源量略大于北洛河流域,且三个控制流域蓝水资源量自 20 世纪 60 年

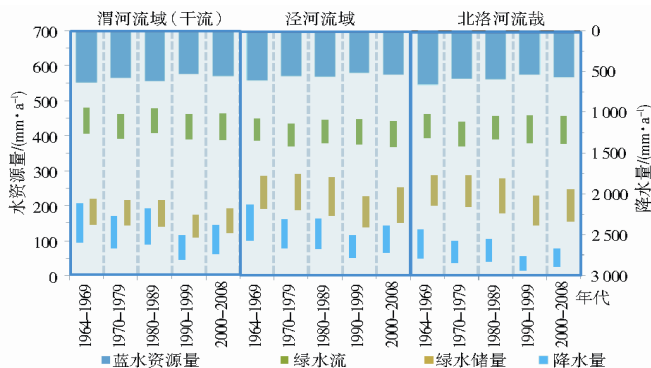


图 2 渭河流域不同水资源分量 95PPU 区间在控制流域尺度上的年代际变化

Fig. 2 Interdecadal variations of the 95PPU ranges for different components of water resources at the river catchment scale in the WRB

代至 21 世纪均呈显著减少趋势,并以 20 世纪 90 年代最少。降水量较大的年代,多年平均蓝水资源量的不确定性也较

大, Faramarzi 等^[25]在伊朗水资源评价研究中也得到类似结论。不同控制流域各年代的绿水流相对变化不大, 主要原因是蒸散耗水受土壤向根系输送水汽的能力所限, 此能力介于田间持水量与凋萎量之间, Schuol 等^[23-24]在非洲水资源评价研究中也给出类似结论。各控制流域绿水储量的时间变化趋势与蓝水资源量较为相似, 泾河流域和北洛河流域的绿水储量大于渭河(干流)流域。

图 3 显示了渭河(干流)、泾河和北洛河流域蓝水资源量、绿水流以及绿水储量近 50 年 95PPU 的年内变化过程。

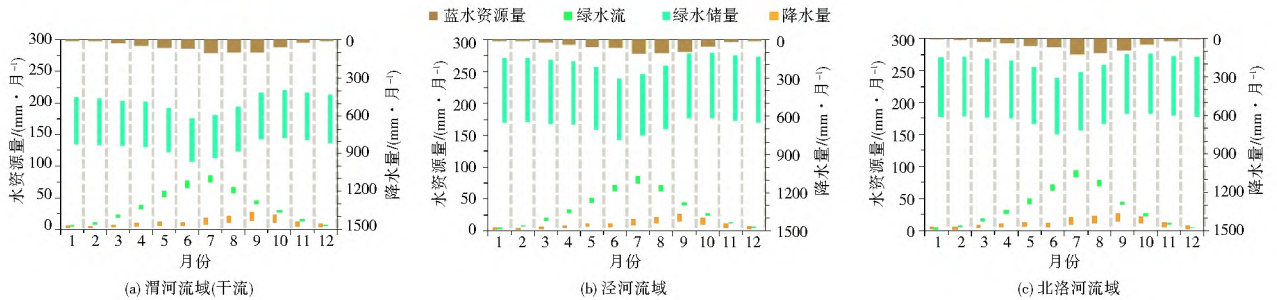


图 3 渭河流域不同水资源分量 95PPU 区间在控制流域尺度上的年内变化

Fig. 3 Monthly variations of the 95PPU ranges for different components of water resources at the river catchment scale in the WRB

3.3 城市/地区尺度上的蓝水绿水资源量

将蓝水资源量、绿水流以及绿水储量在渭河流域内的 15 个城市和地区进行计算, 分析蓝水绿水资源量在各行政区的变化, 见图 4。座落在流域出口附近的城市和地区拥有相对较多的蓝水资源量, 如渭南和商洛, 而位于渭河源区的城市和地区的蓝水资源量则相对较少, 如吴忠和榆林。蓝水资源量越大, 其不确定性也越大, 反之亦然。座落在渭河南岸的城市和地区的绿水流大于其它地区。西安市的绿水储量最小, 位于渭河北岸的延安、铜川、庆阳和平凉则蕴含着相对丰富的绿水储量。城市/地区尺度上得出的结论与 HRU 尺度以及控制流域尺度上得出的结论基本一致。

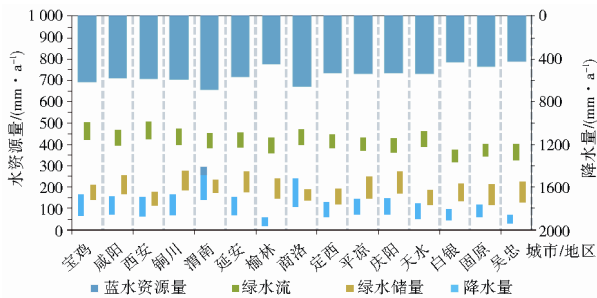


图 4 渭河流域不同水资源分量 95PPU 区间在城市/地区尺度上的多年平均值

Fig. 4 Average annual values of the 95PPU ranges for different components of water resources at the city/regional scale in the WRB

4 结论

本文对蓝水和绿水资源的内涵进行了梳理, 并对其评价方法进行了对比分析, 以渭河流域为例, 构建了渭河流域分布式水文模型 SWAT, 并采用 SUF2 算法进行参数敏感性分析、参数率定、模型验证以及不确定性分析, 基于模型输出结果在水文响应单元、控制流域以及城市/地区尺度上对渭

蓝水资源量在汛期(6月-10月)呈现较大不确定性, 表明蓝水资源量在汛期变异性较强, 其值在 9 月份达到最大值, 而非降水量最大的 7 月份, 降水量最大值与洪峰流量之间存在一定滞后现象。这是由于南部关中平原和北部黄土高原较多水量下渗被截留, 致使水量需要一定时间才能进入河道, 这也是绿水储量相对较大的原因。泾河和北洛河流域的绿水储量大于渭河干流, 说明这两个控制流域蕴含相对丰富的绿水储量。土壤水储量的多少对降水较少月份的农业耕种意义很大。三个控制流域的绿水储量在非汛期也相当可观。

河流域近 50 年来的蓝水资源量、绿水流和绿水储量进行了综合评价。得到以下结论。

(1) 渭河流域大部分地区蓝水资源严重短缺, 特别是黄土高原地区。渭河中游及北洛河下游地区降水量和绿水资源相对丰富, 利于发展雨养农业。渭河源区, 泾河上游及渭河中游地区蓝水资源量年际变化相对较大。

(2) 三个控制流域蓝水资源量均呈显著减少趋势, 20 世纪 90 年代达到最小值, 但降水量与绿水储量年代际变化不大。汛期蓝水资源量不确定性较大。泾河和北洛河流域绿水储量较渭河(干流)流域多。

(3) 渭河流域出口附近的城市和地区蓝水资源量相对较大, 而渭河源区的城市和地区蓝水资源量较小。渭河南岸城市和地区绿水流相对较大, 西安市绿水储量最小, 渭河北岸延安、铜川、庆阳及平凉的绿水储量相对丰富。

研究结果对水资源高效利用与合理配置, 科学制定耕种计划, 保护我国西部地区生态系统健康来说具有重要的现实意义, 从而为解决西北干旱半干旱地区的水资源短缺问题提供新的思路, 并为其它干旱和半干旱地区或流域的蓝水绿水资源量分析提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C. N., et al. Water in a Changing World [J]. *Ecological Applications*, 2001, 11 (4): 1027-1045.
- [2] Cosgrove, W. J., Rijsberman, F. R. *World Water Vision: Making Water Everybody's Business* [M]. UK: Earthscan/James & James, 2000.
- [3] Zehnder, A., Yang, H., Schertenleib, R. Water Issues: The Need for Action at Different Levels [J]. *Aquatic Sciences*, 2003, 65 (1): 1-20.
- [4] Pereira, L. S., Cordery, I., Iacovides, I. Coping with Water Scarcity:

- Addressing the Challenges[M]. Springer Verlag, 2009.
- [5] Postel, S. L., Daily, G. C., Ehrlich, P. R. Human Appropriation of Renewable Fresh Water[J]. *Science*, 1996, 271(5250): 785-788.
- [6] VÖÖsmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., et al. Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 284.
- [7] Yang, H., Reichert, P., Abbaspour, K. C., et al. A Water Resources Threshold and Its Implications for Food Security[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(14): 3048-3054.
- [8] Smakhtin, V., Revenga, C., DÖÖl, P. Taking into Account Environmental Water Requirements in Global Scale Water Resources Assessments[R]. Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat, 2004.
- [9] Oki, T., Kanae, S. Global Hydrological Cycles and World Water Resources[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [10] Shiklomanov, I. A. Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World: Assessment of Water Resources and Water Availability in the World[R]. Stockholm, Sweden: World Meteorological Organization, 1997.
- [11] Shiklomanov, I. A. Appraisal and Assessment of World Water Resources[J]. *Water International*, 2000, 25(1): 11-32.
- [12] Ringersma, J., Batjes, N. H., Dent, D. L. Green Water: Definitions and Data for Assessment[R]. Wageningen: ISRIC World Soil Information, 2003.
- [13] Gerten, D., Hoff, H., Bondeau, A., et al. Contemporary "Green" Water Flows: Simulations with a Dynamic Global Vegetation and Water Balance Model[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(6-7): 334-338.
- [14] Falkenmark, M., Rockstrom, 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 ASCE*, 2006, 132(3): 129-132.
- [15] Falkenmark, M. Coping with Water Scarcity under Rapid Population Growth[C]. Pretoria, 1995.
- [16] 李小雁. 流域绿水研究的关键科学问题[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(7): 707-712. (LI Xiaoyan. Key Scientific Issues for Green Water Research in the Watershed[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 707-712. (in Chinese))
- [17] 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. (CHENG Guodong, ZHAO Wen zhi. Green Water and Its Research Progresses[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(3): 221-227. (in Chinese))
- [18] Savenije, H. H. G. Water Scarcity Indicators: the Deception of the Numbers[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2000, 25(3): 199-204.
- [19] 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, 26(1): 16-20. (LIU Changming, LI Yun cheng. "Green Water" and Water Saving: Discussion on Issue for Connotation of Water Resources in China[J]. *Impact of Science on Society*, 2006, 26(1): 16-20. (in Chinese))
- [20] RockstrÖm, 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, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2001, 26(11-12): 843-851.
- [21] Jewitt, G., Schulze, R. E. Verification of the ACRU Model for Forest Hydrology Applications[J]. *Water SA*, 1999, 25(4): 483-490.
- [22] Jewitt, G. P. W., Garratt, J. A., Calder, I. R., et al. Water Resources Planning and Modelling Tools for the Assessment of Land Use Change in the Luvuvhu Catchment, South Africa[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29(15-18): 1233-1241.
- [23] Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., et al. Modeling Blue and Green Water Availability in Africa[J]. *Water Resources Research*, 2004, 44: W7406, DOI: 10.1029/2007WR006609.
- [24] Schuol, J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., et al. Estimation of Freshwater Availability in the West African Subcontinent Using the SWAT Hydrologic Model[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1-2): 30-49.
- [25] Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., et al. Modeling Blue and Green Water Resources Availability in Iran[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(3): 486-501.
- [26] Menzel, L., Matovelle, A. Current State and Future Development of Blue Water Availability and Blue Water Demand: A View at Seven Case Studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3-4): 245-263.
- [27] Liu, X., Ren, L., Yuan, F., et al. Quantitative the Effect of Land Use and Land Cover Changes on Green Water and Blue Water in Northern Part of China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(6): 735-747.
- [28] 吴洪涛, 武春友, 郝芳华, 等. 绿水的多角度评估及其在碧流河上游地区的应用[J]. *资源科学*, 2009, (3): 420-428. (WU Hongtao, WU Chunyou, HAO Fanghua, et al. Assessment of Green Water from Multiangle View at Catchment Scale[J]. *Resources Science*, 2009, 31(3): 420-428. (in Chinese))
- [29] 王玉娟, 杨胜天, 刘昌明, 等. 植被生态用水结构及绿水资源消耗效用——以黄河三门峡地区为例[J]. *地理研究*, 2009, 28(1): 74-84. (WANG Yujuan, YANG Shengtian, LIU Changming, et al. The Analysis on the Pattern of Ecological Water Use of Vegetation and the Availability of Green Water in Sanmenxia Area of Yellow River[J]. *Geographical Research*, 2009, 28(1): 74-84. (in Chinese))
- [30] Siebert, S., Doll, P. Quantifying Blue and Green Virtual Water Contents in Global Crop Production as Well as Potential Production Losses Without Irrigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3-4): 198-217.
- [31] Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [32] Arnold, J. G., Allen, P. M. Estimating Hydrologic Budgets for Three Illinois Watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 176(1-4): 57-77.
- [33] Moon, J., Srinivasan, R., Jacobs, J. H. Stream Flow Estimation Using Spatially Distributed Rainfall in the Trinity River Basin, Texas[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(5): 1445-1451.

(下转第 49 页)

- 京:清华大学,2011.(MA Huan. Hydrological Changes in Typical Catchments of the Hai River Basin under the Influence of Human Activity [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [9] 贾仰文,王浩,倪广恒. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.(JIA Yang wen, WANG Hao, NI Guangheng. Distributed Hydrologic Model Theory and Practice[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 裴源生,赵勇,张金萍. 广义水资源合理配置研究[I]—理论[J]. 水利学报,2007,38(1): F7. (PEI Yuan sheng, ZHAO Yong, ZHANG Jin ping. Study on Rational Deployment of Generalized Water Resources I—theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): F7. (in Chinese))
- [11] 赵勇,陆垂裕,肖伟华. 广义水资源合理配置研究(II)—模型[J]. 水利学报. 2007, 38(2): 163-170. (ZHAO Yong, LU Chuiyu, XIAO Weihua. Study on Rational Deployment of Generalized Water Resources II—model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 163-170. (in Chinese))
- [12] 中国水利水电科学研究院. 国家重点基础研究发展规划项目“黄河流域水资源演化模型与可再生性维持机理研究”第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”(G1999043602)[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2004. (China Institute of Water Resources and Hydropower Research. The Second Topic "The Yellow River Water Resources Evolution Rules and Binary Evolution Model" of "973" Plan "the Yellow River Water Resources Evolution Model and Reproducibility Maintaining Mechanism Research" (G1999043602) [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004. (in Chinese))
- [13] 刘昌明,郑红星. 黄河流域水循环要素变化趋势分析[J]. 自然资源学报,2003,18(2): 129-135. (LIU Chang ming, ZHENG Hongxing. Trend Analysis of Hydrological Components in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 129-135. (in Chinese))
- [14] 刘昌明. 黄河流域水循环演变若干问题的研究[J]. 水科学进展,2004,15(5): 608-615. (LIU Chang ming. Study of Some Problems in Water Cycle Changes of the Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5): 608-615. (in Chinese))
- [15] 王浩,贾仰文,王建华,等. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探[J]. 自然资源学报,2005,20(1): 157-162. (WANG Hao, JIA Yang-wen, WANG Jian-hua, et al. Evolutionary Laws of the Yellow River Basin's Water Resources under the Impact of Human Activities [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1): 157-162. (in Chinese))

(上接第16页)

- [34] Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K. C., et al. Hydrological Modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical Model Formulation and Bayesian Inference [J]. Journal of Hydrology, 2007, 340(3-4): 167-182.
- [35] Zhang, X. S., Srinivasan, R., Debele, B., et al. Runoff Simulation of the Headwaters of the Yellow River Using the SWAT Model with Three Snowmelt Algorithms [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(1): 48-61.
- [36] Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., et al. Assessing the Impact of Climate Change on Water Resources in Iran [J]. Water Resources Research, 2009, 45: W10434, DOI: 10.1029/2008WR007615.
- [37] Xu, Z. X., Zhao, F. F., Li, J. Y. Response of Streamflow to Climate Change in the Headwater Catchment of the Yellow River Basin [J]. Quaternary International, 2009, 208(F2): 62-75.
- [38] Zuo D. P., Xu Z. X., Yang H., et al. Spatiotemporal Variations and Abrupt Changes of Potential Evapotranspiration and Its Sensitivity to Key Meteorological Variables in the Wei River Basin, China [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(8): 1149-1160.
- [39] 徐宗学,左德鹏. 渭河流域蓝水绿水资源量多尺度综合评价[C]. 第二届全国水资源合理配置与优化调度技术交流研讨会,西安:2012. (XU Zong-xue, ZUO De-peng. Assessment on Blue and Green Water Resources at Different Scales in the Wei River Basin [C]. The 2nd Symposium on National Water Resources Rational Allocation and Optimal Scheduling Technology, Xi'an: 2012. (in Chinese))