

邢子强, 严登华, 翁白莎, 等. 下垫面条件对流域极端事件影响及综合应对框架[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 188–193.  
[Xing Ziqiang, Yan Denghua, Weng Baisha, et al. The Impact of Underlying Surface Changes on the Extreme Hydrological Events and the Comprehensive Countermeasure Framework[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 188–193.]

# 下垫面条件对流域极端事件影响及综合应对框架<sup>\*</sup>

邢子强, 严登华, 翁白莎, 袁 勇

(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)

**摘 要:**在剖析下垫面条件变化对流域极端水文事件演变影响的基础上, 构建了流域极端水文事件综合应对技术框架, 并阐述其中的关键研究命题。结果表明, 自然植被条件能够提高流域干旱之前土壤含水量并降低干旱过程中土壤蒸发速率, 在一定程度上起到减缓干旱的强度和持续时间的作用; 水利工程通过调节流域水资源的时空分布, 增加可利用水资源量, 能够缓解甚至规避流域干旱事件, 但同时可能加剧坝址下游地区的干旱程度。自然植被条件将延长降水坡面产-汇流历时、降低洪峰流量, 对极端降水洪涝事件具有一定的消减作用; 此外, 流域水土保持和修建水利工程等下垫面条件改变有利于河道行洪过程, 能够起到缓解洪涝事件的作用。基于下垫面条件变化的流域极端水文事件综合应对技术框架包括旱涝事件监测、机理识别、影响评价和综合应对四个方面的内容, 其中的关键研究命题主要为下垫面条件变化对流域极端水文事件影响的定量评估、面向流域极端水文事件合理的水土资源配置及其集成管理等。

**关键词:**下垫面条件; 流域极端水文事件; 综合应对框架

**中图分类号:** P339; X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2014)01-0188-06

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.01.034

下垫面条件深刻影响到流域水循环过程; 作为水循环极值过程的旱涝事件, 下垫面条件变化对其时空演化特征及强度也产生了显著影响。国外学者相关研究已表明, 土地利用退化等下垫面条件变化显著影响到流域水文系统, 是导致 1930 年代北美 Dust Bowl 干旱和加剧 1990 年代欧洲和北美洪涝事件的重要原因<sup>[1-2]</sup>; 而土地利用结构优化调整将增强降水入渗能力、降低暴雨产流量, 对于缓解流域洪涝事件具有重要意义<sup>[3]</sup>。国内学者对长江<sup>[4]</sup>、海河<sup>[5]</sup>、珠江<sup>[6]</sup>和西北内陆河<sup>[7]</sup>等流域极端水文事件的研究也表明, 植被退化等下垫面条件变化加剧了流域极端水文事件发生频率和强度。目前, 下垫面条件变化对流域极端水文事件的研究方法主要是采用统计分析或数值模型模拟等, 但从物理机制过程分析下垫面条件变化影响流域极端水文事件的相关研究相对较少。

本文通过解析流域植被条件、水利工程等下

垫面条件改变对流域水循环过程和水资源系统的影响, 辨析下垫面条件变化对流域极端水文事件时空节律演变的影响机理。在此基础上, 提出了基于下垫面条件变化的流域极端水文事件综合应对技术框架, 并对其中重要的关键研究命题进行阐述。

## 1 下垫面条件变化对流域极端水文事件演变影响分析

下垫面条件是指影响流域水热平衡、水文过程的植被条件、水利工程、地形地貌和土壤条件等要素的综合体。下垫面条件变化除导致气团变性而改变流域降水时空分布特性外, 还通过改变降水在地表的再分配过程, 对流域极端水文事件的强度、持续时间、频率等特性产生影响。因此, 系统识别下垫面条件变化对流域水循环过程、水资源时空分布状况的影响是剖析下垫面条件影响

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-06-18      修回日期: 2013-08-08  
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)“气候变化对黄淮海地区水循环的影响机理和水资源安全评估”(2010CB951102); 国家自然科学基金创新研究群体基金项目(51021066)  
作者简介: 邢子强(1984-), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事流域旱涝演变机制研究。E-mail: ziqiangxing@gmail.com  
通讯作者: 严登华(1976-), 男, 安徽太湖人, 教授级高级工程师, 主要从事气候变化下的生态水文及水资源合理配置研究。  
E-mail: denghuay@gmail.com

流域极端水文事件时空演变的基础。

### 1.1 下垫面条件变化对流域干旱事件演变的影响

干旱是由于长期水量收支不平衡导致一定时段内异常水分短缺现象<sup>[8]</sup>, 是气候自然演变中的一类极值过程, 其影响过程是逐渐由资源短缺向灾害凸显的动态转变过程。流域植被条件和水利工程等下垫面条件变化将影响旱前降水地表再分配过程和旱中流域水资源时空分布状态, 是影响流域干旱事件时空演变的主要驱动因子之一。

#### 1.1.1 植被条件对流域干旱事件演变的影响

流域旱前降水过程中, 植被条件能够影响到降水地表再分配过程, 增大降水入渗量, 从而提高旱前土壤含水量。流域植被将降水分割为冠层截留、穿透雨和茎杆流 3 部分, 其中茎杆流将直接渗入土壤, 提高植被周围土壤含水量<sup>[9-10]</sup>。以森林生态系统为例, 当降雨达到一定强度以上, 茎杆流量一般为单次降雨量的 1~5% 左右<sup>[11]</sup>, 而在湿润地区达到 14.21%<sup>[12]</sup>。此外, 植被枯落物等地被物具有较强持水能力且会加大地表粗糙度, 从而提高流域蓄水总量并延长降水坡面产、汇流时间, 实现增强降水入渗的作用<sup>[13-14]</sup>。此外, 植被根系的挤压、分割作用会显著改善土壤理化性质, 增大土壤孔隙度、提高透水性、导水率等, 增大土壤入渗能力, 增加降水过程中土壤入渗量<sup>[15]</sup>。如我国黄土高原在自然植被恢复后, 受到地表枯落物的生态水文作用, 土壤入渗能力得到显著改善, 土壤稳定入渗速率平均提高 1.30~2.11 倍<sup>[16]</sup>。

在流域干旱事件过程中, 植被地表枯落物具有阻碍土壤表面蒸发水分与大气水汽的直接交换的能力, 且随枯落物厚度增加水分子在其中移动距离增大, 蒸发阻力变大<sup>[17]</sup>; 另一方面, 植被及其地表枯落物将增大地表反射率, 导致土壤温度降低<sup>[18]</sup>, 土壤蒸发所需能量减少, 蒸发动力减弱; 此外, 植被枯落物和根系分泌物能够提高土壤有机质含量, 改善土壤结构及理化特性, 增强土壤蓄水和持水性能<sup>[19]</sup>, 以上作用均能够显著抑制干旱期间土壤蒸发能力。Murphy 等对秋季澳大利亚 wallaby grass 群落实际蒸散发对比实验表明, 裸地土壤蒸发量为 3.5 mm/d, 而覆盖枯落物的土壤蒸发量下降至 2.3 mm/d, 同时植物蒸腾作用也受到一定的抑制作用<sup>[20]</sup>。国内学者相关研究也表明, 森林生态系统地表枯落物对土壤蒸发强度具有显著抑制作用, 且随地表枯落物层厚度增大而增加<sup>[21-22]</sup>。而在干旱地区, 部分植被根系还具有一

定的水力提升作用<sup>[23]</sup>, 将深层土壤水或地下水经根系运输并释放到表层土壤中, 缓解表层水分亏缺、提高水分利用效率, 改善表层土壤水分有效性<sup>[24]</sup>。袁国富等对黑河中游地区多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)人工林地不同深度土壤含水量观测结果表明, 植被生长盛期浅层土壤含水量呈显著昼夜变化特征且在晚上植物根系与浅层土壤间存在正水势梯度, 即柽柳根系具有水力提升能力, 且水力提升量约占植物每天耗水量的 5%~8%<sup>[25]</sup>。

因此, 对照于无植被覆盖区域, 植被覆盖能够显著提高区域旱前土壤含水量, 同时抑制干旱期间的土壤蒸发量, 因此有植被覆盖区域的耐旱时间显著长于无植被覆盖区域<sup>[26]</sup>。

#### 1.1.2 水利工程对流域干旱事件演变的影响

从流域整体分析, 水利工程的修建将调节河道径流过程, 具有削峰补枯的作用, 从而可以加大流域汛期洪水等非常规水资源的开发利用, 增加流域水资源总量, 从而保证干旱期间流域水资源量, 实现缓解甚至规避流域整体干旱事件。Abu-Zeid 等研究表明阿斯旺高坝的蓄水量约等于尼罗河长期河道径流量的平均值, 这保证了埃及在 1979-1988 年严重干旱期间获得充足的水量供给, 是缓解此次干旱事件的重要保证<sup>[27]</sup>。

但是水利工程的修建对于坝址上下游地区干旱事件存在不同的影响。对于坝址上游地区, 水利工程能够拦蓄洪水, 提高非常规水资源的利用效率, 增加上游地区干旱期间的水资源总量, 具有缓解坝址上游地区干旱事件的作用<sup>[28]</sup>; 但是对于坝址下游地区, 水利工程的修建将拦蓄上游来水, 导致下游径流总量减少、地下水水位下降, 因此坝址下游地区在干旱期间水资源量较之天然条件下减少, 加剧下游地区干旱事件发生频率和强度。如 López-Moreno 等对欧洲 Tagus 河流域干旱特性分析结果表明, 在 Alcántara 大坝修建前, 坝址上游地区(西班牙境内)干旱期持续时间和干旱强度均大于坝址下游地区(葡萄牙境内)的干旱期持续时间和干旱强度; 但在大坝修建后, 坝址下游地区的干旱强度和持续时间均比坝址上游地区严重<sup>[29]</sup>。

### 1.2 下垫面条件变化对流域洪涝事件演变的影响

流域洪水事件是由于自然或人为因素引起超量来水导致河道径流量迅速增加, 超过河流系统蓄纳范围的现象<sup>[30]</sup>; 而雨涝事件是由于流域强降水或长时间连续降水导致低洼地区出现地表渍涝现象; 其中暴雨洪涝是最主要洪涝类

型之一。下垫面条件改变主要通过影响流域暴雨产-汇流过程和河道行洪过程，对流域洪涝事件产生影响。

1.2.1 下垫面条件变化对暴雨产-汇流过程的影响

一般而言，提高流域植被覆盖一方面能够增大首场暴雨事件过程中的冠层截留量，此外能够改变流域土壤理化特性，增大地表粗糙度、土壤下渗能力和土壤透水性，有益于暴雨过程中地表水-土壤水-地下水的转换，减缓暴雨坡面产-汇流流速，减少暴雨事件直接产流量，能够降低流域暴雨径流洪峰流量和延长暴雨坡面产-汇流历时<sup>[31-32]</sup>；反之，当流域植被覆盖被破坏后，暴雨产流量将显著增加，导致洪峰流量增大、洪峰水位升高和传播时间延长，导致流域洪涝事件加剧如长江流域森林过度采伐、植被破坏严重等下垫面条件改变是导致1998年长江流域出现“中水量、高水位、大灾害”洪涝的重要原因之一<sup>[33]</sup>。但流域植被条件对于暴雨洪水消减作用具有一定限度，对于后续暴雨洪水消减作用较弱，甚至可能加剧暴雨洪水事件<sup>[34]</sup>。此外，受到研究区域地形地貌条件、区域气候条件的差异的影响，流域植被条件对于暴雨洪水的影响也存在一定的差别，如我国河西走廊马营河流域上游林、草地被大面积开垦后，流域最大洪峰流量却减少35.77%<sup>[35]</sup>。

1.2.2 下垫面条件变化对行洪过程的影响

下垫面条件变化还将显著改变河道行洪过程和水体滞洪能力，进而对流域洪涝事件产生显著影响。

相对于植被覆盖率较高的流域，无植被覆盖流域水土流失更为严重，将导致流域次暴雨产沙模数增大<sup>[36]</sup>，河流含沙量迅速增加，河流水沙条件变异造成自然河道萎缩、主河槽床面淤积，抬升洪水水位起涨基准点、洪水水位抬高、洪水水位涨率增大，降低了河道排洪能力<sup>[37]</sup>，加剧流域洪涝事件。相关研究结果表明，长江上游地区植被条件退化，土壤侵蚀、流失是导致长江中游地区洪涝事件日益频繁的主要原因之一<sup>[4]</sup>；而汶川地震后植被覆盖率下降也是加剧岷江上游山洪的重要条件<sup>[38]</sup>。

此外，堤、库、闸、涵等水利工程除保证洪水安全过境外，还具有维持流域洪水蓄滞空间的能力，能够减少暴雨洪峰流量、坦化洪水过程，实现流域整体水资源的可持续利用，从而达到缓解流域中下游洪涝事件。我国学者研究表明，三峡水库对上游洪水的拦洪削峰调度，有效降低

2010年7月长江中下游干流沿程各站水位，控制了宜昌-石首河段不超警戒水位并缩短了监利-汉口河段各站超警戒水位时间<sup>[39]</sup>。Yoshikawa等模拟研究表明，日本上林地区稻田水坝消减26%观测暴雨的洪水流量、使水位下降0.17 m，消减47% 50年一遇降水的洪水流量、水位下降0.36 m<sup>[40]</sup>。

2 基于下垫面条件变化的流域极端水文事件综合应对技术框架

基于下垫面条件变化的流域极端水文事件综合应对技术框架的总体任务是通过剖析流域旱涝历史事件，建立流域极端水文事件对不同下垫面条件的响应关系，根据不同极端水文事件的应对目标，设置一组基于下垫面条件变化的流域极端事件应对方案集，遴选最优方案并制定相应的保障措施。如图1所示，该综合应对技术框架包括旱涝事件监测、机理识别、影响评价和综合应对4个方面。

2.1 极端水文事件监测

及时、准确的监测数据是构建流域极端水文事件综合应对技术框架的基础。极端水文事件监测包括降水量、气温、湿度等常规气象观测资料和径流量、土壤含水量、蒸发量等水文观测资料，以及对流域旱涝历史灾害资料的整理分析，同时还包括采用高精度遥感技术监测流域水利工程的空间分布及其蓄变水量变化、植被分布等土地利用格局、微地形的变化等下垫面条件变化。在此基础上，通过对监测数据进行数据同化，构建流域极端水文事件分析、评价必需基础信息数据库。

2.2 极端水文事件机理识别

下垫面条件变化导致气团变性而改变流域降水时空分布特性、影响流域降水的地表再分配过程，造成流域水分供求失衡<sup>[41]</sup>，引起流域极端水文事件的时空节律变化。流域极端水文事件对下垫面条件变化的响应机制包括下垫面条件变化对区域气象事件的影响、土地利用格局对暴雨产流过程的影响、流域植被特性对暴雨产流过程的影响和下垫面条件变化对广义干旱的影响4个方面。

2.3 极端水文事件影响评价

基于对流域极端水文事件驱动机制的识别，评价流域极端水文事件对下垫面条件变化的敏感性，分析不同下垫面条件下流域干旱、洪涝以及旱涝急转事件频率、强度、持续时间和空间分布状况，从而划分流域极端水文事件敏感区域。

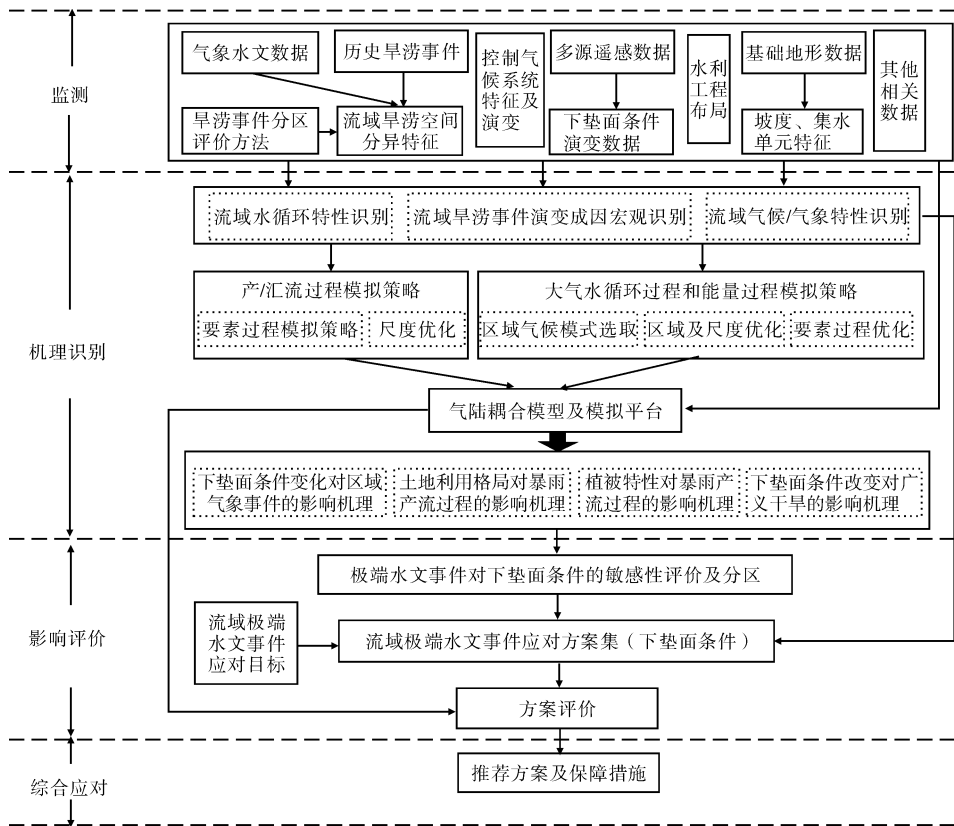


图1 基于下垫面条件变化的流域极端水文事件综合应对技术框架

通过分析流域水循环特性、气候/气象特性和旱涝事件演变成因宏观识别,针对不同的极端水文事件应对目标,通过调整分区下垫面条件变化,设置流域极端事件应对方案集,采用气陆耦合模拟平台评价不同方案的综合效益,选取综合效益最优的应对方案作为流域极端水文事件推荐方案。

2.4 极端水文事件综合应对

流域极端水文事件综合应对包括流域长期极端水文事件规划和短期有效应急预案。

在长期规划层面,通过合理规划流域下垫面布局,构建流域整体协调的极端水文事件应对模式。流域水土资源的过度开发利用改变了流域水文特性,是导致极端水文事件频率和危害加剧的重要原因<sup>[42]</sup>。因此,流域整体协调的旱涝应对模式的构建需进行流域水土资源优化调整,在保证防洪安全的前提下对洪水资源实行科学调度和综合利用,实现从控制洪水向洪水管理转变,增加流域可利用水资源总量。此外,通过对水土资源优化调整,在上游山区实施退耕还林、退耕还草,中下游平原地区加强江河湖库水系连通、堤坝等水利工程建设以及退耕还湖、湿地保护等限制蓄滞洪区等的开发,缓解人水争地矛盾,提高流域整体防汛抗旱能力。

在短尺度时段上,制定流域极端水文事件有

效应急预案:①建设在线雨情、水情监测站网和加强流域极端水文事件预警预报,编制流域洪涝、干旱、旱涝急转风险图,例如绘制豫北地区旱灾风险区划图等<sup>[43]</sup>;②流域极端水文事件出现后,基于旱涝事件的强度和空间范围,充分发挥水利工程调蓄和调度作用,实现流域极端水文事件的有效应对。

3 下垫面条件变化对流域极端水文事件影响关键研究命题

3.1 定量评估下垫面条件变化对流域极端水文事件的影响

流域极端水文事件演变受气候变化和人类活动的综合影响,旱涝事件的科学表征和下垫面条件变化对流域极端水文事件影响分析是量化下垫面条件变化对流域极端水文事件影响的关键。目前流域极端水文事件表征体系中,其评估指标大多是基于流域长时间气象或水文序列数据统计分析,确定流域极端水文事件状况和等级,旱涝事件成因物理机制相关支撑分析研究较弱<sup>[44]</sup>;此外,相关评估指标主要针对流域极端水文事件特定方面,不能综合表征流域尺度上极端水文事件的演变过程。因此,在新建的流域极端水文事件表征体系中,在综合考虑流域生态水文过程的基础上,

基于相关物理驱动机制, 确定合理、定量的流域极端水文事件表征指标。流域极端水文事件受到植被条件等下垫面条件变化和气象等因素的共同影响, 且对下垫面条件等具有反馈作用, 因此通过分析下垫面条件变化对流域水文过程影响, 区分并量化对流域极端水文事件影响, 从而提高分析结果的精确度和可信度。

### 3.2 面向流域极端水文事件的合理水土资源配置

面向流域极端水文事件的合理水土资源配置需要达到流域水土资源开发与保护并重、合理配置, 全面提高其调控水平和有效应对流域极端水文事件的能力, 实现流域“人-水-地”和谐<sup>[45]</sup>。合理水土资源配置主要包括加强江河湖库连通、跨流域调水以及蓄引提工程等防洪减灾设施的修建, 进行流域/跨流域水土资源综合规划, 形成流域/跨流域水土资源统一管理和调度, 提高水土资源利用效率。

### 3.3 面向流域极端水文事件的合理水土资源的集成管理

为实现流域极端水文事件有效应对, 构建最优的流域综合水土资源集成管理模式的关键是在保证防洪减灾的前提下, 实现流域水土资源供需平衡及其最优的时空结构, 其中包括: ① 通过对江河湖库的综合治理, 堤防、蓄滞洪区等水利工程的合理布局, 最大发挥流域防汛抗旱工程体系的综合效益, 实现从控制洪水到洪水管理的转变; ② 统筹安排流域与区域、城市与农村等自然-社会对水土资源的需求, 在实现流域水土资源开发和保护并重的基础上, 通过跨流域跨区域调水工程、蓄引提工程等水利工程的修建维护人民基本需求; ③ 流域整体实行预防保护、综合治理、生态修复相结合, 同时有效治理重点区域的水土流失。

## 4 结论

流域植被和水利工程等下垫面条件变化影响流域旱前降水地表再分配过程和旱中水资源变化过程, 改变流域干旱事件的强度、频率等; 此外, 还对暴雨坡面产-汇流时间及河道行洪过程产生影响, 改变流域洪涝事件的时空分布状况。基于流域旱涝历史事件的分析, 利用气陆耦合模拟平台系统识别下垫面条件变化对流域极端水文事件的影响, 通过极端水文事件对流域下垫面条件响应敏感性分析, 根据流域极端水文事件应对目标的剖析, 制定流域极端水文事件最优方案及保障措施, 形成基于下垫面条件变化的流域极端水文事件综合应对技术框架, 其中关键的研究命题主

要包括对流域极端水文事件影响的定量评估、面向流域极端水文事件的水土资源配置和以及水土资源的集成管理等。

## 参考文献:

- [1] Cook B I, Miller R L, Seager R. Amplification of the North American “Dust Bowl” drought through human-induced land degradation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(13): 4997–5001.
- [2] Savenije H. Recent extreme floods in Europe and the USA; challenges for the future[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1995, 20(5/6): 433–437.
- [3] Naef F, Scherrer S, Weiler M. A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(2): 74–79.
- [4] Yin H, Li C. Human impact on floods and flood disasters on the Yangtze River[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2): 105–109.
- [5] Wang W, Shao Q, Yang T, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 27(8): 1158–1174.
- [6] Zhang H, Ma W, Wang X. Rapid urbanization and implications for flood risk management in hinterland of the Pearl River Delta, China: The Foshan study[J]. *Sensors*, 2008, 8(4): 2223–2239.
- [7] Jiang F, Zhu C, Mu G, et al. Magnification of flood disasters and its relation to regional precipitation and local human activities since the 1980s in Xinjiang, northwestern China[J]. *Natural Hazards*, 2005, 36(3): 307–330.
- [8] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions[J]. *Water international*, 1985, 10(3): 111–120.
- [9] Tanner C B, Saffigna P G, Keeney D R. Non-uniform infiltration under potato canopies caused by interception, stemflow, and hilling[J]. *Agronomy Journal*, 1976, 68(2): 337–342.
- [10] Davie T. *Fundamentals of Hydrology*[M]. 2nd ed. New York: Routledge, 2008.
- [11] 中野秀章. 森林水文学[M]. 李云森, 译. 北京: 中国林业出版社, 1983.
- [12] 周光益. 中国热带森林水文生态功能[J]. *生态学杂志*, 1997, 16(5): 47–50.
- [13] Puigdef A Bregas J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 133–147.
- [14] Holden J, Kirkby M J, Lane S N, et al. Overland flow velocity and roughness properties in peatlands[J]. *Water resources research*, 2008, 44: W06415.
- [15] Bharati L, Lee K H, Isenhardt T M, et al. Soil-water infiltration under crops, pasture, and established riparian buffer in Midwestern USA[J]. *Agroforestry Systems*, 2002, 56(3): 249–257.
- [16] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 529–535.
- [17] 施爽, 郭继勋. 松嫩草原三种主要植物群落枯落物层生态水文功能[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1722–1726.
- [18] 刘更另, 黄新江, 冯云峰. 红壤丘陵自然植被恢复及其对某些土壤条件的影响[J]. *中国农业科学*, 1990, 23(3): 60–69.
- [19] Naeth M A, Bailey A W, Chanasysk D S, et al. Water holding capacity of litter and soil organic matter in mixed prairie and fescue

- grassland ecosystems of Alberta [J]. Journal of range management, 1991, 44(1): 13–17.
- [20] Murphy S R, Lodge G M. Plant density, litter and bare soil effects on actual evaporation and transpiration in autumn [C]// Australian Agronomy Conference. Hobart, 2001.
- [21] Zhou H W, Li S Y, Sun S G, et al. Effects of natural covers on soil evaporation of the shelterbelt along the Tarim Desert Highway [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53: 137–145.
- [22] 申卫军, 彭少麟, 周国逸, 等. 马占相思 (*Acacia mangium*) 与湿地松 (*Pinus elliotii*) 人工林枯落物层的水文生态功能 [J]. 生态学报, 2001, 21(5): 846–850.
- [23] Richards J H, Caldwell M M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots [J]. Oecologia, 1987, 73(4): 486–489.
- [24] 何兴东, 高玉葆. 干旱区水力提升的生态作用 [J]. 生态学报, 2003, 23(5): 996–1002.
- [25] 袁国富, 张佩, 薛沙沙, 等. 沙丘多枝怪柳灌丛根层土壤含水量变化特征与根系水力提升证据 [J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1033–1042.
- [26] Nicholson S. Land Surface Processes and Sahel Climate [J]. Reviews of Geophysics, 2000, 38: 117–139.
- [27] Abu-Zeid M, Abdel-Dayem S Y. The Nile, the Aswan High Dam and the 1979–1988 drought [C]// Proceedings 14th International Congress on Irrigation and Drainage. Rio de Janeiro, Brazil, 1990.
- [28] Dai A. Drought under global warming: a review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45–65.
- [29] López-Moreno J I, Vicente-Serrano S M, Beguería S, et al. Dam effects on droughts magnitude and duration in a transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal [J]. Water Resources Research, 2009, 45(2): W2405.
- [30] Chow V T, Maidment D R, Mays L W. Applied hydrology [M]. New York: Mc-Graw Hill, 1988.
- [31] Calder I R. Water-resource and land-use issues [M]// SWIM Paper 3. Iwmi, 1998.
- [32] 钟祥浩, 程根伟. 森林植被变化对洪水的影响分析——以长江上游典型小流域和洪水事件为例 [J]. 山地学报, 2001, 19(5): 413–417.
- [33] 张永春, 李维新, 张纪伍, 等. 长江流域洪灾与生态破坏的关系浅析: II 生态破坏导致洪灾加剧 [J]. 农村生态环境, 1999, 15(4): 12–15.
- [34] 钟祥浩, 李祥妹, 范建容. 长江上游森林植被变化对削洪减灾功能的影响 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 1–5.
- [35] 王根绪, 张钰, 刘桂民, 等. 马营河流域 1967~2000 年土地利用变化对河流径流的影响 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2005, 35(7): 671–681.
- [36] 郑明国, 蔡强国, 王彩峰, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面水土保持及植被对流域尺度水沙关系的影响 [J]. 水利学报, 2007, 38(1): 47–53.
- [37] 李文学, 李勇, 姚文艺, 等. 黄河下游河道行洪能力对河道萎缩的响应关系 [J]. 中国科学 (E 辑: 技术科学), 2004, 34 (Sup1): 126–132.
- [38] 丁海容, 李勇, 赵国华, 等. 汶川地震后岷江上游山洪发育特征与成因分析 [J]. 灾害学, 2013, 28(2): 14–19.
- [39] 邹冰玉, 李玉荣, 冯宝飞. 三峡水库运用对长江中下游干流水位影响分析——以 2010 年 7 月洪水为例 [J]. 人民长江, 2011, 42(6): 80–82.
- [40] Yoshikawa N, Nagao N, Misawa S. Evaluation of the flood mitigation effect of a Paddy Field Dam project [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(2): 259–270.
- [41] Kundzewicz Z W, Kaczmarek Z. Coping with hydrological extremes [J]. Water International, 2000, 25(1): 66–75.
- [42] Zhao S, Fang J, Miao S, et al. The 7-decade degradation of a large freshwater lake in Central Yangtze River, China [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(2): 431–436.
- [43] 赵静, 张继权, 严登华, 等. 基于格网 GIS 的豫北地区干旱灾害风险区划 [J]. 灾害学, 2012, 27(1): 55–58.
- [44] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982–991.
- [45] 刘成武, 黄利民, 吴斌祥. 论人地关系对湖北省自然灾害的影响 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 177–181.

## The Impact of Underlying Surface Changes on the Extreme Hydrological Events and the Comprehensive Countermeasure Framework

Xing Ziqiang, Yan Denghua, Weng Baisha and Yuan Yong

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Beijing 100038, China)

**Abstract:** Based on the influencing mechanism analysis of the underlying surface changes on the extreme hydrological events, the comprehensive countermeasure framework against the extreme hydrological events has been installed, and the key topics of the research work are proposed accordingly. The results showed that: vegetation could mitigate droughts by increasing soil moisture and reducing soil evaporation; while hydrological projects, which could increase the water resources quantity by changed the temporal and spatial distribution, could mitigate droughts in the water supply areas, but likely aggravate the droughts in the water loss areas. In addition, vegetation could also prolong the runoff generating time and lower peak flow, which can mitigate floods. The underlying surface change, such as the soil and water conservation and the hydrological projects, benefits the flood draining. The comprehensive countermeasure framework against droughts and floods based on the underlying surface changes includes droughts and floods monitoring, mechanism recognition, impact assessment and comprehensive countermeasure. The key topics of the research work mainly includes the quantitative evaluation of the underlying surface changes on the droughts and floods, and the appropriate allocation and integrated management of the water and soil resource against the droughts and floods.

**Key words:** underlying surface change; extreme hydrological events; comprehensive countermeasure framework