

1961—2010 年黄河源区蓝绿水资源时空变化

张为彬, 查小春, 马玉改

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 利用 SWAT(soil and water assessment tool, SWAT)模型和非参数检验方法(Mann—Kendall),从时空尺度上分析了黄河源区 1961—2010 年蓝绿水资源量多年平均变化和各生长季节的变化规律。研究结果表明,在时间上,近 50 a 来,黄河源区绿水资源量多年平均是蓝水的 2 倍以上。黄河源区蓝水资源春、秋两季减少,秋季显著减少,减少幅度 0.355 mm/a,夏季略微增加;绿水资源春季减少,夏、秋两季增加,秋季显著增加,增加幅度 0.286 mm/a。在空间上,黄河源区蓝绿水资源量在各季节呈现出由东南向西北递减的趋势,东南部地区蓝水资源秋季减少明显,减小幅度最大为 1.98 mm/a,绿水资源量夏、秋两季增加明显,最大为 1.62 mm/a。随全球气候的变化,蓝绿水资源量在时空上差异将会进一步加大。因此,应加强黄河源区水资源的管理,减少源区绿水尤其是其中无效率水(蒸发)的消耗,减少生长季高耗水作物的种植,以保证中下游地区水量的有序供给。

关键词: 黄河源区; 蓝水资源量; 绿水资源量; SWAT 模型; 时空变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)06-0338-06

中图分类号: TV213.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.06.065

Spatio-temporal Change of Blue Water and Green Water Resources in Source Region of Yellow River During 1961—2010

ZHANG Wei-bin, ZHA Xiao-chun, MA Yu-gai

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: Based on the SWAT(soil and water assessment tool, SWAT) model and Mann—Kendall method, the spatio-temporal change of blue water and green water resources in different growing season over the source of the Yellow River from 1961—2010 were analyzed. The results showed that the amount of green water resources was generally 2 times of blue water resources in the source region of the Yellow River. Blue water resources in spring and autumn showed a declining trend, and significantly decreased by 0.355 mm/a in autumn, while a weak increasing trend in summer. Green water resources showed an increasing trend in summer and autumn, and significantly increased by 0.286 mm/a in autumn, while decreasing trend in spring. From southeast to northwest, blue water and green water showed progressively decreasing trend. In the southeast, blue water resources decreased by 1.98 mm/a in autumn while green water resources increased in summer and autumn with the largest slope 1.62 mm/a. Because of global climate changes, the spatiotemporal difference in blue water and green water resources will be further increase. Hence, it is urgent to strengthen the systematic management of water resources in the source region. And the amount of inefficient water consumption and the high water consumption crops should be reduced. Thus the supply of water in the lower and middle reaches of the Yellow River can be guaranteed.

Keywords: source region of the Yellow River; blue water; green water; SWAT model; spatio-temporal change

近百年来,地球气候系统正经历着显著的变化,加之剧烈的人类活动影响,不同程度地改变了水文循环过程,这种改变使得人们需要重新审视传统的水资

源评价所带来的各种问题。为了更好地评估半湿润、半干旱区水资源在陆地生态系统中的作用,Falkenmark^[1]于 1995 年首次提出了蓝水和绿水的概念。

收稿日期:2013-11-01

修回日期:2013-12-31

资助项目:中央高校基本科研项目“黄河中游与汉江上游流域环境演变与灾害及经济社会可持续发展研究”(GK201301003);国家社会科学基金项目(14BZS070)

作者简介:张为彬(1988—),男(汉族),黑龙江省伊春市人,硕士研究生,研究方向为土地资源开发与环境演变。E-mail:13623413730@163.com。

通信作者:查小春(1972—),男(汉族),陕西省南郑县人,博士,副教授,主要从事土地资源开发与环境演变。E-mail:zhaxch@snnu.edu.cn。

蓝水即传统水资源评价中的可利用水资源总量,等于地表水资源量和地下水资源量之和减去重复计算量,绿水包含绿水流和绿水储量,绿水流即实际蒸散发流,绿水储量即土壤储水量。从水循环的角度分析,在全球尺度上总降水的65%通过森林、草地、湿地和雨养农田的蒸散发回到大气中,成为绿水。仅有35%的降水储存于河流、湖泊以及含水层中,成为蓝水^[2]。目前在传统的水资源侧重评价蓝水资源的基础上将绿水也作为一种资源已经引起国际社会的和科学家的广泛关注^[3-4]。蓝水是可以被人类直接利用的水资源,而绿水是维护陆地生态系统生产性和服务性功能的重要条件,两者作为降水资源总量的两个主要组成部分,全球气候变化的背景下探究其时空变化特征,才能建立合理的水资源管理模式,为区域水资源管理体系提供科学依据。

目前对于绿水的估算有通过生态系统干物质的耗水量估算、不同生态系统类型与单位面积实际蒸散发相乘估算、利用生态系统模型估算,以及利用分布式水文模型估算等4类方法^[5],由于数据要求高、适用尺度较大等原因,前3种方法均不太适应,第4种方法通过分布式水文模型如SWAT模型能同时在时空尺度上统筹考虑蓝绿水资源,因此在国内外不同流域得到了应用^[6-8]。研究结果表明,蓝绿水资源在水资源总量所占比重、变化特征因地各异,因此在特定流域展开针对性的研究对区域水资源的合理配置具有重要意义。同时,这些研究大多从年尺度或月尺度分析蓝绿水的变化,而从生长季(春、夏、秋季)角度分析蓝绿水时空变化比较少。黄河源区是黄河流域重要的水源涵养区和补给区,其水量的变化直接影响到黄河中下游地区水量的稳定,也会影响到整个黄河流域的生态安全和社会经济的可持续发展。因此,分析该区域水资源蓝绿水资源变化趋势具有十分重要的意义。本研究利用SWAT(soil and water assessment tool, SWAT)水文模型和非参数检验方法(Mann—Kendall),从生长季(春、夏、秋季)角度分析黄河源区1961—2010年不同时空尺度生长季的蓝绿水资源量变化特征,其研究结果可为黄河源区以及整个黄河流域水资源的综合管理和优化配置提供科学指导。

1 研究区概况

黄河源区是指黄河干流唐乃亥水文站以上的流域,流域面积约为 $1.22 \times 10^4 \text{ km}^2$,河长1 552.4 km,该区域仅占黄河流域总面积的16%,产流量却达到总径流量的35%以上,因此被称为黄河“水塔”^[9]。

源区气候属于青藏高原亚寒带半湿润系统,受地形等因素影响,多年平均气温在 0°C 左右。由于离孟加拉湾较近和受西南季风影响比较明显,多年平均降水量在250~800 mm之间,且年内分配很不均匀,75~90%的降水量主要集中在6—9月。源区内支流较多,径流年际变化大;输沙量较小,是黄河清水的主要来源。流域内土壤的水平分布呈现出明显的经度地带性规律,植被分布由西北向东南分别是荒漠、草原、森林。黄河源区出口水文站——唐乃亥水文站,以及流域内及其附近14个较均匀分布的气象站,具备较完整的1961—2010年的水文气象观测资料,为研究黄河源区不同时空尺度蓝绿水资源变化提供了数据资料。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

气象数据来源于中国气象局气象信息中心,包括1961—2010年的最高气温、最低气温、降水、太阳辐射、风速和相对湿度的逐日数据。地形数据(DEM)来源于国际数据服务平台,分辨率为90 m。土壤数据由中国科学院南京土壤研究所提供,分辨率为1:100万。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,分辨率为1:10万。逐日径流数据来源于黄土高原数据共享服务中心。

2.2 研究方法

2.2.1 SWAT模型与构建 SWAT由美国农业部开发的一个具有很强物理机制的分布式水文模型^[10]。该模型可将整个流域分成若干个子流域和水文响应单元(hydrologic response unit, HRU),每个HRU单独计算物质循环及其关系,然后在子流域出口将所有HRU的产出进行叠加。由于模型的数据源输入多为分布式的,所以它可以充分考虑降水、气温等气象因素的空间分布,进一步确定径流等水文要素的空间分布。SWAT模型因其可以直接输出蓝绿水资源量,目前被认为是估算蓝水绿水资源一种比较有效的方法^[11]。

基于黄河源区DEM数据进行流域空间离散化,设置集水区阈值 800 km^2 ,将黄河源区划分为85个子流域,进而细划分为298个HRU。然后根据已经收集的数据,对流域潜在蒸散发的计算选用Penman—Monteith公式,地表径流选择SCS(soil conservation service)曲线数法计算^[12]。选用唐乃亥水文站1961—1985年、1986—2010年月平均径流量作为模型的校准期和验证期。由于模型参数众多,结合已有研究并充分考虑冰雪融水^[13],选取了13个参数

并利用 SWAT—CUP 中的 SUFI—2 (sequential uncertainty fitting) 算法进行参数的率定^[14]。从图 1 可见,对唐乃亥水文站月平均径流模型率定期与验证期的效率系数 (E_{ns}) 与相关系数均大于 0.80, P_{BIAS} (偏差) 系数均小于 5%, 模拟值与实测值拟合程度较高, 结合已有的研究经验^[15], 模拟精度较高, 完全可以用于分析蓝绿水资源量变化。

2.2.2 蓝绿水资源量的估算和趋势分析 所指代的

蓝绿水资源特指蓝水、绿水流。在 SWAT 模型中, 蓝水资源量等于产水量与深层地下水补给量之和, 绿水资源量等于实际蒸散发量。蓝绿水资源量的变化趋势分析采用 Mann—Kendall (M—K) 方法, 它不受少数异常值的干扰, 且计算简便。该方法中一个重要的指标 Kendall 倾斜度 β 用来量化变化趋势, 当 $\beta > 0$ 时, 则反映了上升的趋势, 反之则反映了下降的趋势^[16]。

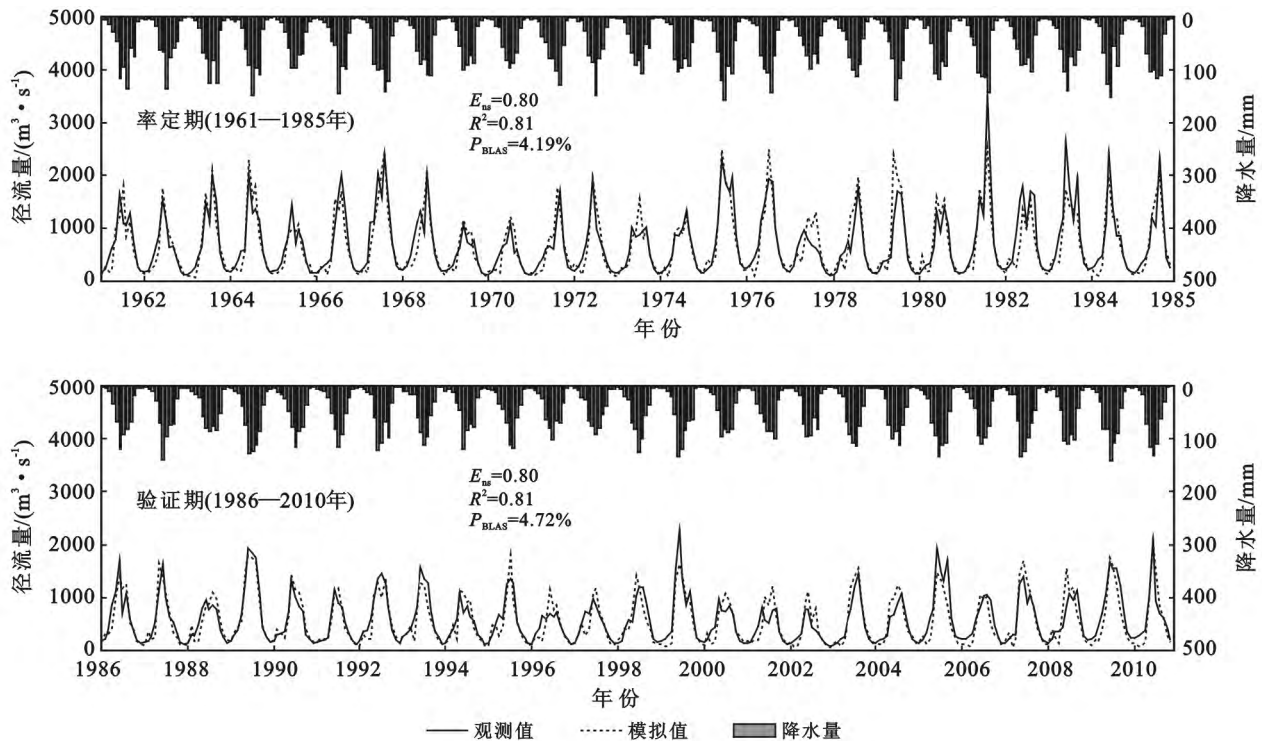


图 1 黄河源区唐乃亥水文站月平均径流率定验证期模拟值与观测值比较

注: E_{ns} 为效率系数, R^2 为相关系数, P_{BIAS} 为偏差系数。

3 结果与分析

3.1 黄河源区时间尺度上蓝绿水资源量变化

3.1.1 蓝绿水资源量多年平均变化 如表 1 所示, 黄河源区生长季多年平均蓝绿水总量为 519.74 mm, 说明该区域水资源总量比较丰富。其中, 生长季绿水资源总量 (356.68 mm) 是蓝水资源总量 (163.06 mm) 的 2 倍之多, 并在各生长季阶段 (春、夏、秋季) 都明显大于蓝水资源量, 而夏季蓝绿水资源量相差最大, 为 98.4 mm, 这与夏季降水量大、温度高, 蒸发强有关。由此可见, 黄河源区绿水资源量比较丰富, 而且随着全球气候的变暖, 大量的降水将会因气温高而被蒸散发掉, 转换为绿水, 这在一定程度上将会进一步加大绿水资源量, 减少蓝水资源量, 而蓝水资源 (径流量) 的减少必然加剧水资源供需矛盾和生态环境的恶化。

表 1 黄河源区生长季 1961—2010 年

多年平均蓝水和绿水资源量

mm

水资源	春季	夏季	秋季	生长季
蓝水	20.06	85.26	57.74	163.06
绿水	80.87	183.66	92.15	356.68
总量	100.93	268.92	149.89	519.74

3.1.2 蓝绿水资源量各生长季阶段的变化 M—K 趋势检验法被世界气象组织推荐并已广泛使用在水文趋势检验中^[16]。由图 2 可见, 1961—2010 年黄河源区, 春季蓝水呈现出下降趋势, 平均每年减少 0.05 mm, 但 20 世纪 80—90 年代末却呈现出显著的上升趋势。夏季蓝水略微增加, 年均增加 0.043 mm, 50 a 来表现为下降、上升再下降的趋势。秋季蓝水显著性减少, 减少幅度最大, 年均减少 0.355 mm, 且 90 年代以来持续减少, 并通过了显著性检验。而黄河源区

1961—2010 年绿水春季呈现出减少趋势,年均减少 0.101 mm,50 a 来波动起伏。夏季绿水呈现出上升趋势,年均增加 0.126 mm,尤其是 80 年代末期以来,基本一直呈现上升趋势。秋季绿水也表现为明显增加趋势,但比夏季幅度明显增强,年均增加 0.286 mm,2000 年之后持续增加,而且近 5 a 来,表现为显著增加。从总体上来看,近 50 a 黄河源区生长季蓝水资源量呈现出减少的趋势,而绿水资源量增加,这与和前人的结论基本一致^[17-18],但和以往侧重潜在蒸散

发量的研究不同,本研究更加准确地评估了该地区的实际蒸散发量,这对于定量评价过去 50 a 黄河源区蓝绿水资源状况,从而为实现水资源持续利用提供较高的参考价值。同时,从各时间段来看,蓝绿水资源各生长季阶段的变化趋势表现不同,这主要是由于降水和气温的变化所引起。而且,常国刚等^[17]指出黄河源区气温的显著升高对于加大流域蒸发量导致流量补给的减少作用要大于其升高致使冰雪融水的补给作用,必然会影响各生长季蓝绿水资源量的变化。

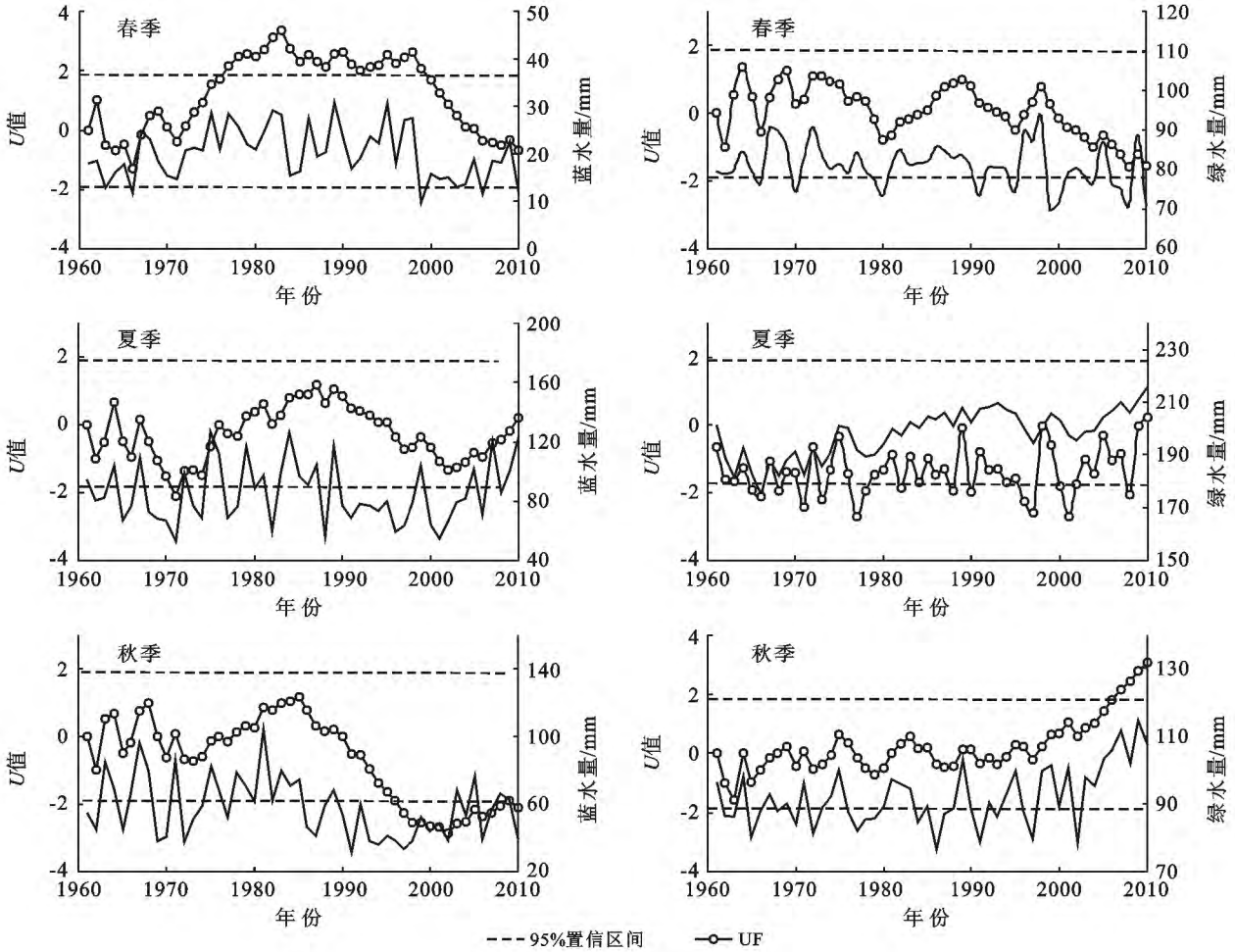


图 2 黄河源区蓝绿水资源量春、夏、秋季 M-K 检验

3.2 黄河源区空间尺度上蓝绿水资源量变化

3.2.1 蓝绿水资源量在空间尺度上多年平均变化

图 3 可见,1961—2010 年,黄河源区西北部地区生长季蓝、绿水资源量分别为 5.2 和 260 mm,东南部地区生长季蓝、绿水资源量分别为 313.6 和 656 mm,呈现出由东南向西北递减的趋势,这与黄河源区降水量的空间分布特征基本相一致^[19]。而且由于全球变暖使得植被生长时间延长,黄河源区由东南向西北生长季的长度逐渐缩短^[20],也是导致绿水资源出现东南多西北少的原因之一。

此外,绿水资源除受气候控制外,还与下垫面特征等因素有关,使绿水资源的变化相对于蓝水资源变化更加复杂。如郭瑞萍^[21]等研究表明农田的蒸散发大于草地小于森林。黄河源区东南部因分布少量的森林面积,强烈的蒸散发量使东南部绿水资源要大于西北草原地区的绿水资源量。在不同生长季上,春季蓝水资源量最小地区主要位于唐乃亥出口站附近,多年平均仅 2.25 mm,最大地区主要位于源区中部的果洛站和东南部的红原站一带。夏季,源区大部分地区的蓝水资源大于 33 mm,东南部主要产流区可达

160 mm以上,这与该地区降水量充沛有关。秋季,由于降水量的逐渐减少,蓝水资源明显小于夏季但高于春季,其原因主要是春季冰川融雪水补给小于降水补给之故。绿水资源春季最小值(38.09 mm)高于同一季节蓝水资源的最大值(36.39 mm),可见春季大部分的降水主要用于蒸散发耗散。东南部久治若尔盖一带地区最大(198.60 mm),北部兴海地区最小

(38.1 mm)。夏季绿水资源大于春季,一方面因为夏季水量供给充足,另一方面,夏季植被生长旺盛,覆盖率高,蒸腾作用显著。最大地区位于源区东南部,为303.2 mm 最小地区位于西北部玛多附近,为148.37 mm。绿水资源秋季最大值出现在东南部红原站附近,为153.82 mm,最小值出现在源区西北部的玛多站附近,为59.25 mm。

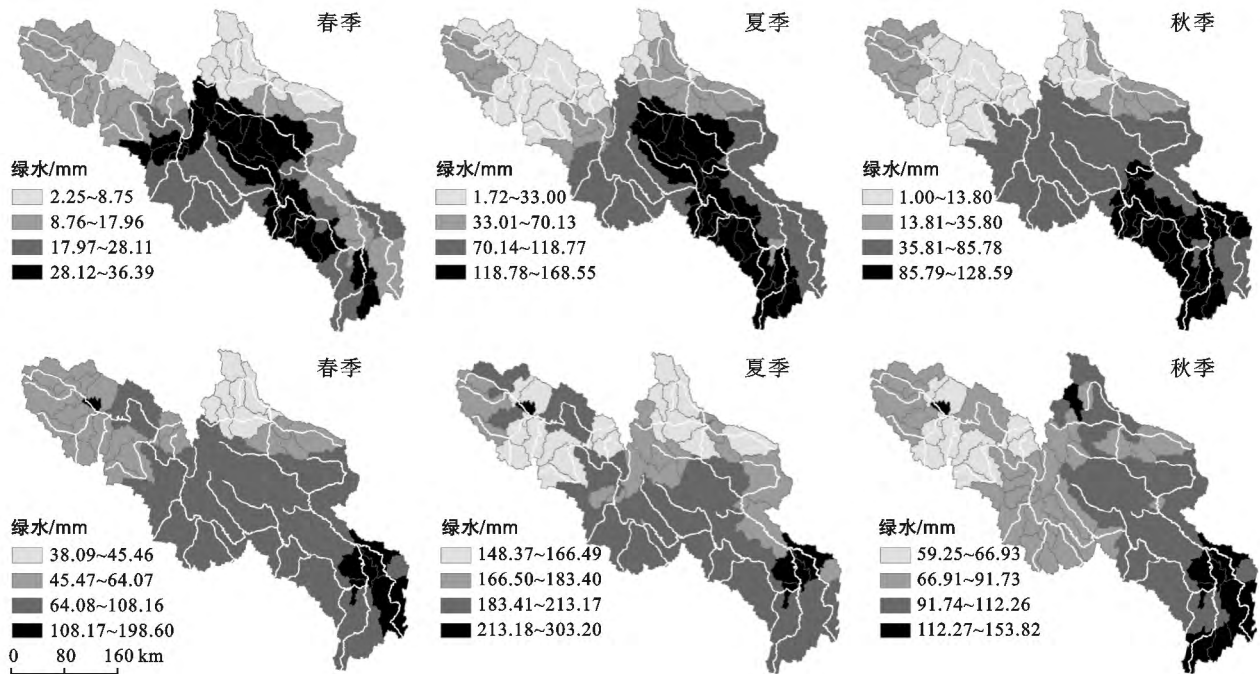


图3 黄河源区多年平均蓝绿水资源量季节分布

3.2.2 蓝绿水资源量在空间尺度上趋势变化 从图4可以看出,1961—2010年蓝水资源量主要减少在源区东南部的的主要产流区(3.65 mm/a)和中部地区(3.04 mm/a),而相对干旱区(西北部)则略微增加(0.20 mm/a),这和周德刚^[22]等人的研究一致。源区产流区蓝水资源的显著减少,将直接会导致源区径流量的减少,影响了黄河中下游地区水量的供给。绿水资源量除中部和东北部地区外,整个流域呈增加趋势,最大增加幅度可达1.61 mm/a。这主要是由于近年来黄河源区气候变化如温度的变化、降雨格局的改变,以及人类活动导致下垫面的变化综合效应所引起的。

从生长季的各个阶段来看,蓝水资源量春季变化较小,南部和中部地区下降幅度最大,为0.75 mm/a,西北部上升幅度最大,为0.25 mm/a,相比而言,夏季变化相对较大,源区东南部(主要产流区)久治、红原、若尔盖一带与中部果洛站附近下降幅度较大,最大可达1.98 mm/a,北部地区上升明显,增幅最大为1.38 mm/a。秋季的变化趋势基本与夏季相似,在源区的

东南部下降幅度最为剧烈,下降幅度为1.84 mm/a,北部地区上升明显,为1.38 mm/a,西北地区略有上升,为0.05 mm/a。春季,绿水资源量仅在西北部地区表现为上升趋势,且越靠近玛多站增加越明显,最大为0.25 mm/a,其他地区呈下降趋势。夏、秋两季,东南部红原站附近上升最大,为1.62 mm/a,中部果洛站和东北部同德站附近地区下降,这主要是由于日照时数在该地区的下降所引起的,其余地区均表现为上升趋势。而由水量平衡原理可知,红原站附近地区绿水资源量的显著上升无疑会加剧该地区蓝水资源的紧张。

4 结论

(1) 1961—2010年黄河源区生长季多年平均蓝绿水总量为519.74 mm,水资源总量比较丰富,绿水资源量为蓝水资源量的2倍以上,并在不同生长季差异明显。而且近50 a来,因气候变化导致降雨格局的变化,在生长季蓝水资源量呈现出减少的趋势,而绿水资源量增加。

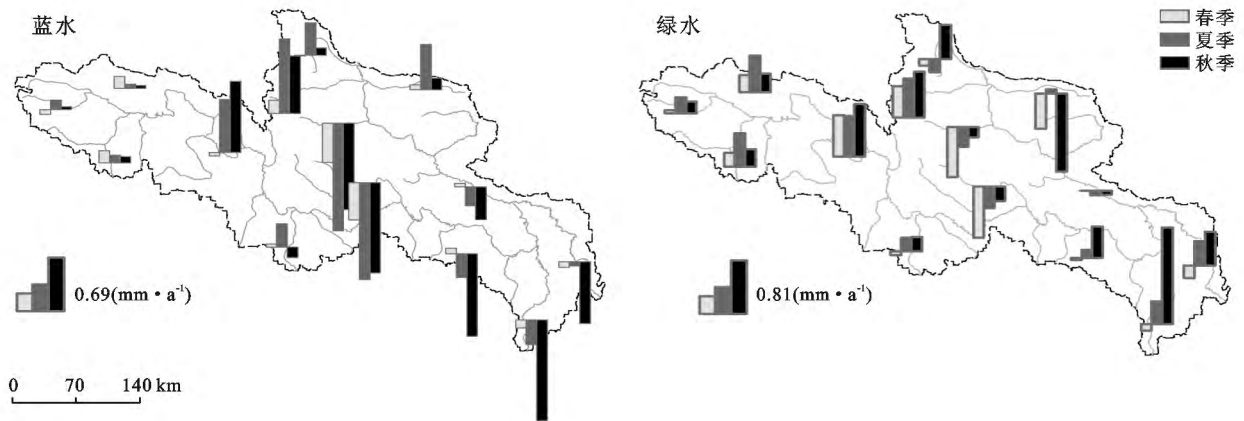


图 4 黄河源区 1961—2010 年蓝绿水资源季节变化趋势

(2) 近 50 a 来蓝绿水资源量在空间上均呈现出由东南向西北递减的趋势,受气候变化以及东南和西北部下垫面的影响,西北部绿水资源量增大。并且在不同生长季,蓝水资源量在源区东南部地区的秋季减少明显。绿水资源春季西北部地区增加,夏、秋两季红原站附近上升。

(3) 近 50 a 黄河源区蓝绿水资源量时空变化表明,在气候变化的背景下源区降水通过陆表生态系统转换为绿水的比例在空间和时间上均发生了变化,使得绿水资源量增加,蓝水资源量减少,源区产流能力下降,这种变化未来发展趋势如何,是否将进一步加剧黄河流域水资源的紧缺程度,必须引起足够的重视。

[参 考 文 献]

- [1] Falkenmark M. Coping with water scarcity under rapid population growth [R]. Conference of SADC Ministers, Pretoria, 1995.
- [2] Ringersma J, Satjes N, Dent D. Green water: Definitions and data for assessment (ISRIC Report) [R]. Wageningen, 2003.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Jurgen S, Karim C A, Raghavan S, et al. Estimating of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1): 30-49.
- [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资源量评价为例[J]. 南水北调与水利科技,2013,11(1):12-16.
- [8] 荣琨,陈兴伟,李志远,等. 晋江西溪流域绿水蓝水资源量估算及分析[J]. 水土保持通报,2011,31(4):12-15.
- [9] 时兴合,秦宁生,汪青春,等. 黄河上游径流变化特征及其影响因素初步分析[J]. 中国沙漠,2007,27(4):690-697.
- [10] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展[J]. 地理科学进展,2005,24(5):121-130.
- [11] 臧传富,刘俊国. 黑河流域蓝绿水在典型年份的时空差异特征[J]. 北京林业大学学报,2013,35(3):1-10.
- [12] 吴险峰,刘昌明. 流域水文模型研究的若干进展[J]. 地理科学进展,2002,21(4):341-348.
- [13] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(4):559-565.
- [14] Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine: Thur watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2): 413-430.
- [15] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型:理论与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006:54-55.
- [16] 鲁春霞,马聪. 猫跳河流域气象水文因素的变化趋势分析[J]. 水土保持通报,2012,32(6):262-267.
- [17] 常国刚,李林,朱西德,等. 黄河源区地表水资源变化及其影响因子[J]. 地理学报,2007,62(3):312-320.
- [18] 李万寿,吴国祥. 黄河源头断流现象成因分析[J]. 水土保持通报,2000,20(1):5-8.
- [19] 李珊珊,张明军,汪宝龙,等. 近年来三江源区降水变化的空间差异[J]. 生态学杂志,2012,31(10):2635-2643.
- [20] 徐浩杰,杨太保. 近 13 a 来黄河源区高寒草地物候的时空变异性[J]. 干旱区地理,2013,36(3):467-474.
- [21] 郭瑞萍,莫兴国. 森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异[J]. 应用生态学报,2007,18(8):1751-1757.
- [22] 周德刚,黄荣辉. 黄河源区水文收支对近代气候变化的响应[J]. 科学通报,2012,57(15):1345-1352.
- [23] 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):32-34.