

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0040

杜军凯, 贾仰文, 郝春洋, 等. 太行山区蓝水绿水沿垂直带演变规律及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 64-73. DU J K, JIA Y W, HAO C F, et al. Evolution law and attribution analysis of vertical distribution of blue water and green water in Taihang mountain region[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 64-73. (in Chinese)

# 太行山区蓝水绿水沿垂直带演变规律及其归因分析

杜军凯<sup>1</sup>, 贾仰文<sup>1</sup>, 郝春洋<sup>1</sup>, 李晓星<sup>2</sup>, 仇亚琴<sup>1</sup>, 牛存稳<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:**以太行山区(华北平原水源地, 分属黄河流域和海河流域)为研究对象, 建立了分布式水文模型 WEP-L (Water and Energy transfer Processes in Large river basins), 模拟了1980-2000年间山区的水循环过程, 总结了蓝水(径流性水资源)和绿水的年际及随高程的变化规律。在此基础上, 定量区分了研究区气候波动和土地利用/覆盖变化对蓝水与绿水变化的贡献。研究结果表明: (1) 太行山两侧的蓝绿水变化具有明显的差异; 海河片区蓝水呈增长趋势, 绿水呈下降趋势; 黄河片区蓝水呈减少趋势, 绿水呈增长趋势。 (2) 太行山区蓝水资源量变化的主导因素是气候波动。 (3) 土地利用/覆盖的改变是太行山区绿水变化的决定性因素。植被增多可增加绿水资源的利用, 但同时将明显减少对经济社会发展非常重要的蓝水资源量。因此, 山区国土资源开发与空间优化须重点考虑蓝水和绿水的合理调控。

**关键词:** 蓝水; 绿水; 太行山; 高程; 归因分析

**中图分类号:** TV 213    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0064-10

## Evolution law and attribution analysis of vertical distribution of blue water and green water in Taihang mountain region

DU Junkai<sup>1</sup>, JIA Yangwen<sup>1</sup>, HAO Chunfeng<sup>1</sup>, LI Xiaoxing<sup>2</sup>, QIU Yaqin<sup>1</sup>, NIU Cunwen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

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

**Abstract:** With Taihang mountain region (TMR, water source district of the North China Plain) as the object of research, we established the WEP-L (Water and Energy transfer Processes in Large river basins) model to simulate the water cycle process in the TMR, and analyzed the impacts of climatic fluctuation and land cover change on the variation of blue water and green water from 1980 to 2000. The results showed that there was a clear distinction between the distribution of blue water and green water in the Hai River basin part (HRBP) and that in the Yellow River basin part (YRBP). In HRBP, the blue water tended to increase and the green water tended to decrease; whereas in YRBP, they showed the opposite trend. Climatic fluctuation was the leading cause of the blue water decrease in the Taihang mountain region. The land use/cover change was the determining factor of green water variation. The expansion of vegetation would increase green water resources but it would significantly reduce the blue water which is crucial for economic and social development. The resource development and space optimization of the mountain region should give main consideration to the reasonable regulation of blue water and green water.

**Key words:** blue water; green water; Taihang mountain; elevation; attribution analysis

收稿日期: 2017-09-19    修回日期: 2018-01-19    网络出版时间: 2018-02-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180131.1512.002.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452701); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0401301; 2017YFC0405803)

Funds: National Key Research and Development Program of Basic Research(2015CB452701); National Key Research and Development Program of China during the Thirteenth Five year Plan Period(2016YFC0401308; 2017YFC0405800)

作者简介: 杜军凯(1987-), 男, 河南禹州人, 博士研究生, 主要从事水循环和水文模拟方面研究。E-mail: 376409961@qq.com

瑞典 Malin Falkenmark 教授在 1993 提出了“绿水(green water)”的概念,蓝水和绿水概念的提出为流域水资源的评价、管理和规划提供了一种新的思路。在国际上,蓝绿水的概念体系和评价方法仍处于初期发展阶段,但蓝绿水评价已在水与粮食安全和水文水资源领域逐渐得到高度重视<sup>[1-5]</sup>。斯德哥尔摩国际水资源研究中心(SIWI)、联合国粮食农业组织(FAO)、国际水资源管理研究所(IWMI)、国际农业发展基金(IFAD)、全球水系统项目组(GWSP)等国际机构和组织已经开始致力于绿水研究。对蓝水的评价方法包括统计分析法和水文模型法,对绿水的评价方法分为生物学法、水文模型法和生物水文耦合法<sup>[6-7]</sup>。在各种研究方法中,水文模型法具有明显的优势,可评估蓝水绿水资源的变化趋势和时空分布特征。对蓝水绿水的研究的前提是准确界定蓝绿水的概念和边界,借鉴贾仰文等<sup>[8]</sup>提出的概念,本文将“蓝水”定义为径流性水资源,将绿水定义为植物系统以蒸散发的形式输送到大气的水汽流,即植被系统(包括林地、草地和耕地)利用的雨水。

目前对蓝水绿水的研究偏宏观,多数集中在大尺度的区域、流域乃至全球系统<sup>[9-15]</sup>,尚缺少针对典型山地区域的蓝绿水研究。中国是一个多山地的国家,广义的山区(山地、丘陵和高原)占全国土地总面积的 69%。与平原区相比,山地区域的水循环过程具有明显的垂直地带性,因此,在垂直带上揭示蓝绿水分布特点和变化规律,将推动对山地水文过程研究。

太行山是中国东部地区的重要山脉和地理分界线,西侧为黄土高原,东侧华北平原。华北在全国政治、经济和文化领域占有非常重要的地位,但又是水资源和环境形势十分严峻的地区<sup>[16-17]</sup>,随着经济社会的发展,这一问题愈加严重。太行山区是华北平原的主要水源地,研究气候变化、土地利用/覆盖变化影响下,山区蓝绿水的时空变化规律,厘清气候变化和下垫面变化对蓝绿水的影响,将有限的水资源在人类社会和生态系统之间合理分配,对经济社会的可持续发展和生态系统的良性运转有着十分重要的意义。

本文拟借助 WEP-L(Water and Energy transfer Processes in Large river basins)模型模拟太行山区水循环与能量循环过程,目的有:(1)揭示山地区域蓝绿水在垂直地带上的分布规律与变化特性;(2)对山地区域蓝绿水变化进行归因分析,以定量区分气候变化和下垫面变化对蓝绿水的影响。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

太行山脉北起北京市西山,向南延伸至河南与山西交界地区的王屋山,西接山西高原,东临华北平原,呈东北-西南走向,绵延 400 余 km。它是中国地形第二阶梯的东缘,也是黄土高原的东部界线。太行山区面积约 12.78 万 km<sup>2</sup>,地处北纬 34°36′-40°47′,东经 110°10′-116°35′之间,行政范围纵跨北京、河北、山西、河南 4 省(市),流域范围跨海河流域与黄河流域两个水资源一级区,其中太行-海河片区面积约 8.65 万 km<sup>2</sup>,太行-黄河片区面积约 4.13 万 km<sup>2</sup>;研究区位于中国半湿润区与西部半干旱区过渡带,主要分布有落叶阔叶林、常绿针叶灌木林、针阔混交林、人工林、落叶灌丛和草坡等植被类型。山区属大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷少雨,多年平均降水量在 600 mm 左右,年内分配不均。主要水系包括位于山区西部的黄河干流以及沁河、丹河等支流,以及位于山区东部的潮白河、永定河、大清河、滹沱河、滏阳河、漳河等,研究区地理范围和水系分布见图 1 和图 2。

### 1.2 数据来源

本文建立 WEP-L 模型需要的 DEM 数据来自于美国地质调查局(USGS)的 EMOS 数据中心建立的分辨率为 30″的全球陆地 DEM(GTOPO30)。气象数据(降水、气温、相对湿度、风速、日照时间等)来源于气象部门和水利部门的逐日实测资料(1980-2000),其中海河片区选用 536 个站点,黄河片区共选用 904 个站点。土地利用/覆盖数据来源于国际科学数据共享平台,包括 1980 年、1995 年 2 个时相(见图 1),以及 1980-2000 逐旬的 NOAA/AVHRR 影响提取结果。土壤及其特征信息采用全国第二次土壤普查资料,分辨率为 1:10 万。流量数据来源于水利部门的水文站实测资料,海河片区共选用 356 个站点,黄河片区共选用 132 个站点。

## 2 研究方法

### 2.1 WEP-L 分布式水文模型介绍

WEP-L 模型<sup>[18]</sup>是从 WEP(Water and Energy transfer Process)模型<sup>[18]</sup>发展而来的,可用于大尺度水文模拟,已在多个流域得以成功应用<sup>[18-23]</sup>。该模型主要有以下几方面特点:(1)综合了分布式流域水文模型和陆面地表过程模型(SVATS 模型)的各自优点,实现了水循环与能量交换过程的耦合模拟,对每个计算单元各类土地利用的植被冠层及

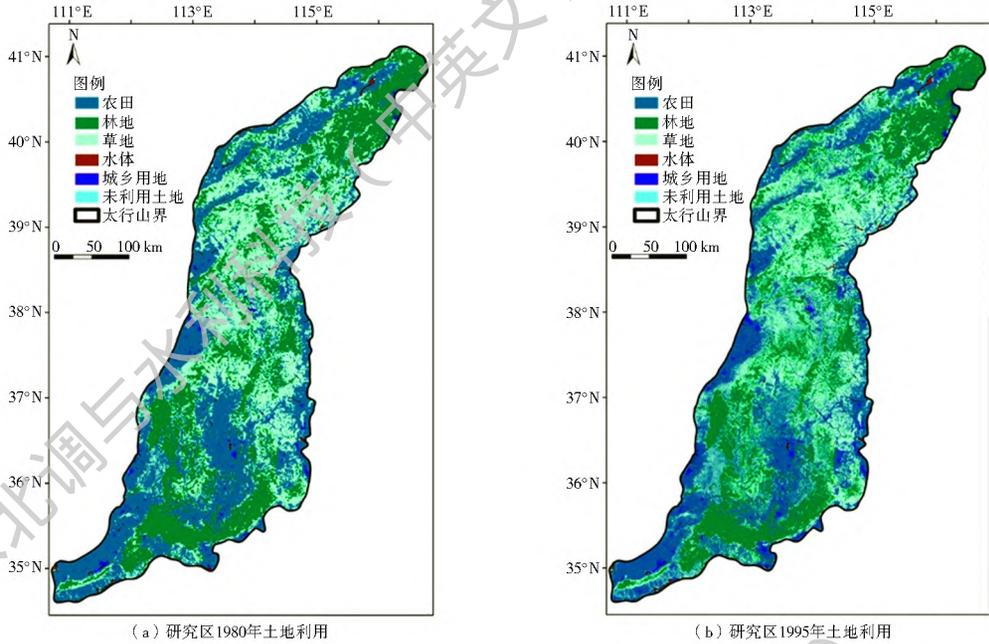


图 1 研究区地理范围与土地利用(1980 年和 1995 年)

Fig. 1 Geographical scope and land use of the Taihang Mountain Region (in 1980 and 1995)



图 2 研究区子流域划分

Fig. 2 Sub-basin division of the Taihang Mountain Region

过程的特点,采用“变时间步长”(如强降雨入渗产流过程采用 1 h,坡地与河道汇流过程采用 6 h,而地下水运移过程采用 1 d 等)进行模拟计算,既保证了水循环动力学机制的合理表述又提高了计算效率;(4)在产汇流计算中体现了变水源区(VSA)理论,能够模拟超渗、蓄满和泉水溢出等各种产流机制的产汇流过程,并做到了“地表水、地下水以及土壤水的联合动态计算”;(5)与集总式水资源调控模型进行交互反馈,实现天然主循环系统与人工侧支系统的紧密耦合;(6)计算速度快(全黄河流域一年模拟时间 11 min),可用于长系列连续模拟计算。

由于 WEP-L 模型基于水循环物理机制和生态水文机理,其参数可根据下垫面物性值推算,并对水循环要素过程进行详细模拟,具有进行各种下垫面和气象条件下的水资源评价和预测的潜力。

## 2.2 模型的构建与验证

因两个片区分属不同的集水区,相互之间无水力联系,故在两个集水区分别构建分布式水文模型,二模型可独立运算并汇总统计,从而实现对整个研究区水循环过程的模拟。基于 WEP-L 模型,本研究将太行山区划分为 1 634 个子流域,7 351 个基本计算单元(等高带)。其中海河片 1 127 个子流域,5 096 个等高带,黄河片区 507 个子流域,2 435 个等高带,子流域划分结果详见图 2。

采用观测数据对模型模拟的逐月径流过程进行了验证,结果表明,模型水量相对误差控制在 10% 以内,Nash 效率系数为 0.7 以上,相关系数在 0.8

地表截留蒸发、裸地及棵间土壤蒸发、水面蒸发和植被蒸腾等进行了详细计算;(2)以“子流域内等高带”为计算单元,并用“马赛克”法考虑计算单元内土地覆被的多样性,既避免了“大流域粗网格”带来的水量平衡失真与汇流路径失真问题,又能够合理表述水文变量空间变异特征;(3)针对各水循环要素

以上,模型的模拟结果较好。图3给出了黄河片区武陟站(位于沁河干流)逐月实测径流过程的验证结果,该站点的 Nash 效率系数 0.83, 相对误差 - 2.0%; 图4给出了海河片区观台站(位于漳河干流)逐月实测径流过程的验证结果,该站点 Nash 效率系数 0.80, 相对误差 - 2.9%。

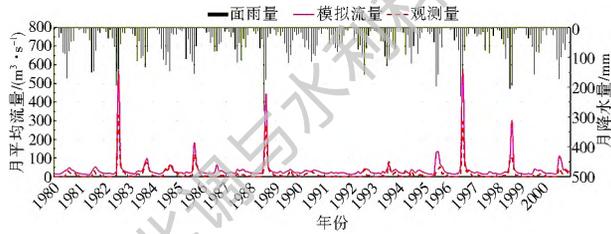


图3 黄河片区武陟站(沁河干流)模拟结果与实测结果对比  
Fig. 3 Comparison of monthly simulated runoff and observed runoff at the Wuzhi station in the Yellow River basin.

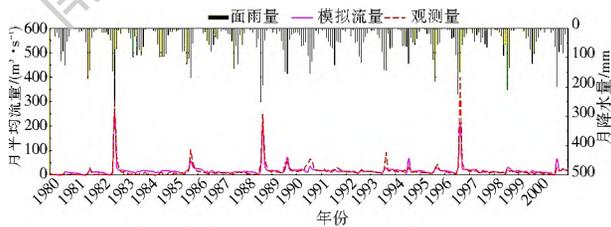


图4 海河片区观台站(漳河干流)模拟结果与实测结果对比  
Fig. 4 Comparison of monthly simulated runoff and observed runoff at the Guantai station in the Haihe River basin

验证结果表明所建 WEP-L 模型是有效的,但其过高估计了洪峰流量和枯水期流量,此现象与分布式水文模型的参数设置有关。分布式水文模型的参数多、不确定性大,如较小的渗透系数可造成地表下渗量的减少和坡面流的增加,导致对洪峰过程的过高估计;较大的土壤厚度则会增加从不饱和土壤层流入河道的壤中径流,导致对枯水期径流模拟的过高估计;较大的给水度、河床材质导水系数,地下水导水系数等参数取值同样会起到高估径流的作用。因此模型在参数方案优化设计方面尚有一定的改善空间。

### 2.3 情景方案设计

根据前文提出的蓝绿水概念,分析两大片区蓝绿水的时空演变规律并对其进行归因分析。本文将时间序列分为2期,基准期为1980-1990年,变化期为1991-2000年,设计了2种情景方案。

情景1: 基于历史下垫面数据驱动模型,模拟区域水循环过程。用线性插值法将2个时相(1980年和1995年)每一类土地利用的变化量均匀分到每一年,得到1980-1995年逐年的土地利用数据。此情景下,基准期和变化期蓝绿水的变化量可视为气候波动和下垫面变化共同作用而导致的。

情景2: 其他输入要素保持不变,全时间序列均采用基准期的下垫面数据模拟水循环过程。该情景下,两时期蓝绿水变化的原因仅为气候因素。

则在情景1时,蓝绿水资源的变化量如下。

$$\Delta R^{blue} = R_1^{blue} - R_2^{blue} \quad (1)$$

$$\Delta R^{green} = R_1^{green} - R_2^{green} \quad (2)$$

式中:  $R_1^{blue}$  为基准期的年均蓝水资源量(mm);  $R_2^{blue}$  为变化期的年均蓝水资源量(mm);  $\Delta R^{blue}$  为两个时期蓝水资源的年均变化量(mm);  $R_1^{green}$  为基准期的年均绿水资源量(mm);  $R_2^{green}$  为变化期的年均绿水资源量(mm);  $\Delta R^{green}$  为两个时期绿水资源的年均变化量(mm)。

在情景2时,蓝绿水资源的变化量如下。

$$\Delta R_{climate}^{blue} = R_1^{blue} - R_2^{blue} \quad (3)$$

$$\Delta R_{climate}^{green} = R_1^{green} - R_2^{green} \quad (4)$$

式中:  $\Delta R_{climate}^{blue}$  为两时期气候波动导致的蓝水变化量(mm);  $\Delta R_{climate}^{green}$  为两时期气候波动导致的绿水变化量(mm),其他符号意义同前。

综合式(1)-式(4),则有:

$$\Delta R_{LUCC}^{blue} = \Delta R^{blue} - \Delta R_{climate}^{blue} \quad (5)$$

$$\Delta R_{LUCC}^{green} = \Delta R^{green} - \Delta R_{climate}^{green} \quad (6)$$

式中:  $\Delta R_{LUCC}^{blue}$  为土地利用变化导致的蓝水变化量(mm);  $\Delta R_{LUCC}^{green}$  为土地利用变化导致的绿水变化量(mm)。

在分割出气候波动、下垫面变化对蓝绿水影响的基础上,各因素对蓝绿水变化的贡献率可用式(7)至式(10)表示。

$$\eta_{climate}^{blue} = \Delta R_{climate}^{blue} / \Delta R^{blue} \quad (7)$$

$$\eta_{LUCC}^{blue} = \Delta R_{LUCC}^{blue} / \Delta R^{blue} \quad (8)$$

$$\eta_{climate}^{green} = \Delta R_{climate}^{green} / \Delta R^{green} \quad (9)$$

$$\eta_{LUCC}^{green} = \Delta R_{LUCC}^{green} / \Delta R^{green} \quad (10)$$

式中:  $\eta_{climate}^{blue}$  为气候波动对蓝水的贡献(%);  $\eta_{LUCC}^{blue}$  为下垫面变化对蓝水的贡献(%);  $\eta_{climate}^{green}$  为气候波动对绿水的贡献(%);  $\eta_{LUCC}^{green}$  为下垫面变化对绿水的贡献(%).

## 3 太行山区蓝绿水的分布规律与归因分析

### 3.1 两大片区的年际变化规律

如前文所述,太行山系中国一个重要的气候、植被和地理分界线,山脉两侧的降水、蓝水、绿水资源及其演变过程存在明显差异。太行山海河片区1980-2000年间降水、蓝水和绿水变化过程。海河片区的降水和蓝水呈增长趋势,绿水呈下降趋势(图5);黄河片区的降水和蓝水均呈减少趋势,而绿水则略有增长(图6)。

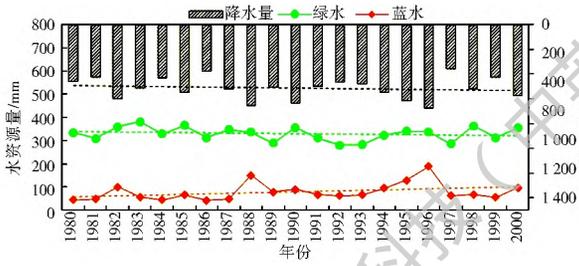


图 5 太行山海河片区蓝水绿水年际变化

Fig. 5 Evolution of precipitation, blue water, and green water of the Haihe River basin part of the Taihang Mountain Region from 1980 to 2000

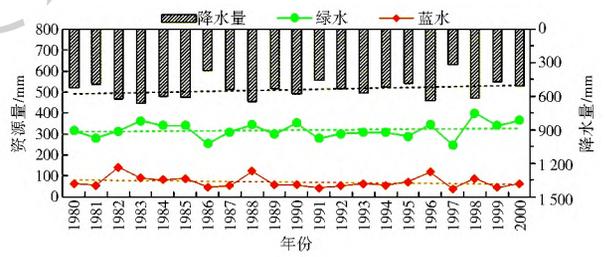


图 6 太行山黄河片区蓝水绿水年际变化

Fig. 6 Evolution of precipitation, blue water and green water of the Ydlow River basin part of the Taihang Mountain Region from 1980 to 2000

### 3.2 沿垂直带的变化规律

在情景 1(历史下垫面条件)下,两大片区基准期 and 变化期蓝绿水沿垂直带的分布见图 7、图 8。海河片区的蓝绿水在垂直带上的变化有如下特点:基

准期的绿水普遍高于变化期,而蓝水明显小于变化期。随海拔升高,黄河片区蓝水呈递减趋势;绿水变化以海拔 800 m 为界,在其以下基准期的绿水较高,在其以上变化期的绿水较高。

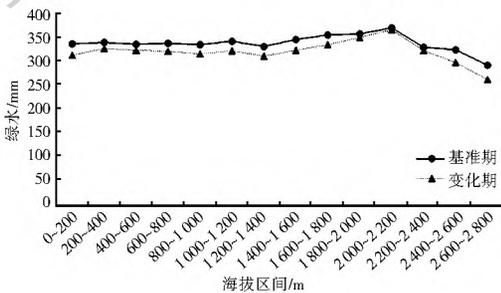


图 7 海河片区绿水和蓝水沿垂直带的代际变化(情景 1)

Fig. 7 Vertical distribution of blue water and green water of the HRBP of the Taihang Mountain Region in Scenario 1 in 1980-1990 and 1991-2000

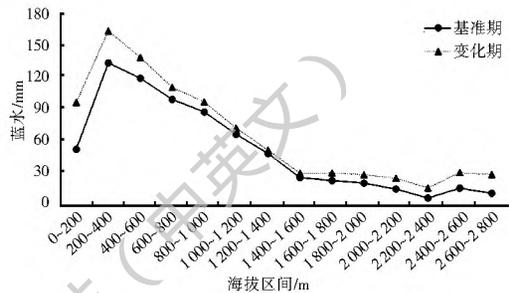


图 8 黄河片区绿水和蓝水沿垂直带的代际变化(情景 1)

Fig. 8 Vertical distribution of blue water and green water of the YRBP of the Taihang Mountain Region in Scenario 1 in 1980-1990 and 1991-2000

在情景 2(固定下垫面条件)下,海河、黄河片区蓝绿水沿垂直带的变化结果见图 9、图 10。在海河片区,由于变化期的降水更多,其导致了整个垂直带

上蓝水的增加,而 0~ 2 000 m 区间的绿水有所下降。在黄河片区,由于变化期的降水较基准期为少,沿垂直带的蓝水和绿水均有不同程度的下降。

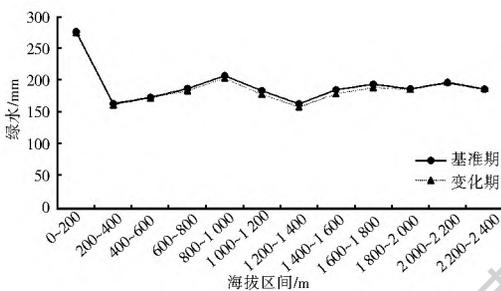


图 9 海河片区绿水和蓝水沿垂直带的代际变化(情景 2)

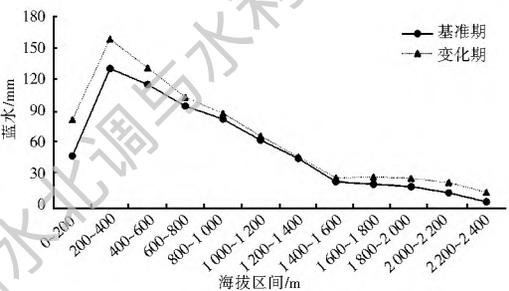


Fig. 9 Vertical distribution of blue water and green water of the HRBP of the Taihang Mountain Region in Scenario 2 in 1980-1990 and 1991-2000

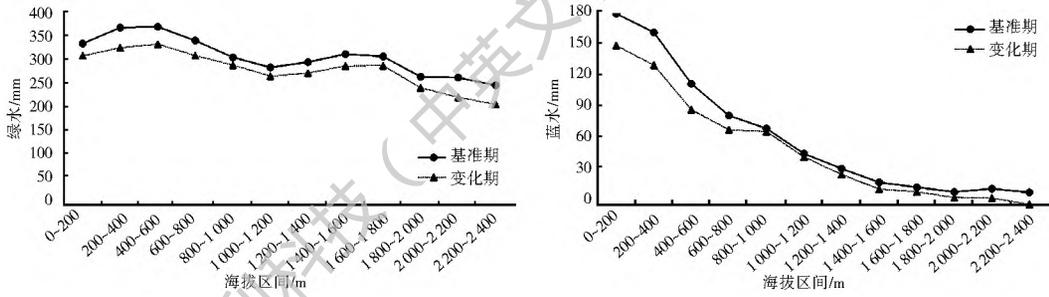


图 10 黄河片区绿水和蓝水沿垂直带的代际变化(情景 2)

Fig. 10 Vertical distribution of blue water and green water of the YRBP of the Taihang Mountain Region in Scenario 2 in 1980-1990 and 1991-2000

### 3.3 蓝绿水变化的归因分析

海河片区沿垂直带蓝绿水变化归因结果见表 1 和图 11。海河片区的绿水呈减少趋势,变化期较基准期减少了 19.40 mm,其中气候波动的贡献为-3.29 mm,

土地利用变化的贡献为-16.11 mm,主导因素为土地利用的改变。海河片区变化期的蓝水较基准期增加了 19.00 mm,其中气候波动的贡献为 14.74 mm,土地利用变化的贡献为 4.26 mm,主导因素为气候波动。

表 1 海河片区沿垂直带蓝绿水变化归因结果

Tab. 1 Attribution results of the vertical variation of blue water and green water in the Haihe River basin part

高程区间 / m	$\Delta R^{green}$ / mm	$\Delta R_{climate}^{green}$ / mm	$\Delta R_{LUC}^{green}$ / mm	$\Delta R^{blue}$ / mm	$\Delta R_{climate}^{blue}$ / mm	$\Delta R_{LUC}^{blue}$ / mm
0~200	-24.17	-1.49	-22.69	44.09	34.12	9.98
200~400	-12.59	-1.86	-10.72	29.90	27.70	2.20
400~600	-13.10	-0.66	-12.45	19.56	15.80	3.76
600~800	-16.33	-3.16	-13.17	11.23	8.30	2.93
800~1000	-19.52	-3.82	-15.70	9.36	5.30	4.06
1000~1200	-19.98	-5.59	-14.39	5.91	3.89	2.01
1200~1400	-19.71	-4.80	-14.91	3.13	1.52	1.61
1400~1600	-22.50	-6.25	-16.25	4.12	3.53	0.59
1600~1800	-20.33	-5.33	-15.01	7.25	6.91	0.35
1800~2000	-7.40	-0.88	-6.52	7.87	7.75	0.13
2000~2200	-3.93	1.29	-5.22	10.20	9.86	0.34
2200~2400	-6.94	0.95	-7.88	9.41	8.98	0.43
0~2400	-19.40	-3.29	-16.11	19.00	14.74	4.26

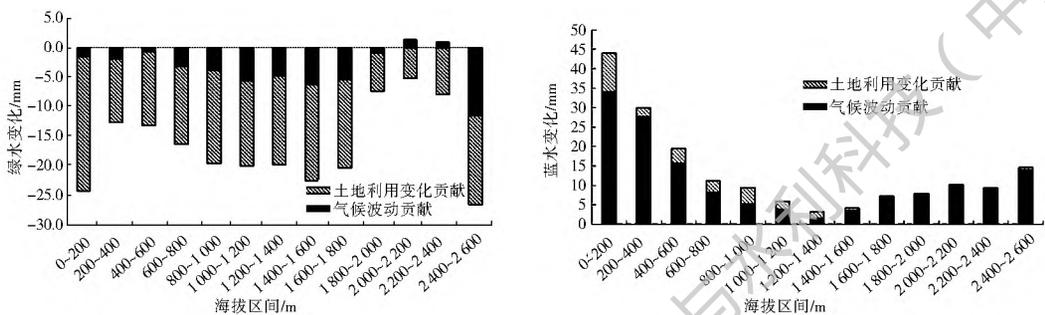


图 11 海河片区气候波动和土地利用改变对蓝绿水的影响

Fig. 11 Influence of climatic fluctuation and land use changes on blue water and green water in the Haihe River basin part of the Taihang Mountain Region

海河片区的绿水在垂直方向上均以减少为主,中低海拔区域变幅高于高海拔区域;蓝水在低海拔区域的变幅最强、高海拔区域的变幅次之,中海拔区

域的变幅最小。

黄河片区沿垂直带蓝绿水变化的归因结果见表 2 和图 12。黄河片区变化期的绿水较基准期增加

20.05 mm, 气候波动和下垫面变化起的作用相反, 前者的贡献量为 -27.82 mm, 后者的贡献为 47.87 mm。黄河片变化期的蓝水较基准期减少 8.19 mm, 气候波动的贡献为 -6.27 mm, 土地利用变化的贡献为 -1.92 mm。

拔区域以减少绿水为主, 在高海拔区域以增加绿水为主; 气候波动导致了所有的高度带上绿水的衰减。气候波动和土地利用变化对蓝水均以负贡献为主, 在低海拔区域和高海拔区域, 气候波动占主导, 在中海拔区域土地利用变化的贡献占有相当比例。

由图 12 可知: 黄河片区土地利用变化在低海

表 2 黄河片区沿垂直带蓝绿水变化归因结果

Tab. 2 Attribution results of the vertical variation of blue water and green water in the Yellow River basin part

高程区间 / m	$\Delta R^{green}$ / mm	$\Delta R_{climate}^{green}$ / mm	$\Delta R_{L,UCC}^{green}$ / mm	$\Delta R^{blue}$ / mm	$\Delta R_{climate}^{blue}$ / mm	$\Delta R_{L,UCC}^{blue}$ / mm
0~200	-31.75	-25.29	-6.46	-30.06	-29.80	-0.26
200~400	-46.28	-41.40	-4.89	-28.70	-30.34	1.64
400~600	-30.6	-35.79	5.19	-24.11	-24.04	-0.07
600~800	-14.93	-31.10	16.17	-15.17	-12.99	-2.18
800~1000	18.11	-16.13	34.25	-7.52	-2.98	-4.54
1000~1200	25.59	-17.99	43.58	-7.13	-3.05	-4.08
1200~1400	18.38	-22.66	41.04	-8.67	-5.52	-3.15
1400~1600	3.25	-24.55	27.8	-7.34	-6.20	-1.14
1600~1800	13.63	-18.87	32.51	-5.22	-4.19	-1.03
1800~2000	21.19	-22.70	43.88	-5.63	-5.08	-0.54
2000~2200	25.28	-40.67	65.94	-9.38	-8.72	-0.66
2200~2400	25.36	-39.47	64.82	-12.04	-11.10	-0.94
0~2400	20.05	-27.82	47.87	-8.19	-6.27	-1.92

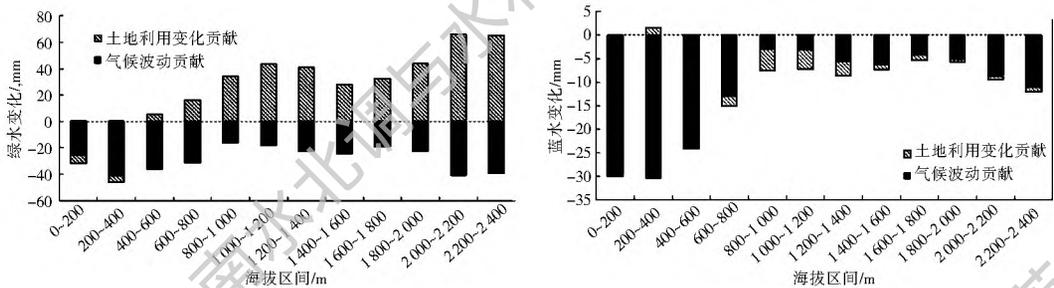


图 12 黄河片区气候波动、土地利用改变对蓝绿水的影响

Fig. 12 Influence of climatic fluctuation and land use changes on blue water and green water in the Yellow River basin part of the Taihang Mountain Region

总的来说, 气候波动和下垫面变化对太行山区蓝水变化的贡献率分别为 77.8% 和 22.2%; 二者对绿水变化的贡献率分别为 -168.6% 和 68.6%。两大片区具体数据详见表 3 和表 4。

表 3 太行山区蓝绿水变化量归因结果

Tab. 3 Attribution results of the green water and blue water changes in TMR

区域	$\Delta R^{green}$	$\Delta R_{climate}^{green}$	$\Delta R_{L,UCC}^{green}$	$\Delta R^{blue}$	$\Delta R_{climate}^{blue}$	$\Delta R_{L,UCC}^{blue}$
海河片区	-19.40	-3.29	-16.11	19.00	14.74	4.26
黄河片区	20.05	-27.82	47.87	-8.19	-6.27	-1.92
全区	-6.65	-11.22	4.57	10.21	7.95	2.26

表 4 太行山区蓝绿水变化贡献率归因结果

Tab. 4 Contribution rates of climatic fluctuation and land use changes to the green water and blue water changes

区域	$\eta_{climate}^{green}$	$\eta_{L,UCC}^{green}$	$\eta_{climate}^{blue}$	$\eta_{L,UCC}^{blue}$
海河片区	17.0	83.0	77.6	22.4
黄河片区	-138.7	238.7	-76.6	-23.4
全区	-168.6	68.6	77.8	22.2

## 4 讨论

### 4.1 研究结果的合理性分析

降水为水循环过程的总输入, 降水的变化无论

与蓝水或绿水均存在正相关的关系,其增加/减少可导致相应区域蓝水、绿水的增加/减少。与降水相比,土地利用的变化对水循环过程的影响机制相对复杂。在相同的气候条件下,更高的植被覆盖率首先可增加对降水的截留,导致截留蒸发的增加;其次可提高土壤的入渗和蓄水能力,使得土壤含水率增大;第三可提高区域的蒸发能力,加大蒸散发量。从水循环的横向过程看,更高的植被覆盖率可提高区域/流域的糙率系数,对坡面汇流过程产生直接的影响,在洪水期起到削减洪峰、坦化径流过程的作用,同时更高的土壤含水率则具有增大基流的效果。因此,植被

覆盖率的增加普遍会造成绿水资源量的增加、汛期蓝水资源量的减少以及枯水期蓝水资源量的增加。

图 13 给出了海河片区在基准期和变化期植被覆盖面积沿垂直带的变化情况,后者的林地、草地和农田总面积比前者减少了 2 696 33 km<sup>2</sup>,其中林地减少 1 297. 52 km<sup>2</sup>,草地增加了 991. 54 km<sup>2</sup>,农田减少了 2 390 95 km<sup>2</sup>。林地的变化幅度较大的区域集中在海拔 800~ 1 600 m 之间,草地在海拔 0~ 600 m 区间变化较大,农田的变化区间主要为 0~ 400 m。海河片区植被沿垂直带以减少为主,导致几乎所有垂直带上绿水的减少。

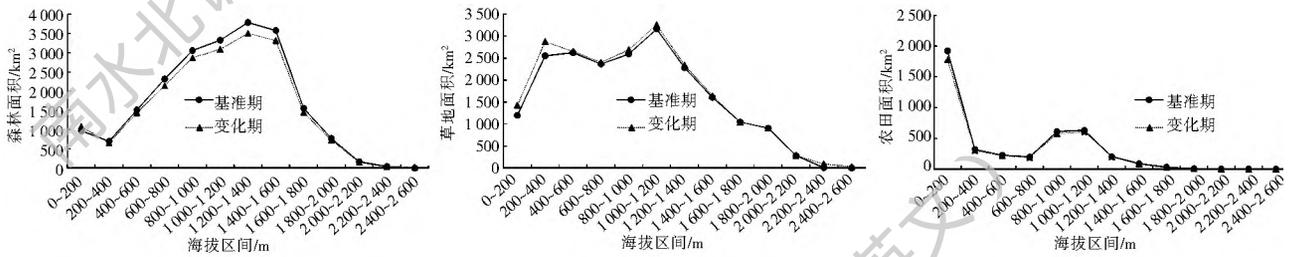


图 13 海河片区沿垂直植被覆盖的代际变化

Fig. 13 Vertical distribution of forest, grass, and farm land in the Haihe River basin part of TMR in 1980-1990 and 1991-2000

1980- 2000 年期间,黄河片区的植被面积有较大幅度的增长,变化期的林地、草地和农田总面积比前者增加了 2 330 37 km<sup>2</sup>,其中林地共增加了 1 699. 78 km<sup>2</sup>,主要集中在海拔 0~ 400 m 与 800~ 1 400 m 之间;草地增加了 1 319. 60 km<sup>2</sup>,主要分布在海拔 600~ 1 400 m 之间;农田减少共减少

689. 01 km<sup>2</sup>,在低海拔区域(0~ 600 m)减幅最大。表 2 指出土地利用变化对黄河片区 0~ 400 m 区间绿水是负贡献,在高海拔地区是正贡献,针对土地利用变化的分析结果恰好验证了这一点。黄河片区基准期和变化期植被覆盖面积沿垂直带的变化情况见图 14。

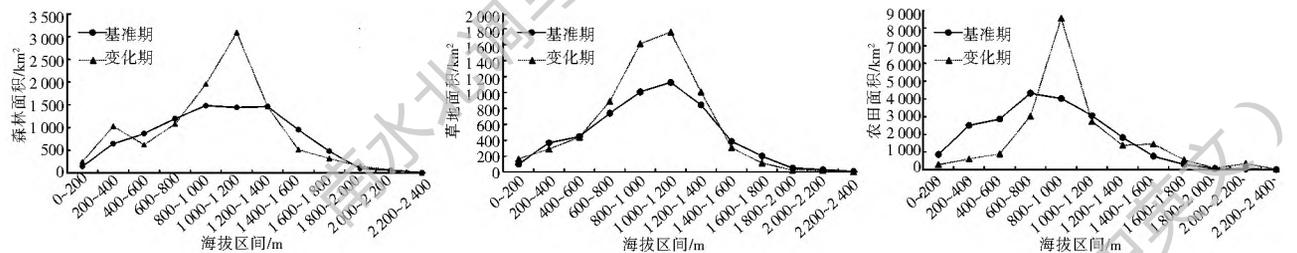


图 14 黄河片区沿垂直植被覆盖的代际变化

Fig. 14 Vertical distribution of forest, grass, and farm land in the Yellow River basin part of TMR in 1980-1990 and 1991-2000.

## 4.2 存在的不足

本文系统地太行山两大片区蓝绿水变化进行了归因分析,归因结果表明土地利用改变是绿水变化的主导因素,气候改变是蓝水变化的主导因素。通过对两大片区的植被覆盖率变化的分析,研究成果较好地解释了太行山区绿水资源的演变规律,针对黄河片区、海河片区土地利用变化的分析成果有力支撑了上述论点。

本文对蓝水演变的归因结果显示,气候波动对太行山区、海河片区和黄河片区的贡献率分别为 77. 3%、77. 6%、77. 3%。经文献调研,已有一些针

对黄河流域径流(即本文所指的蓝水)变化的研究成果:刘昌明等<sup>[24]</sup>对黄河流域径流变化的归因结果表明,气候波动对黄河中游流域径流量减少的贡献率为 43%;Zhang 等<sup>[25]</sup>针对黄土高原 11 个典型流域径流减少的现象开展了研究,指出土地利用/覆盖的变化对径流减少的贡献率不低于 50%;杨大文等<sup>[26]</sup>以黄河 38 个流域为研究对象,指出降水量减少对径流量减少的平均贡献率为 49. 3%。

对比已有的研究成果,由于本研究针对的是太行山区,山区的人类活动强度相对较弱,下垫面变化幅度相对较小,因而与其他研究相比,本文得出的气

候因素对蓝水变化的贡献率更大的归因结果具有一定的合理性,但研究仍可能低估了土地利用变化对蓝水的影响。

从分布式水文模型的输入数据分析,本研究所用的土地利用数据系按照《土地利用现状分类体系 GB/T 21010-2007》制作而得。该标准体系对土地利用类型的分类较粗,如一级分类“林地”之下仅有“有林地”、“灌木林地”、“其他林地”3个子类,一级分类“草地”仅被划分为“天然牧草地”、“人工牧草地”和“其他草地”3个子类。该分类体系无法全面地反映土地利用/覆盖的变化特征,如在某区域开展植树造林,群落结构随时间推移将不断完善,尽管该地区的土地利用/覆盖均为“有林地”,但不同时期植被的质量(LAI)会发生剧烈的变化,其对产、汇流过程均会产生较大的影响,增大了蓝水资源评价的不确定性。另一方面,山区各类地面监测站点数量稀少,尤其缺少高海拔区域降水、日照、温度、风速、相对湿度等气象观测资料,这同样会对模型的模拟结果产生一定的影响。

在归因分析方面,本文使用了比较简易的情景分析法对土地利用变化和气候波动对山区蓝水绿水资源量变化的影响进行归因,因不同要素对蓝水、绿水资源的变化存在或正或负的效应,故造成部分贡献率计算结果的绝对值大于100%,未来的研究中需要建立涵盖更多因素、计算方法更科学的计算模型以提高归因分析的效率。

## 5 结论

本文以太行山区为研究对象,分别建立了太行山-海河片区和太行山-黄河片区的分布式水文模型,模拟了1980-2000年间太行山区的水循环过程,总结了不同分区蓝水、绿水的时空演变规律,分析了气候波动和土地利用/覆盖变化对两大片区蓝水、绿水的贡献,得出以下研究结论。

(1) 尽管地域相接,太行山区东西两侧蓝水、绿水的时空演变规律存在明显的不同。从时间序列看,海河片区20世纪90年代绿水资源年平均值低于20世纪80年代,蓝水资源高于20世纪80年代;与之相反,黄河片区20世纪90年代的绿水年平均值高于20世纪80年代,而蓝水资源低于20世纪80年代。

(2) 气候波动是太行山区蓝水变化的主导因素,土地利用/覆盖的改变是太行山区绿水变化的决定性因素。

(3) 太行山区的水循环过程呈现出明显的垂直

地带性,且不同要素在山脉两侧的变化规律各不相同。随海拔升高,蓝水沿垂直带的分布呈减小趋势,绿水沿垂直带稍有降低;蓝水资源变幅较大的区间为海拔0~1000m;海河片区的绿水资源在海拔800~1800m之间变化最为强烈,黄片河区绿水资源在低海拔区域呈减小态势,在高海拔区域呈增加态势。

(4) 在水资源紧缺的太行山区,海河片区和黄河片区应采取不同的策略以应对水问题。海河片区20世纪90年代降水偏多,绿水资源反而减少,表明该区域人类活动与生态系统争水的问题比较突出,应加大节水力度,合理地压缩人类活动用水,为生态系统的良性发展留出一定的空间。黄河片区20世纪90年代降水偏少,绿水资源反而增多,这与该区域水土保持和植树造林等政策的实施有着密切的联系,但植被数量增多将导致蓝水资源的减少,在未来水资源开发利用过程中该问题需要慎重对待。

随着信息技术的快速进步和遥感观测网络的不断拓展,获取更加丰富的高时间、空间、光谱分辨率的卫星遥感数据成为可能,加强天、空、地、网等多源数据的综合应用,探索大数据分析技术、数据挖掘技术、数据同化技术在山地水文模拟中的应用,将是下一步重点研究的内容。

## 参考文献(References):

- [1] ROCKSTRÖM J. Our farm green water estimates as a tool for increased food production in water scarce regions[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans & Atmosphere*, 1999, 24(4): 375-383. DOI: 10.1016/S1464-1909(99)00016-7.
- [2] 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 & Management*, 2006, 132(3): 129-132. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129).
- [3] ROST S, GERTEN D, BONDEAU A, et al. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(9): 137-148. DOI: 10.1029/2007wr006331.
- [4] FALKENMARK M, ROCKSTRÖM J, KARLBERG L. Present and future water requirements for feeding humanity[J]. *Food Security*, 2009, 1(1): 59-69. DOI: 10.1007/s12571-008-0003-x.
- [5] ROCKSTRÖM J, KARLBERG L, WANI S P, et al. Managing water in rainfed agriculture- the need for a paradigm shift[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(4): 543-550. DOI: 10.1016/j.agwat.2009.09.009.
- [6] 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 G D, ZHAO W Z. Green water

- and its research progresses [J]. *Advances in earth science*, 2006, 21 (3): 221-227. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2006.03.001.
- [7] 徐宗学, 左德鹏. 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[J]. *南水北调与水利科技*, 2013(1): 12-16. (XU Z X, ZUO D P. Scientific assessment of water resources with broaden thoughts: a case study on the blue and green water resources in the Wei River Basin [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013 (1): 12-16. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2013. 01012.
- [8] 贾仰文, 王浩, 仇亚琴, 等. 基于流域水循环模型的广义水资源评价(Ⅱ)—评价方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(9): 1051-1055. (JIA Y W, WANG H, QIU Y Q, et al. Generalized water resources assessment based on watershed hydrologic cycle model—Assessment approach [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(9): 1051-1055. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2006.09.004.
- [9] LIU J G, YANG H, HOFF H, et al. Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: green and blue water[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3): 187-197. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.11.024.
- [10] LIU X, REN L, Yuan F, et al. Quantifying the effect of land use and land cover changes on green water and blue water in northern part of China[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2009, 13(6): 735-747. DOI: 10.5194/hess-13-735-2009
- [11] HOFF H, FALKENMARK M, GERTEN D, et al. Greening the global water system[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3): 177-186. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.026.
- [12] PENG H, JIA Y, NIU C, et al. Ecohydrological simulation of soil and water conservation in the Jinghe River Basin in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydroenvironment Research*, 2015, 9(3): 452-464. DOI: 10.1016/j.jher.2014.09.003.
- [13] PENG H, JIA Y, TAGUE C, et al. An Ecohydrological model based assessment of the impacts of soil and water conservation management in the Jinghe River Basin, China[J]. *Water*, 2015, 7(11): 6301-6320. DOI: 10.3390/w7116301.
- [14] MATJAZ GLAVAN, 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[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(26): 3964-3980. DOI: 10.1002/hyp.9540.
- [15] VEETIL A V, MISHRA A K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 542: 589-602. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.09.032.
- [16] 夏军, 刘孟雨, 贾绍凤, 等. 华北地区水资源及水安全问题的思考与研究[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(5): 550-560. (XIA J, LIU M Y, JIA S F, et al. Water security problem and research perspective in North China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(5): 550-560. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2004.05.002.
- [17] XIA J, ZHANG L, LIU C, et al. Towards better water security in North China[J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 233-247. DOI: 10.1007/s11269-006-9051-1.
- [18] 贾仰文, 王浩, 王建华, 等. 黄河流域分布式水文模型开发和验证[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 300-308. (JIA Y W, WANG H, WANG J H, et al. Development and verification of a distributed hydrologic model for the Yellow River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 300-308. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2005.02.020.
- [19] JIA Y, NI G, KAWAHARA Y, et al. Development of WEP model and its application to an urban watershed[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15: 2175-2195. DOI: 10.1002/hyp.275.
- [20] JIA Y, KINOUCHI T, YOSHITANI J. Distributed Hydrologic Modeling in a Partially Urbanized Agricultural Watershed Using Water and Energy Transfer Process Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2005, 10(4): 253-263. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2005)10:4(253).
- [21] JIA Y, WANG H, ZHOU Z, et al. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(3-4): 606-629. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.006.
- [22] JIA Y, DING X, QIN C, et al. Distributed modeling of land surface water and energy budgets in the inland Heihe river basin of China[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2009, 13(10): 1849-1866. DOI: 10.5194/hess-13-1849-2009.
- [23] JIA Y, DING X, WANG H, et al. Attribution of water resources evolution in the highly water-stressed Hai River Basin of China[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(2): 2513. DOI: 10.1029/2010wr009275.
- [24] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. *地理学报*, 2004, 59(3): 323-330. (LIU C M, ZHANG X C. Causal analysis on actual water flow reduction in the main stream of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 323-330. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2004.03.001.
- [25] ZHANG X, ZHANG L, ZHAO J, et al. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China[J]. *Water Resources Research*, 2009, 44(7): 2183-2188. DOI: 10.1029/2007wr006711.
- [26] 杨大文, 张树磊, 徐翔宇. 基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J]. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45: 1024-1034. (YANG D W, ZHANG S L, XU X Y. Attribution analysis for runoff decline in Yellow River Basin during past fifty years based on Budyko hypothesis. *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 1024-1034. (in Chinese) DOI: 10.1360/N092015-00013.