

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkk.2021.0069

王艺璇,沈彦军,高雅,等.永定河上游环境变化和水资源演变研究进展[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):656-668. WANG Y X, SHEN Y J, GAO Y, et al. Research progress on the changes of environmental and water resources in the upper Yongding River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 656-668. (in Chinese)

# 永定河上游环境变化和水资源演变研究进展

王艺璇<sup>1,2</sup>, 沈彦军<sup>1,2</sup>, 高雅<sup>3</sup>, 刘行<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050022;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河北省水文勘测研究中心, 石家庄 050031)

**摘要:**在回顾文献研究进展的基础上,对永定河上游流域气候变化、土地利用变化及水资源量质演变的特征进行梳理和总结,并揭示其驱动因素。分析指出:永定河上游流域气温突变型升高,最低气温及冬季气温上升显著,年均降水量呈现不显著下降趋势,夏季降水下降趋势明显;潜在蒸散发和实际蒸散发并未随温度升高而升高,且流域存在一定的“蒸发悖论”现象。土地利用变化较为剧烈,以林地和建设用地增加,耕地、未利用地和水体面积减少为主要特征。高强度人类活动是导致径流下降的主要原因;水体污染物以氮磷为主,整体上上游水质优于下游,工业废水和农业面源是水体中氮、磷持续增加的主要原因。最后结合流域水资源可持续发展面对的挑战,对未来研究问题提出科学建议。

**关键词:**气候变化;土地利用变化;蒸散发;地表径流;水质;面源污染

中图分类号:TV11 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



永定河是我国海河流域五大支流之一,发源于干旱半干旱区,其上游流域不仅是重要的水源地,更是遏制沙尘、涵养水源的重要生态屏障及京津冀协同发展的生态大动脉<sup>[1]</sup>。推进永定河流域水资源可持续发展是落实《永定河综合治理与生态修复总体方案》的必然要求,也是贯彻中央决策部署和推动京津冀协同发展在生态领域率先突破的重大标志性工程。要恢复永定河的水域生态,必然需要上游源流区的水系支撑;要恢复上游区河道水系,必然需要对气候、人类活动及其对区域水量水质的影响作细致分析。

永定河全长 747 km,流域面积约为 4.7 万 km<sup>2</sup>,流经山西、内蒙、河北、北京、天津等 5 个省、自治区、直辖市(112°E~117°45'E, 39°N~41°20'N)。流域整体地势西北高、东南低,高程变化较大,山区面积

占 80% 以上<sup>[2]</sup>,南北分别为大清河和内陆河水系,东西分别与潮白河和黄河流域相接<sup>[3]</sup>;以官厅水库和三家店水库为界,分为上、中、下游 3 段<sup>[4]</sup>。本研究主要关注官厅水库以上永定河上游流域部分,主要包括洋河和桑干河两大支流,是官厅水库的主要补给源及水源涵养区,见图 1。洋河发源于内蒙古和山西省,主要流经河北张家口境内,总长度为 262 km,流域面积约 15 078.0 km<sup>2</sup>;桑干河主源发源于山西省宁武县,流经山西和河北两省,长度为 241 km,面积约为 16 748.7 km<sup>2</sup><sup>[4-5]</sup>。

永定河上游流域属典型温带大陆性季风气候,降水量稀少(约 400 mm)且蒸发量大,属光照充足但水资源严重不足的地区。过去几十年,受气候暖干化、土地利用剧烈变化及工农业用水需求不断增加的影响,流域供需水矛盾突出且水循环过程变的

收稿日期:2020-11-18 修回日期:2021-04-08 网络出版时间:2021-04-23  
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210422.1546.008.html  
基金项目:国家自然科学基金(41807177)  
作者简介:王艺璇(1994—),女,河北定州人,主要从事流域水文模拟研究。E-mail:wangyixuanjy@foxmail.com  
通信作者:沈彦军(1986—),男,内蒙古正镶白旗人,研究员,博士,主要从事流域生态水文模拟与水环境管理研究。E-mail:shenyanjun@sjziam.ac.cn

更加复杂,出现了水域面积明显缩减、地下水位下降、径流量锐减乃至部分河道完全断流的现象<sup>[6-8]</sup>。此外,流域内城市化相对集中,受高强度人类开发及水量减少的影响,导致点源、面源污染增加,水体自净能力减弱,水质恶化问题突出<sup>[9-10]</sup>。水资源短缺和水环境恶化对流域经济社会发展和生态文明建设带来了巨大挑战。

永定河地理位置独特且地处生态环境敏感区,该流域气候、水资源及生态变化受到了众多学者关注。在大量文献分析的基础上,对永定河上游流域气候变化、土地利用变化、水量和水质演变的进展进行梳理和归纳并提出合理的科学建议,以期永定河流域水资源可持续管理提供科学参考。



图1 永定河上游流域

Fig. 1 Schematic diagram of the Yongding River basin

## 1 永定河上游流域气候变化

气候变化是导致流域或区域水循环变化的重要驱动力,一直是全球各界关注的热点。流域气候变化特征的研究对于理解水资源的形成转化过程意义重大,是流域适应气候变化和水资源可持续管理的基础。

### 1.1 气温变化

受全球变化影响,永定河上游流域与中国北方地区的气温变化特征大体一致,过去50多年平均温度“突变型”升高,增温速率约为 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,显著高于全国( $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ )和全球( $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ )的平均增温水平<sup>[11-12]</sup>。但由于受研究方法、站点的选择和分析资料序列长短的影响,众多学者对突变年份的识别并不一致:如Xia等<sup>[13]</sup>基于非参数Mann-Kendall(M-K)突变检验方法研究发现,永定河上游流域1960—2009年平均气温上升突变年份在1992年;刘安全<sup>[14]</sup>采用M-K方法分析了张家口市永定河流域1967—2007年平均气温在1990年后突变上升;侯蕾等<sup>[11]</sup>基于累积距平法分析显示,永定河上游流域1960—2012年平均气温的上升突变年份分别为1988年和1993年。综上所述,研究区平均温度在1960—1990年较为平稳,20世纪90年代开始

突变升高,2000年以后呈现极显著增加趋势。气候变化的归因具有一定复杂性,任国玉等<sup>[15]</sup>通过对全国尺度气候变暖的成因分析认为,人类活动是造成温度升高的重要原因,尤其是城市化及温室效应等,但还没有明确的定量结论。对于未来的冷暖趋势,不同模式气候情景预测结果均显示,研究区气温将持续增高<sup>[16-18]</sup>。

日夜不对称性和季节不对称性是永定河流域气温增暖的另一种表现,主要以最低温度升幅大于最高温度升幅,冬、春季气温变暖趋势显著高于其他季节变暖趋势为主要特征<sup>[14-15,19]</sup>,也有学者<sup>[20]</sup>发现,最低气温变化在海拔高且平均气温低的地区波动更剧烈。永定河上游地处半干旱区,冷季快速增温可能受极涡强度减弱、极地冷高压和西伯利亚高压偏弱等气候系统异常的影响<sup>[21]</sup>,此外,人类活动(城市化、土地利用等)也可能是造成冷季快速增温的重要因素。周雅清等<sup>[22]</sup>研究发现,城市热岛会对观测站气温监测产生显著影响,城市测站附近的气温日较差一般呈现减少趋势,而乡村测站附近的气温日较差变化趋势一般不明显。由于永定河流域本身观测站点较少,很难定量这种城市化对整个流域气温变化的贡献,还需要更为全面的观测和方法来支持。

气候变化与农业生态系统的稳定有着密切的联

系,已有研究结果显示,平均温度升高会导致华北地区农作物生长季开始日期显著提前且生长季明显延长<sup>[23-24]</sup>,因为最低温升幅高于最高气温升幅导致昼夜温差显著下降<sup>[25]</sup>,冬、春季气温快速增温易导致土壤失墒加快,从而引发春旱和影响作物的适时播种和出苗率<sup>[26]</sup>。此外,极端气候事件频发也是诱发农业气象灾害的重要原因<sup>[27]</sup>,永定河上游流域已表现出气温日较差减小并有逐渐减小的趋势且冬季气温日较差减小幅度最大<sup>[28]</sup>,针对类似的气温和极端气温变化对流域农业生产和生态系统的影响的研究还相对较少。农业及生态系统如何适应气候变化是区域可持续发展的重要基础,应加以重视。

## 1.2 降水变化

永定河上游流域降水量从西北向东南方向递增,过去 50 多年降水量无明显突变现象,整体呈现不显著下降的趋势(约为 8.5 mm/(10 a));多年数据平均态下以 20 世纪 60—70 年代为丰水期、90 年代为平水期、80 年代和 2000 年以后降水偏枯为主要特征<sup>[11,13,29]</sup>。虽然流域平均降水变化趋势并不显著,但降水的年内分配特征却发生了明显变化,表现为夏季降水减少,其他季节或稍许增加或无明显变化。尤其是 2000 年后,汛期月降水量均少于平均值而非汛期的降水量均大于平均值<sup>[6,11,30]</sup>。降水的这些变化可能与海河流域夏季降水关键区演变相关,海河流域 6—8 月关键降水季降水减少,可能受东北冷涡、西太平洋副热带高压脊线位置、西北太平洋副高和东亚夏季风指数影响<sup>[31]</sup>。永定河上游地区径流来自于冬春季融雪融冰水及夏季降水,正是夏季降水的减少,叠加上冬、春季增温的变化趋势(前节所述),从而导致部分支流表现为春汛所占全年径流的权重增加而夏汛所占比重则呈现减少趋势<sup>[32]</sup>。

从降水量不同等级来看,永定河流域大雨和暴雨量呈现极显著下降趋势,小雨和中雨减少趋势并不显著;从不同等级降水日数来看,永定河暴雨降水日数下降趋势明显。不同等级降水的变化与厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)关系密切<sup>[33]</sup>。马梦阳<sup>[34]</sup>基于降水与水资源量之间的多元线性回归模型发现,小雨和中雨对水资源量的贡献要小于大雨和暴雨,流域降水的上述变化可能会导致同样降水总量的条件下,流域产流能力下降。流域尺度上,桑干河和洋河流域季节性降水空间差异显著,但总体上均呈现不显著下降趋势<sup>[14,35]</sup>。

由于对降水的预测存在很大不确定性,不同学者对流域未来的降水进行预测,得出了不同答案。

杨楠<sup>[36]</sup>根据 R/S 原理分析发现,永定河流域降雨具有状态持续性,即未来年降水可能进一步减少。曾思栋等<sup>[16]</sup>、王国庆等<sup>[18]</sup>基于未来气候情景模式数据研究发现,降水量可能呈现增加趋势(可能增加约 8%左右),但姜姗姗等<sup>[17]</sup>研究发现未来不同排放情景下降水量并没有明显的增加趋势。颇为可信的是:任国玉等<sup>[37]</sup>研究发现,近几十年降水的减少是海河流域气候自然低频周期性振动的部分,未来可能呈增多趋势;丁一汇等<sup>[38]</sup>研究发现,受气候持续变暖的影响,夏季风雨带将持续北移,受东亚季风影响的大部分中国北方地区将可能出现降水增加的趋势。永定河流域降水未来如何变化还需要深入探讨。

## 1.3 蒸散发变化

在全球变化条件下,区域气温、降水、相对湿度和风速等指标也发生了变化,它们可能通过影响潜在蒸散发来加剧或减缓对气候和流域水循环的影响。目前,海河流域的蒸发皿观测到的水面蒸发在过去 50 多年表现为下降趋势<sup>[39]</sup>,通过彭曼公式计算得到的潜在蒸散发也呈现为一致的减少趋势,但没有通过显著性检验。从子流域尺度的蒸散发下降趋势对比来看,洋河流域的下降趋势要大于桑干河流域<sup>[29]</sup>。Xia 等<sup>[13]</sup>基于 SWAT 模型模拟结果分析发现,永定河流域实际蒸散发在年代际上有下降趋势。此外,基于遥感产品反演的实际蒸散发也并没有很明确的整体变化趋势,大部分区域变化趋势不明显,部分斑块区存在微弱增加和减少的趋势。从实际蒸散发与气温、降水的相关和偏相关系数空间分布来看,永定河上游流域大部分地区均属于降水驱动型,因此,在一些地方也发生了实际蒸散发与气温呈现负相关关系<sup>[40]</sup>。如前文所述,永定河上游流域平均气温是呈现显著上升的,说明该地区存在一定的“蒸发悖论”现象。

蒸散发的变化不仅受气温、降水因素的影响,还受相对湿度、风速、日照时数、海拔以及人类活动等诸多因素的影响。祁添垚等<sup>[41]</sup>利用模糊聚类 FCM 算法研究发现,相对湿度是影响该流域蒸发皿蒸发量的关键因子;熊玉琳等<sup>[39]</sup>通过对蒸发皿蒸发量与气象要素的回归关系分析发现,蒸发皿蒸发量与相对湿度呈现显著负相关关系;郭军等<sup>[42]</sup>认为降水和相对湿度变化是影响蒸发的重要因子,但日较差的作用也不能忽视,因为对蒸发作用影响最大的是日最高温度而日较差受日最高气温影响显著;刘敏等<sup>[43]</sup>认为平均风速降低和城市化建设导致的地表粗糙度增加也可能是影响蒸发的重要因子;Liu 等<sup>[44]</sup>发现,区域尺度

上蒸发皿蒸发在 1992 年有突变上升的迹象,且与温度和风速变化幅度等有密切关系。当前对于影响潜在蒸发和实际蒸发变化的确切原因尚未充分了解,但都与气候变化和人类活动有密切关系,这些关系的定量还需要更为精确的观测和探索分析。

针对未来气候变暖背景下流域参考作物蒸散和实际蒸发的变化趋势,邢万秋等<sup>[45]</sup>基于 GCM 数据分析发现,永定河流域参考作物蒸散发与温度变化大体一致,均呈现增加的趋势;曾思栋等<sup>[16]</sup>基于未来气候模式数据来驱动 SWAT 模型,对流域水平衡分量进行模拟分析发现,永定河上游流域实际蒸发也呈现增加趋势。不论是基于未来气候模式数据还是基于水文模型来估算潜在和实际蒸散发都存在很大不确定性,蒸散发的演变机理及其驱动机制还需深入研究。

## 2 土地利用变化特征

永定河上游流域虽地处农牧交错带,但从土地利用类型面积上来看:全上游流域及桑干河、洋河各子流域土地利用结构基本一致,以耕地、草地和林地为主,三类土地利用流域面积占比均在 90% 以上;其次分别为建设用地、水域和未利用土地<sup>[46]</sup>。过去 30 多年,永定河上游流域土地利用的变化整体表现为 2000 年后的土地利用类型受自然变化和人类活动的影响显著高于 2000 年以前,充分体现了国家政策导向和高强度人类活动的影响。永定河上游山区属海河流域水土流失保持重点治理地区,随着“退耕还林”“退耕还牧”等水土流失治理工程的实施及城市化发展,林地和建设用地在 20 世纪 80—90 年代变化强度最大,但转入转出率均小于 10%;20 世纪 90 年代,建设用地持续增加,变化速度也最快,耕地、林草地相互转化;2000 年以后土地利用变化相对剧烈,表现为建设用地显著增加,未利用地向耕地和草地转化及耕地、林草地间相互转化,水域面积减少<sup>[6,47]</sup>。

土地利用变化是反映人类活动与自然生态系统之间相互作用的重要纽带,既是生态服务的贡献者,也是其价值变化的敏感因子<sup>[48]</sup>。众多学者针对土地利用变化的环境影响效应进行了研究,主要分为生态环境服务和对水资源的影响两个方面。侯蕾等<sup>[46]</sup>分析了永定河上游流域生态环境质量指数及土地利用变化的生态贡献率发现,过去 30 多年永定河上游流域生态环境质量指数总体上上升,生态环境质量好且区域生态环境基本稳定,其中,2000—2010 年退耕还林、还草的转化占生态贡献率的 54%,但在人类活动集中的城市区周边也存在高覆

盖草地向旱地、建设用地等类型的转化的生态环境质量恶化现象。由于人类活动对土地利用高强度的干扰活动加剧,并且一些变化在永定河上游流域分布比较均匀,也使得流域整体呈现景观破碎化和生态风险增加,尤其是近河道和人类高强度开发区<sup>[48-50]</sup>。此外,半干旱流域的径流对降雨和土地利用变化更加敏感,如植被覆盖改善除了发挥生态效益外,也可能会加大区域的蒸散量和土壤水分耗散,导致一些流域径流量显著下降<sup>[51]</sup>。因此,土地利用/覆被变化及水利工程设施的建设也被认为是永定河流域径流下降的主要原因<sup>[47]</sup>。

## 3 气候变化和人类活动对流域水量水质的影响

气候变化引起流域水文循环过程的改变,进而影响水资源的时空分布特征;人类活动强度的增加,在显著影响水循环的同时也造成了流域水环境的恶化。因此,气候变化和人类活动耦合作用对永定河上游流域水量和水质的影响引起了广泛关注,其中,水量和水质的变化特征及其驱动因素是主要的研究方向。

### 3.1 径流量演变特征及其影响因素

永定河上游流域主要包括桑干河和洋河两大支流,两河多年(1960—2012 年)平均径流量分别为 3.18 亿  $\text{m}^3$  和 2.89 亿  $\text{m}^3$ <sup>[11]</sup>。由于地处季风气候区,永定河上游流域降水主要集中在夏季,冬季会累积部分积雪,因此,有春汛(3、4 月)和夏汛(7、8 月)2 个汛期。过去 50 多年,受气候变化和人类活动的影响,流域总径流量和各支流径流量在多年尺度上均呈现显著减少的趋势;从年代际来看,20 世纪 60—70 年代径流量偏丰,20 世纪 80 年代以后径流量开始大幅下降,以 1982 年突变减少为主要特征<sup>[16,22]</sup>。如前所述,夏季降水的减少还可能导致相对天然的子流域的径流具有汛期流量减少而非汛期流量增加的年内变化特征<sup>[32]</sup>。

降水是影响径流的最重要的因子之一,但从长时间尺度上,其与径流量的相关性并不显著,其中,最重要的影响因素就是强人类活动的干扰<sup>[6,48]</sup>。人类活动对径流量的影响分为直接和间接两个方面:直接影响包括人口增长和社会经济发展导致的耗水量增加;间接影响包括土地利用变化,基础设施建设、水土保持等措施对下垫面条件的改变,从而引起地表径流变化;两方面的叠加作用,尤其是人类活动对自然水循环的改变,给区域水资源演变研究带来了困难<sup>[52-54]</sup>。

区分气候变化和人类活动对径流变化的贡献率是水文研究中的重要科学问题。部分学者采取水文模型和径流还原相结合<sup>[54-55]</sup>、情景假设<sup>[54,56-58]</sup>、水文序列分析<sup>[53]</sup>、相关分析<sup>[59]</sup>、单因素分析<sup>[30]</sup>、Budyko 假设<sup>[58]</sup>等方法对气候和人类活动对径流下降的影响进行了量化,见表 1。但基于分析方法和研究时段的不同,气候变化和人类活动对径流减少的贡献率差异较大,比例分别为 10.5%~39.1%和 60.3%~89.5%。虽存在一定的不确定性,但人类活动尤其是引水灌溉、大量开采地下水导致地下水位下降、包气带水储量及其对河流补给减少,被认为是造成径流锐减的主要原因<sup>[8,47,55,60]</sup>。此外,虽然识别径流下降的驱动因素的研究开展较早,但大多数研究只能定性区分气候变化和人类活动哪一类因素贡献较大,研究中能够精细量化人类活动(社会用水、水库、

灌溉、生态工程)对流域径流变化影响的研究却并不多见。这主要是由于永定河上游流域地处高强度人类干扰区,径流形成的一致性已受到破坏,水文监测断面所测时间序列径流资料因受社会取用水、河流引水灌溉、水库截留等因素的影响,已不能代表流域的水文情势;统计分析、水热平衡和水文模型模拟很难充分考虑人类活动对径流的影响,给气候变化和人类活动对径流影响的贡献率分离带来极大误差<sup>[55,58]</sup>;径流还原方法在高强度人类影响和下垫面变化剧烈地区也会产生“还原失真”和“还原失效”的问题,无法很好地解释水循环演变规律<sup>[2]</sup>。此外,现有的集总和分布式模型也很难动态的考虑生态过程对水循环的影响。因此,径流减少的归因和定量还需重点考虑人类活动的影响<sup>[55,61]</sup>,才可能对流域径流演变的驱动机制做出合理阐释。

表 1 永定河上游流域水量水质变化及影响因素研究成果汇总

Tab. 1 Results summary on water quantity and quality changes and their influencing factors in the upper Yongding River basin

主题	研究流域	方法	结论
径流变化及影响因素	桑干河流域 <sup>[30]</sup>	线性回归和 SWAT 水文模型情景假设	1957—2012 年气候变化和人类活动对桑干河流域径流的贡献率分别约占 37%~39%和 62%~65%
	永定河上游 <sup>[47]</sup>	水文序列趋势、突变等统计分析	1956—2013 年径流量显著下降,20 世纪 80 年代初突变,人类活动是径流下降的主因
	永定河上游 <sup>[55]</sup>	径流还原、SWAT 水文模型情景假设	1980—2000 年气候变化和人类活动对径流下降的贡献率分别占 65.4%和 34.6%,气候变化是径流减少的主因
	洋河流域 <sup>[57]</sup>	趋势分析法和降水-径流关系模型	1966—1999 年径流呈下降趋势,人类活动对洋河流域径流下降的贡献占 83.2%
	永定河上游 <sup>[58]</sup>	SWAT 模型情景假设	1970—2006 年土地利用对水文过程影响程度低,气候变化对流域水文影响程度达 75%以上
	永定河上游 <sup>[60]</sup>	Budyko 水热平衡和敏感系数法	1960—2010 年气候变化对径流下降的贡献占 10.5%~12.6%,人类活动对径流下降的贡献占 87.4%~89.5%
水质状况及评价	永定河上游 <sup>[31]</sup>	水质数据趋势及指标统计	总氮、总磷氮和化学需氧量是永定河上游水质较差的原因,总磷和化学需氧量污染物主要来自于人类活动污水排放和高强度农业施肥和灌溉活动
	永定河上游 <sup>[62]</sup>	野外采样,指标评价	永定河上游流域轻度和中度污染站点占多数,水系连通性差,水生态环境质量不佳
	永定河流域河北段 <sup>[63]</sup>	负荷历时曲线法	永定河上游河北段洋河和桑干河中下游水体总磷负荷超标
	官厅水库上游流域 <sup>[66]</sup>	野外采样,统计分析	水库上游总体溶解氧和总磷含量超标;洋河上游以总磷和浊度污染为主,桑干河和洋河下游以有机物污染和氨氮营养盐污染为主
	永定河水系张家口段 <sup>[67]</sup>	内梅罗污染指数评价法;多元统计分析法	洋河和桑干河中下游轻中度污染,总磷和氟化物贡献率为洋河(分别占 74%,61%)>桑干河(16%,31%),其中洋河中游春夏季水质较差,污染物源于农业面源污染和生活污水
	永定河水系张家口段 <sup>[73]</sup>	水质综合污染指数法	BOD、COD、硝态氮及总氮对洋河干流水质影响较大,水量减少导致水环境容量减小、点源排放及农业面源是主要因素

### 3.2 水质演变特征及其影响因素

永定河上游流域水资源发源于高原山区,历史

上水质优良并成为北京的主要饮用水水源地之一。受社会经济发展及人类活动的影响,1997 年代因水

环境污染退出饮用水系统;之后经过多年的水土工程治理,2007年从新恢复了饮用水水源地功能。现阶段,永定河上游流域整体水质为轻度污染或部分河段中度污染,且氮磷超标严重<sup>[62-65]</sup>,不同支流及其上下游污染状况呈现出显著的区位差异(表1)。洋河流域约70%左右的河段存在不同程度的水污染,尤其是下游污染较为严重;桑干河上游水质较差,以总磷和浊度污染为主<sup>[66-67]</sup>,中下游受水体沿程自净及水库过滤的影响,水质优于上游,以氨氮、COD及挥发酚污染为主<sup>[68-69,44-45]</sup>,由于受上游水库调节作用的影响,流域水质季节变化不明显,整体水质要优于洋河<sup>[70-71]</sup>。

水量是维持生态系统的前提,水质是生态系统发挥正常功能的重要基础<sup>[72]</sup>。永定河上游水质恶化是点源和农业面源污染共同作用的结果(表1)。首先,20世纪90年代以来径流的减少降低了流域水体的自净能力,导致水环境容量减小;其次,永定河上游流域洋河和桑干河两岸集中了大量企业,大量的工业废水、生活污水进入河道导致了水体污染<sup>[73-74]</sup>;此外,流域面源污染也是构成水环境恶化的重要因素<sup>[61,75]</sup>。但不同河段水质恶化的原因存在着显著空间差异,上游水污染主要源于农业面源和生活污水<sup>[66-67]</sup>,中下游河段由于历史时期城市化集中且集中了较多的工业<sup>[51-53]</sup>,污染包括工业废水、生活污水及农业面源污染<sup>[74,76-78]</sup>。虽然随着国家水污染治理政策的实施和对点源污染的管理,洋河和桑干河流域水质均有极显著改善,但部分河段仍存在不同程度的污染<sup>[55,79]</sup>。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

(1)流域气温存在突变上升的趋势。其中,最低气温上升幅度显著高于最高气温上升幅度,冬、春季气温上升显著高于其他季节。造成这种气温变化的原因可能与温室效应引起的大尺度气候变暖有关,也可能受极显著的人类活动,如城市化建设等的影响。未来有可能持续升温。

(2)流域降水存在不显著下降趋势。季节尺度上,夏季降水量下降明显;从降水不同等级来看,大雨和暴雨量量级的降水日数显著下降。降水季节变化可能受季风区夏季降水关键区演变路径的影响;降水量级的变化与ENSO现象关系密切。受大尺度夏季风北移及自然低频周期的影响,流域降水未来可能增多。

(3)蒸发皿蒸发、潜在蒸发存在不显著下降的趋

势,实际蒸散发在年代际尺度上并未升高,存在一定的“蒸发悖论”现象。降水、相对湿度、风速及日较差等均对蒸散发起重要作用,人类活动导致的城市化建设作用也不容忽视,它们对蒸散发影响的具体定量及蒸散发未来的变化趋势还需查明。

(4)流域以耕地、林草地为主,受“退耕还林”及城市化等政策的影响,耕地面积减少、建设用地及林草地面积增加,尤其是2000年后各地类之间相互转化频繁。土地利用变化一方面提高了生态环境质量指数,另一方面也导致了景观破碎化及径流减少。

(5)流域径流呈显著下降趋势,高强度人类活动的影响是径流下降的主要驱动因素。永定河上游水质整体有改善,仍存在部分河段不同程度的污染;点源和面源共同造成水质污染,磷超标严重;桑干河和洋河上下游的污染源有显著差异。

### 4.2 展望

永定河上游地处“水源涵养功能区”和“生态环境支撑区”两区建设的重要区位,同时,也是京津冀生态协同发展的率先突破领域,担负着饮水安全与生态协同发展的重任。深化对永定河上游流域环境变化及区域水量水质变化规律的认识,对于流域合理应对气候变化和水资源合理利用具有重要意义。永定河上游流域未来水资源的可持续发展仍有如下问题亟待解决:

(1)农业结构适水调整和发展节水技术是最为急迫的科技需求。永定河上游流域自然环境较差,水资源总量较少,加上社会经济发展的重大需求,水资源已严重超载。《永定河综合治理与生态修复总体方案》显示,永定河流域山区水资源开发利用率高达97%,其中,农业用水占用水总量的66%,地表水资源开发利用率高达89%。按照当前水资源供需现状和“地下水压采”的政策来看,如何发展绿色、节水农业是流域水资源可持续发展的重要挑战。

(2)水资源形成机制及其生态环境效应是亟待回答的科学问题。土地利用变化、水利工程设施的修建等人类活动显著改变了水循环过程,使水资源形成转化机制发生了巨大变化;气候变化、人类高强度开发利用以及流域下垫面异质性条件的叠加作用下,流域污染物迁移和截留转化过程更显复杂,水量和水质年内变化受人类活动如工业、种植业及水利设施在不同时段的调控影响显著,蓄水和下泄水量不定期、不定量给径流序列分析及水体纳污能力分析带来困难。加强数据综合监测和实现数据共享,

开发出耦合自然变化和人类活动的过程模型是流域水资源科学管理的重点和难点。

(3)流域协同管理和治理应是未来关注的重点科学问题。永定河上游流域具有重要的生态意义,同时也承担着脱贫攻坚、发展社会经济的重要任务;流域综合治理涉及到多个行政区,区域之间发展不协调。如何以水资源为约束条件来协调水资源-社会-生态之间的关系,如何量化生态流量并对欠发达地区进行生态补偿,均是协调地区缺水、经济发展和生态保护之间矛盾的重要问题。

#### 参考文献(References):

[1] 冀丰渊. 京津冀协同发展规划纲要[R]. 廊坊: 对接京津与环首都沿渤海第13次论坛, 2016: 10. (JI F Y. Outline of the plan for coordinated development for the Beijing-Tianjin-Hebei region[R]. Langfang: The 13th forum connecting Beijing and Tianjin with the capital around the Bohai Sea, 2016: 10. (in Chinese))

[2] 王磊. 永定河山区分布式水文模型及地表水资源[D]. 北京: 清华大学, 2004. (WANG L. Distributed hydrological model and assessment of surface water Resources in Yongding mountain area[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese))

[3] 高佳佳, 罗维, 奚晓霞. 首都水源地: 洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4573-4581. (GAO J J, LUO W, XI X X. Estimation and impact analysis of anthropogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) emission inventory in Yanghe River basin, capital water source area[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4573-4581. (in Chinese)) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 2014. 12. 021.

[4] 王绍瑛. 永定河的治理成就与存在问题[J]. 北京水利, 1997(3): 25-27. (WANG S Y. Achievements and existing problems in the management of Yongding River [J]. Beijing Water Conservancy, 1997(3): 25-27. (in Chinese))

[5] 董霞. 桑干河干流河道治理水文分析[J]. 水科学与工程, 2015(1): 30-33. (DONG X. Hydrologic analysis of Sanggan River trunk stream channel management [J]. Water Science and Engineering Technology, 2015(1): 30-33. DOI: 10. 19733/ j. cnki. 1672-9900. 2015. 01. 011. (in Chinese)) DOI: 10. 19733/ j. cnki. 1672-9900. 2015. 01. 011.

[6] 侯蕾. 北方水资源短缺流域生态-水文响应机制研究: 以永定河就为例[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019. (HOU L. Research on eco-hydrological response mechanism of water shortage watershed in

north China[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese))

[7] DAI D, SUN M D, LYU X B, et al. Evaluating water resource sustainability from the perspective of water resource carrying capacity: A case study of the Yongding River watershed in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Environ Sci Pollut Res 2020, 27: 21590-21603 DOI: 10. 1007/s1135-020-08259-5.

[8] DAI D, XU X, SUN M D. et al. Decrease of both river flow and quality aggravates water crisis in north China: A typical example of the upper Yongding River watershed[J]. Environ Monit Assess 2020, 192: 421 DOI: 10. 1007/s10661-020-08371-6.

[9] 孙峰, 郝芳华. 基于GIS的官厅水库流域非点源污染负荷计算研究[J]. 北京水利, 2004(1): 16-18. (SUN F, HAO F H. Gis-based non-point source pollution load calculation in Guanting reservoir watershed[J]. Beijing Water Conservancy, 2004(1): 16-18. (in Chinese))

[10] DAI R, LIU H, QU J, RU J, et al. Agricultural non-point source pollution in the Yongding River basin [J]. Ecological Indicators, 2008, 36: 254-261. DOI: 10. 1016/j. ecolind. 2013. 07. 012.

[11] 侯蕾, 彭文启, 董飞, 等. 永定河上游流域水文气象要素的历史演变特征[J]. 中国农村水利水电, 2020(12): 1-8, 14. (HOU L, PENG W Q, DONG F, et al. Historical evolution characteristics of hydrometeorological elements in the upper reaches of Yongding River basin [J]. China's Rural Water and Hydropower, 2020(12): 1-8, 14. (in Chinese))

[12] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化海洋蓝皮书[Z]. 2019. (Climate Change Center of China Meteorological Administration. China climate change marine blue book[Z]. 2019. (in Chinese))

[13] XIA J, ZENG S D, ZHANG L P, et al. Hydrological responses to climate change in the water receiving area of the Middle Route Project for South-to-North Water Transfer[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2012, 26(1): 17-31.

[14] 刘宏权. 张家口市永定河流域气候变化及其对水文水资源系统的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2013. (LIU H Q. Impacts of climate change on hydrological and water resources systems in the Yongding River basin of Zhangjiakou City [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2013. (in Chinese))

[15] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716. (REN G Y, CHU Z Y, ZHOU Y Q, et al. Recent advances in the study of temperature change in China

- [J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10 (4): 701-716. (in Chinese))
- [16] 曾思栋,张利平,夏军,等. 永定河流域水循环特征及其对气候变化的响应[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 501-511. (ZENG S D, ZHANG L P, XIA J, et al. Water cycle characteristics of Yongding River basin and its response to climate change [J]. Journal of Applied Foundation and Engineering Science, 2013, 21(3): 501-511. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-0930. 2013. 03. 012.
- [17] 姜姗姗,占车生,李森,等. 基于CMIP5全球气候模式的中国典型区域干湿变化分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(1): 49-55. (JIANG S S, ZHAN C S, LI M, et al. Analysis of dry-wet changes in typical regions of China based on CMIP5 global climate model [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition), 2016, 52(1): 49-55. (in Chinese)) DOI: 10. 16360/j. cnki. jbnuns. 2016. 01. 012.
- [18] 王国庆,张建云,李岩,等. 海河流域基于多模式的未来气候变化趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 1043-1050. (WANG G Q, ZHANG J Y, LI Y, et al. Future climate change trends of Haihe River basin based on multiple models[J]. Resource Science, 2014, 36(5): 1043-1050. (in Chinese))
- [19] 王磊. 中国地表温度对气候变暖响应研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016. (WANG L. Study on the response of land surface temperature to climate warming in China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016. (in Chinese))
- [20] 徐丽梅,郭英,刘敏,等. 1957年至2008年海河流域气温变化趋势和突变分析[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 995-1001. (XU L M, GUO Y, LIU M, et al. Analysis on the trend and abrupt change of air temperature in Haihe River basin from 1957 to 2008[J]. Resources science, 2011, 33(5): 995-1001. (in Chinese))
- [21] 冉津江,季明霞,黄建平,等. 中国干旱半干旱地区的冷季快速增温[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 947-956. (RAN J J, JI M X, HUANG J P, et al. Rapid temperature Increase in cold season in arid and semi-arid areas of China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 947-956. (in Chinese))
- [22] 周雅清,任国玉. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响[J]. 高原气象, 2009, 28(5): 1158-1166. (ZHOU Y Q, REN G Y. Effects of urbanization on the trends of maximum and minimum air temperature and diurnal range in north China [J]. Plateau Meteorology, 2009, 28(5): 1158-1166. (in Chinese))
- [23] 董满宇,李洁敏,王磊鑫,等. 1960—2017年华北地区气候生长季变化特征及成因分析[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1990-2000. (DONG M Y, LI J M, WANG L X, et al. Characteristics and causes of climate change in north China from 1960 to 2017 [J]. Geographical science, 2019, 39(12): 1990-2000. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2019. 12. 018.
- [24] 胡实,莫兴国,林忠辉. 气候变化对海河流域主要作物物候和产量影响[J]. 地理研究, 2014, 33(1): 3-12. (HU S, MO X G, LIN Z H. Effects of climate change on phenology and yield of main crops in Haihe River basin [J]. Geographical Research, 2014, 33(1): 3-12. (in Chinese))
- [25] SHEN X J, LIU B H, DU H, et al. Spatiotemporal change of diurnal temperature range and its relationship with sunshine duration and precipitation in China [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(23): 13163-13179. DOI: 10. 1002/2014JD022326.
- [26] 钱锦霞,王振华. 山西省春旱趋势及对农业的影响[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 105-110. (QIAN J X, WANG Z H. Spring drought trend and its impact on agriculture in Shanxi Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(4): 105-110. (in Chinese))
- [27] 柏会子,肖登攀,刘剑锋,等. 1965—2014年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(5): 99-105. (BAI H Z, XIAO D P, LIU J F, et al. Research on the temporal and spatial pattern of extreme climatic events and agro-meteorological disasters in north China from 1965 to 2014 [J]. Geography and Geographic Information Science, 2018, 34(5): 99-105. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-0504. 2018. 05. 017.
- [28] 刘昌波,纪潇潇,许吟隆,等. SRES A1B情景下中国区域21世纪最高、最低气温及日较差变化的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(1): 89-96. (LIU C B, JI X X, XU Y L, et al. Variation of maximum and minimum temperature and daily range over China in the 21st century under SRES A1B scenario [J]. Climate and Environmental Research, 2015, 20(1): 89-96. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9585. 2014. 13190.
- [29] 陆文. 永定河上游张家口地区地表水资源时空分布模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2020. (LU W. Simulation of spatiotemporal distribution of surface water resources in Zhangjiakou area, upper reaches of Yongding River [D]. Beijing: University of Chinese Acade-

- my of Sciences(Institute of Mountain Hazards and Environment,CAS),2020. (in Chinese))
- [30] 张灵. 桑干河上游流域径流泥沙对气候要素与土地利用变化的响应研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017. (ZHANG L. Study on the response of runoff and sediment to climate factors and land use change in the upstream basin of Sangan River[D]. Beijing:China University of Geosciences(Beijing),2017. (in Chinese))
- [31] 何丽焯,程善俊,马宁,等. 海河流域夏季降水关键区季内演变及其环流配置的定量化分析[J]. 地理学报, 2020,75(1):41-52. (HE L H,CHEN S J,MA N,et al. Quantitative analysis on the interseasonal evolution and circulation configuration of key areas of summer precipitation in the Haihe River basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75 (1): 41-52. (in Chinese)) DOI:10.11821/dlxb202001004.
- [32] 裴宏伟,杨佳,张红娟,等. 变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):1-13. (PEI H W,YANG J,ZHANG H J,et al. Characteristics and driving forces of runoff evolution in Qingshuihe River basin under changing environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2020, 18(2): 1-13. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0022.
- [33] 马梦阳,韩宇平,王庆明,等. 海河流域极端降水时空变化规律及其与大气环流的关系[J]. 水电能源科学, 2019,37(6):1-4,74. (MA M Y,HAN Y P,WANG Q M,et al. Spatiotemporal variation of extreme precipitation and its relationship with atmospheric circulation in Haihe River basin [J]. Hydropower and Energy Science,2019,37(6):1-4,74. (in Chinese))
- [34] 马梦阳. 海河流域降水变化规律及其对水资源量的影响[D]. 郑州:华北水利水电大学,2019. (MA M Y. Changes of precipitation and its influence on water resources in Haihe River basin [D]. Zhengzhou:North China University of Water Resources and Electric Power,2019. (in Chinese))
- [35] 郭如侠. 洋河流域 3 个主要控制站水文特性分析[J]. 海河水利,2017(1):34-35,41. (GUO R X. Analysis of hydrological characteristics of three main control stations in Yanghe River basin[J]. Haihe Water Conservancy,2017(1):34-35,41. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2017.01.010.
- [36] 杨楠. 海河流域气候因子对径流的影响分析[D]. 保定:华北电力大学,2012. (YANG N. Analysis on the influence of climatic factors on runoff in Haihe River basin [D]. Baoding:North China Electric Power University,2012. (in Chinese))
- [37] 任国玉,王涛,郭军,等. 海河流域近现代降水量变化若干特征[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):103-111. (REN G Y,WANG T,GUO J,et al. Some characteristics of precipitation changes in Haihe River basin in modern times [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources and Hydropower, 2015,35(5):103-111. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2015.05.014.
- [38] 丁一汇,司东,柳艳菊,等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. 大气科学,2018,42(3):533-558. (DING Y H,SI D,LIU Y J,et al. Study on the characteristics,driving forces and Interdecadal variation of East Asian summer monsoon [J]. Atmosphere Science,2018,42(3):533-558. (in Chinese)) DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17261.
- [39] 熊玉琳,赵娜. 海河流域蒸发皿蒸发量变化及其影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):22-30. (XIONG Y L,ZHAO N. Changes of pan evaporation and its influence in the Haihe River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2020, 18(2): 22-30. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2020.0024.
- [40] 黄葵,卢毅敏,魏征,等. 土地利用和气候变化对海河流域蒸散发时空变化的影响[J]. 地球信息科学学报, 2019,21(12):1888-1902. (HUANG K,LU Y M,WEI Z,et al. Effects of land use and climate change on temporal and spatial variation of evapotranspiration in the Haihe River basin [J]. Journal of Geo-information Science,2019,21(12):1888-1902. (in Chinese)) DOI:10.12082/dpxxkx.2019.190269.
- [41] 祁添垚,张强,王月,等. 1960—2005 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析[J]. 地理科学, 2015,35(12):1599-1606. (QI T Y,ZHANG Q,WANG Y,et al. Analysis of pan evaporation trend and its influencing factors in China during 1960-2005 [J]. Geographical Science, 2015, 35(12): 1599-1606. (in Chinese)) DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2015.12.014.
- [42] 郭军,任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J]. 水科学进展,2005,16(5):666-672. (QUO J,REN G Y. Change of evapotranspiration and its causes in the Huang-Huai-Hai River basin [J]. Advances in Water Science, 2005,16(5):666-672. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2005.05.009.
- [43] 刘敏,沈彦俊,曾燕,等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. 地理学报,2009,64(3):259-269. (LIU M,SHEN Y J,ZENG Y,et al. Trends and causes of pan evaporation in China in the past 50 years

- [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 259-269. (in Chinese))
- [44] LIU X M, LUO Y H, ZHANG D, et al. Recent changes in pan: Evaporation dynamics in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38, L13404. DOI: 10.1029/2011GL047929.
- [45] 邢万秋, 王卫光, 邵全喜, 等. 未来气候情景下海河流域参考蒸发蒸腾量预估[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(2): 239-251. (XING W Q, WANG W G, SHAO Q X, et al. Estimation of reference evapotranspiration of Haihe River basin under future climate scenario [J]. *Journal of Applied Foundation and Engineering Science*, 2014, 22(2): 239-251. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2014.02.005.
- [46] 侯蕾, 彭文启, 刘培斌, 等. 永定河上游流域土地利用变化及生态环境效应研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017, 15(6): 430-438. (HOU L, PENG W Q, LIU P B, et al. Study on land use change and ecological environment effect in the upper reaches of Yongding River [J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2017, 15(6): 430-438. (in Chinese)) DOI: 10.13244/j.cnki.jjwhr.2017.06.004.
- [47] 丁爱中, 赵银军, 郝弟, 等. 永定河流域径流变化特征及影响因素分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(1): 17-22. (DING A Z, ZHAO Y J, HAO D, et al. Analysis on the characteristics and influencing factors of runoff change in Yongding River basin [J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology*, 2013, 11(1): 17-22. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01017.
- [48] 罗维, 易海杰, 李红举, 等. 洋河流域土地利用时空变异及其对生态服务功能价值的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5342-5351. (LUO W, YI H J, LI H J, et al. Spatial and temporal variation of land use in Yanghe basin and its influence on the value of ecological service function [J]. *Journal of Ecology*, 2017, 37(16): 5342-5351. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201605180962.
- [49] LI X B, WANG H, GAI Y Q, et al. Spatial pattern dynamics of land use in Yongding River basin in China [R]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. *Geophysical Research Letters*, 2010: 871-874. DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5653569.
- [50] 徐兰, 罗维, 周宝同. 基于土地利用变化的农牧交错带典型流域生态风险评估: 以洋河为例[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 580-590. (XU L, LUO W, ZHOU B T. Ecological risk assessment based on land use change: A case study of Yanghe River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(4): 580-590. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.04.005.
- [51] 张树磊, 杨大文, 杨汉波, 等. 1960—2010年中国主要流域径流量减小原因探讨分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(5): 605-613. (ZHANG S L, YANG D W, YANG H B, et al. Analysis on the causes of runoff decrease in China's main watershed from 1960 to 2010 [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(5): 605-613. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.05.001.
- [52] 刘世海, 胡春宏. 官厅水库流域产流产沙变化规律及其影响因素研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 272-275. (LIU S H, HU C H. Variation law of sediment yield and abortion in Guanting reservoir Basin and its influencing factors [J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2007, 14(1): 272-275. (in Chinese))
- [53] JIANG B, WONG C P, LU F, et al. Drivers of drying on the Yongding River in Beijing [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519(1): 69-79. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.033.
- [54] 吴瑞, 刘桂环, 文一惠. 基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(3): 406-414. (WU R, LIU G H, WEN Y H. Spatial-temporal changes of water production and water quality purification services in Guanting reservoir basin based on InVEST model [J]. *Environmental Science Research*, 2017, 30(3): 406-414. (in Chinese)) DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.73.
- [55] 张利平, 于松延, 段尧彬, 等. 气候变化和人类活动对永定河流域径流变化影响定量研究[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(6): 391-397. (ZHANG L P, YU S Y, DUAN Y B, et al. Quantitative research on the impact of climate change and human activities on runoff change in Yongding River basin [J]. *Progress in Climate Change Research*, 2013, 9(6): 391-397. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.2013.06.001.
- [56] 刘春蓁, 刘志雨, 谢正辉. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(4): 385-393. (LIU C Z, LIU Z Y, XIE Z H. Study on the variation trend of runoff in Haihe River basin in recent 50 years [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 15(4): 385-393. (in Chinese))
- [57] 田菲, 韩淑敏, 胡玉昆. 洋河流域径流演变规律及驱动因子分析[J]. *华北农学报*, 2008, 23(S2): 353-357. (TIAN F, HAN S M, HU Y K. Runoff evolution law and driving factor analysis in Yanghe watershed [J]. *North China Journal of Agronomy*, 2008, 23(S2): 353-357. (in Chinese))
- [58] 胡华浪, 李伟方, 易湘生, 等. 土地利用/覆盖变化对永

- 定河流域水文过程的可能影响模拟[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(3): 74-83. (HU H L, LI W F, YI X S, et al. Simulation of the possible influence of land use/cover change on the hydrological process of Yongding River basin[J]. China's Agricultural Resources and Zoning, 2016, 37(3): 74-83. (in Chinese))
- [59] 于森, 魏源送, 刘俊国, 等. 永定河(北京段)水资源、水环境的变迁及流域社会经济发展对其影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1817-1825. (YU M, WEI Y S, LIU J G, et al. The change of water resources and water environment in Yongding River (Beijing section) and the influence of social and economic development in the basin[J]. Journal of Environmental Science, 2011, 31(9): 1817-1825. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j. hjkxxb. 2011. 09. 007.
- [60] XIA J, ZENG S, DU H, et al. Quantifying the effects of climate change and human activities on runoff in the water source area of Beijing, China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2014, 59(10): 1794-1807. DOI: https://doi.org/10.1080/02626667.2014.952237.
- [61] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Advances in research on the impact of climate change and human activities on the hydrological cycle [J]. Chinese Journal of Water Resources, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j. cnki. slxb. 2013. 07. 001.
- [62] 崔文彦, 刘得银, 梁舒汀, 等. 永定河流域水生态环境质量综合评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(2): 23-28. (CUI W Y, LIU D Y, LIANG S T, et al. Comprehensive evaluation of water ecological environment quality in Yongding River basin[J]. Journal of Water Ecology, 2020, 41(2): 23-28. (in Chinese)) DOI: 10.15928/j. 1674-3075. 2020. 02. 004.
- [63] 赵杰杰, 雷坤, 孙明东, 等. 基于负荷历时曲线法的永定河流域河北段磷纳污能力研究[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(3): 377-384. (ZHAO J J, LEI K, SUN M D, et al. Research on phosphorus pollution capacity of Hebei section of Yongding River basin based on load-duration curve method[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(3): 377-384. (in Chinese)) DOI: 10.12153/j. issn. 1674-991X. 20190142.
- [64] 何立霞, 张玉玲, 贾晓宇, 等. 干旱地区水环境容量的研究: 以张家口市境内永定河为例[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1368-1375. (HE L X, ZHANG Y L, JIA X Y, et al. Research on water environmental capacity in arid areas: A case study of Yongding River in Zhangjiakou area[J]. Grassland Science, 2020, 37(7): 1368-1375. (in Chinese)) DOI: 10.11829/j. issn. 1001-0629. 2020-0236.
- [65] 赵建国. 永定河怀来段氮磷时空分布及迁移规律研究[D]. 保定: 河北大学, 2018. (ZHAO J G. Spatial and temporal distribution and migration of nitrogen and phosphorus in Huailai section of Yongding River[D]. Baoding: Hebei University, 2018. (in Chinese))
- [66] 高星琪, 董志, 李令军, 等. 官厅水库上游河流水质空间变异多元统计分析[J]. 湿地科学, 2019, 17(1): 106-110. (GAO X Q, DONG Z, LI L J, et al. Multivariate statistical analysis of spatial variation of water quality in the upper reaches of Guanting reservoir[J]. Wetland Science, 2019, 17(1): 106-110. (in Chinese)) DOI: 10.13248/j. cnki. wetlandsci. 2019. 01. 015.
- [67] 邵志江, 刘莲, 汪涛. 永定河上游张家口地区主要河流污染物来源解析[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(2): 204-211. (SHAO Z J, LIU L, WANG T. Analysis of main river pollutant sources in Zhangjiakou area of the upper reaches of Yongding River[J]. Environmental Pollution and Prevention, 2020, 42(2): 204-211. (in Chinese)) DOI: 10.15985/j. cnki. 1001-3865. 2020. 02. 015.
- [68] 韩娜娜. 山西桑干河流域水环境承载力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (HAN N N. Research on water environmental carrying capacity of Sanggan River basin in Shanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [69] 潘军峰. 流域水环境承载力理论及应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2005. (PAN J F. Theory and application of watershed water environmental carrying capacity [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese))
- [70] 邵志江, 郑斌, 汪涛. 永定河上游主要河流地表水水质时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1338-1347. (SHAO Z J, ZHEN B, WANG T. Spatial and temporal variation characteristics of surface water quality in the upper reaches of The Yongding River [J]. Chinese Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1338-1347. (in Chinese)) DOI: 10.31497/zrzyxb. 20200607.
- [71] 李涛, 杨喆, 马中, 等. 公共政策视角下官厅水库流域水环境保护规划评估[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 62-69. (LI T, YANG Z, MA Z, et al. Water environmental protection planning assessment in Guanting reservoir basin from the perspective of public policy[J]. Resources and Environment in Arid Regions, 2018, 32(1): 62-69. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j. cnki. jalre. 2018. 010.

- [72] 林春坤. 永定河流域水资源优化配置研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013. (LIN C K. Research on optimal allocation of water resources in Yongding River basin [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013. (in Chinese))
- [73] 周佳奇. 永定河水系张家口区段水环境容量研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2018. (ZHOU J Q. Research on water environmental capacity of Zhangjiakou section of Yongding River system [D]. Zhangjiakou: Hebei Institute of Architecture and Engineering, 2018. (in Chinese))
- [74] 庞博, 王铁宇, 吕永龙, 等. 洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 379-384. (PANG B, WANG T Y, LYU Y L, et al. Analysis of river water quality evolution and driving factors in Zhangjiakou section of Yanghe River basin [J]. Environmental Science, 2013, 34(1): 379-384. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j. hjkx. 2013. 01047.
- [75] GUO W, FU Y, RUAN B, et al. Agricultural non-point source pollution in the Yongding River basin [J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 254-261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j. ecolind. 2013. 07. 012>.
- [76] 张敏, 李令军, 赵文慧, 等. 洋河水质现状及其成因分析[J]. 生态科学, 2019, 38(4): 77-84. (ZHANG M, LI L J, ZHAO W H, et al. Analysis on the current situation of Yanghe water quality and its causes [J]. Ecological Science, 2019, 38(4): 77-84. (in Chinese)) DOI: 10.14108/j. cnki. 1008-8873. 2019. 04. 012.
- [77] 郭青海, 马克明, 杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2170-2175. (GUO Q H, MA K M, YANG L. The main sources of urban non-point source pollution and its classified control countermeasures [J]. Environmental Science, 2006, 27(11): 2170-2175. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j. hjkx. 2006. 11. 006.
- [78] WEN Y H, LIU G, HAO H G, et al. Analysis on the temporal and spatial pattern of ecosystem services based on landuse changes: A case study of Guanting reservoir watershed in China [J]. Advanced Materials Research 2013, 807-809: 1743-1757.
- [79] 马艳霞. 山西省桑干河流域污染成因分析与整治探究[J]. 节能与环保, 2020(5): 78-79. (MA Y X. Analysis of the causes of pollution in Sanggan River basin, Shanxi Province and exploration of its remediation [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2020(5): 78-79. (in Chinese))

## Research progress on the changes of environmental and water resources in the upper Yongding River basin

WANG Yixuan<sup>1,2</sup>, SHEN Yanjun<sup>1,2</sup>, GAO Ya<sup>3</sup>, LIU Hang<sup>1,2</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Hebei Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Hebei Hydrologic Survey and Research Center, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract: Background** As an important ecological barrier, the upper Yongding River basin plays a key role for preventing sand-storm and protecting water resources for the downstream where the capital city located. With the impact of climate change and high-intensity human activities, the ecological environment in the basin has undergone significant changes in the past 50 years, and water shortage and water environment deterioration have become increasingly prominent. The impact of climate change and human activities on water quantity and quality is highly related to climate change, basin location and other factors, yet it has obvious spatial heterogeneity. Therefore, revealing the characteristics of regional-scale environmental changes and quantitative and qualitative evolution of water resources and their driving factors is highly needed, which is of great significance for water resources management and water environmental protection in the upper Yongding River basin.

**Findings** (1) The mean temperature of the upper Yongding River basin showed an "abrupt" increasing trend in the past 50 years, and the temperature increased significantly especially after 2000. The magnitude of minimum temperature increase is greater than that of maximum temperature, and the warming trend in winter and spring is higher than that in other seasons. Temperature may have an increase tendency in future. (2) The annual average precipitation in the basin showed a decreasing trend but not statistically significant, while the summer precipitation decreased significantly. The days and the amount of heavy rain and rainstorm showed an extremely significant decreasing trend. Annual precipitation may increase in future. (3) Both the pan evaporation and potential evapotranspiration in the basin have a decreasing tendency, yet not statistically significant. The actual evapotranspiration does not increase with the increase of temperature. (4) The land use change changed dramatically in the basin, with the increase of woodland and construction land and the decrease of cultivated land, unused land and water area as main characteristics. Land use change dynamics are more obvious after 2000 in the basin. (5) Runoff has a significant decreasing trend and water quality is partly polluted in the upper Yongding River basin. High intensity human activity is the main reason for run-

off decline and water quality deterioration in the upper Yongding River basin.

**Conclusions** (1) The carrying capacity of water resources and water environment are seriously insufficient in the upper Yongding River basin. How to improve the water use efficiency regards to the limited water resources, and how to coordinate the relationship between water resources, ecology and social economic development are highly needed for regional sustainable development and ecological civilization in the upper Yongding River basin. (2) Under the influence of climate change and human activities, the mechanism of water cycle and the process of pollutant migration and transformation will change significantly. How to reveal hydrological cycle and solute migration in the basin under changing environment, and evaluate and predict their effects are hotspots for water security research. (3) Strengthening monitoring, promoting data sharing and improving the models of coupling simulation of water quantity and quality are necessary for water resources research. (4) The upper Yongding River basin has a large drainage area and spans five different provinces. How to plan and promote the comprehensive river basin management is still a key issue which needs to be solved urgently.

**Key words:** climate change; land use change; evapotranspiration; surface runoff; water quality; non-point source pollution

(上接第 644 页)

large-scale climate factors on the dryness/wetness fields in Luanhe River basin, the resonant period and phase relationship between large-scale climate factors and  $PC_1$  and  $PC_2$  in time-frequency domain are evaluated by cross wavelet transform. The two typical modes of dryness/wetness changes in Luanhe River basin are closely related to Nina 3.4 and SOI (Southern Oscillation Index), and they have similar 1.5-6.0-year period but opposite correlation to the dryness/wetness fields. The influence of AO (Arctic Oscillation) and NAO (North Atlantic Oscillation) on the dryness/wetness fields is general, which is mainly reflected in the phase relationship of 2-4 year period.

**Conclusions** (1) The dryness/wetness conditions of the Luanhe River basin experienced abrupt changes in 1989. Before the abrupt change, the basin was relatively humid, and drought and flood events occurred alternately; after the abrupt change, the drought trend in the basin is further strengthened, and interannual drought events occurred frequently; (2) The dryness/wetness evolution of the Luanhe River basin showed two modes: the same type of dryness/wetness in the whole area and the reverse type of upstream and downstream in the basin, with a cumulative contribution rate of 72.3%. The dryness/wetness field of the river basin was of the same type of dryness/wetness in the whole area. The trends of the time variables of the two modalities show that the degree of drought in the basin has an increasing trend; the two time variables have a similar time-frequency structure, and both have a 1.5 to 4.0 year main cycle; (3) Nina 3.4 and SOI, which characterize ENSO (El Niño/Southern Oscillation) events, and the two modes both have a period of 1.5 to 6.0 years; ENSO has the most significant impact on the spatial and temporal distribution of dryness and wetness in the Luanhe River basin, followed by AO and NAO, which are related to the weakest AMO and PDO; the impact of the six climatic factors on the basin's dryness/wetness fields is mainly reflected in changing the basin's dryness/wetness consistency

**Key words:** standardized precipitation index; empirical orthogonal function (EOF); wavelet transform; dryness/wetness variations; large scale climate factors