

干旱对河流水生态系统影响研究与展望

黄彬彬¹, 严登华^{2,3}, 王浩^{2,3}

(1. 南昌工程学院 鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室, 江西 南昌 330099;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 干旱等水文极端事件在全球范围内呈现广发频发态势, 频繁发生的干旱对河流水生态系统影响显著。首先从干旱发生的区域、发生区域的水文特征、干旱的持续时间、低流量值的大小、干旱发生的时间、干旱发生的频率和旱涝急转速率 7 个方面阐述了不同的干旱特征对水生态系统的影响。讨论了干旱对河流水生生物栖息地的影响, 河道水流速度变缓, 水生生物栖息地的面积、深度减小, 影响河流水生生物的多样性。从纵向尺度、横向尺度、垂向尺度 3 个方面分析了干旱事件对水生态系统物质流、能量流和信息流的影响, 并对现阶段水文过程-水生态系统耦合模型的相关研究成果进行了总结。最后就今后的研究趋势和重点研究工作进行了展望。

关键词: 干旱; 水文极端事件; 河流; 水生态系统; 栖息地; 研究与展望

中图分类号: S423

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)02-0012-07

Research and prospect on effects of drought on river water ecosystem

HUANG Binbin¹, YAN Denghua^{2,3}, WANG Hao^{2,3}

(1. State-province United Engineering Laboratory on Water Engineering Safety and Resources Efficient Utilization of Poyang Lake Basin, Nanchang 330099 China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: Drought is an extreme event in hydrological water cycle, and it happens in more areas and more frequently, which has significant negative impact of water resources, water environment and ecosystem. The paper discusses the effects of drought on water ecosystem by the drought affected area, hydrological characteristics, drought duration, low flow value, drought season, drought frequency, and droughts-floods abrupt alternation. The effects of drought on aquatic habitats of rivers are discussed, the speed of river flow is slow, the area and depth of aquatic habitat reduced, and the diversity of aquatic organisms in rivers is affected. The effects of drought events on material flow, energy flow and information flow in aquatic ecosystems were analyzed from the following three aspects: longitudinal scale, horizontal scale and vertical scale. We also summarized the relevant research of the hydrological process water ecosystem coupling model. Finally, the research trend and key research work in the future are prospected.

Key words: drought; extremem hydrological event; river; water ecosystem; habitat; research and prospect

1 研究背景

社会经济发展对水资源的需求逐渐增加, 在当前竞争性的用水条件下, 社会经济系统用水会挤占生态环境用水, 干旱使生态环境系统缺水进一步加剧^[1]。干旱是一种气候异常的自然现象, 同时也是

气候长期调节下的正常规律^[2], 一般可将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[3]。干旱主要是由于降水量的显著减少, 引起降水和蒸发的不平衡, 导致河流中水量减少和土壤中水分短缺^[4-5]。干旱会引发水资源短缺、水质恶化、水生生物多样性降低等一系列的资源、环境、生态效应。河

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-10-10

基金项目: 江西省教育厅科研技术研究项目(GJJ151122); 国家自然科学基金项目(51569015、51769017); 江西省科技厅科技支撑项目(20161BBG70049); 江西省水工程安全与资源高效利用工程研究中心开放基金项目(OF201609)

作者简介: 黄彬彬(1983-), 男, 安徽安庆人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源与水环境方面研究。

道水量减少会导致水中污染物浓度增加,水质变差,湿地面积及水生生物的栖息地范围减小;土壤中水分短缺会对植物的生长过程产生胁迫,陆生植物、水生植物和生物的数量和产量都会下降^[6-7],随着干旱持续时间的增加,干旱带来的影响会由最初的水分短缺扩散到资源、环境、生态、社会经济的各个方面,如图1所示。

变化环境下,干旱等极端水文事件呈广发、频发态势,而生态、环境和社会经济发展对水资源需求刚性增加,区域水安全和生态环境安全面临严峻的挑战。干旱对资源环境生态系统所造成的影响会随着干旱发生的季节、持续时间、低流量值大小等干旱特征的不同而呈现出明显的差异,本文基于文献调研,综述了近年来国内外相关的研究成果,分析讨论了不同的干旱特征对水生态系统与水生生物栖息地的影响,并从纵向尺度、横向尺度、垂向尺度3个方面分析了干旱事件对水生态系统物质流、能量流和信息流的影响,最后就今后的研究趋势和重点研究工作进行了展望。为未来气候变化情景下减缓干旱对自然和社会的影响,以及保障区域的生态安全提供参考和依据。

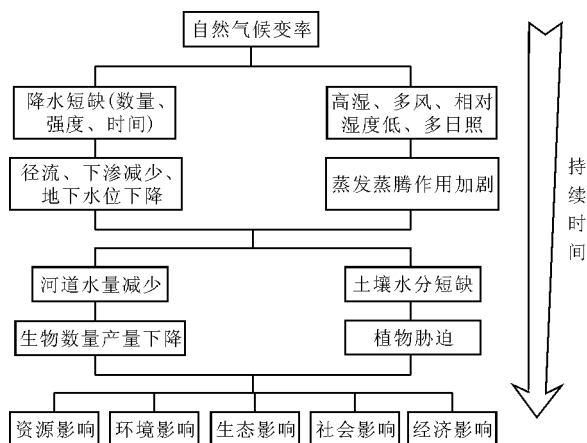


图1 干旱对资源生态环境影响关系图

2 干旱特征对水生态系统的影响

不同的干旱事件表现为持续时间、发生频率、低流量值的大小、发生时间和季节以及旱涝急转速率的不同,如图2所示。干旱改变流域水文过程与水生生物的生境条件,阻隔了流域中物种流、物质流、能量流、信息流的正常交换^[8],最终导致物种的丰度与种群规模的减小。

2.1 干旱发生地点

对于大型流域,上游、中游、下游以及整个河网

水系都会发生不同程度的干旱,干旱发生的地理位置对其生态环境的影响比较显著。栖息地是干旱后水生生物恢复的重要场所,因此,干旱是否发生在栖息地对生物的重构与恢复至关重要^[9]。不同的鱼类会从流域不同的位置游到栖息地,干旱导致栖息地消失会增加物种灭亡的风险^[10]。

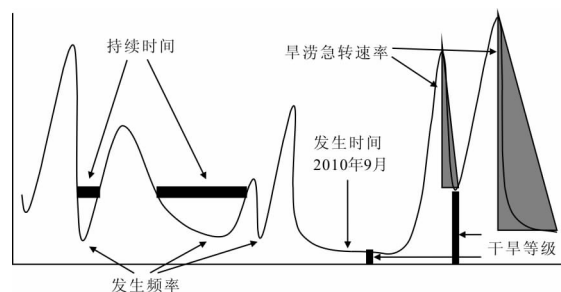


图2 干旱特征与水文过程原理图

2.2 流域水文特性

气象干旱导致河川径流量的减少可看做长时间尺度下水文过程的扰动^[11],由于流域背景水文特征值的差异,相同级别的扰动对生态环境的影响会截然不同^[12]。例如美国堪萨斯州的季节性河流,河流丰枯差别较大,干旱对河流生态系统的影响就会更加显著^[13]。流域背景水文特征与水生态系统的相互作用具体表现在生物的生活史、行为史和适应能力等方面。当河流流量丰枯差别不大时,如果干旱对水文过程扰动过大,部分适应能力较差的生物无法适应这种改变,就很容易导致外来物种的入侵^[14]。因此,在分析干旱事件对河流水生态系统的影响时应将其与流域背景水文特征联系起来。

2.3 持续时间

干旱是一种“渐变型”灾害,干旱持续时间越长,造成的损失越严重。水生态系统比较脆弱,对干旱的响应非常敏感,抗干旱能力较差,长时间的干旱会给流域水生态系统带来极为严重、甚至是毁灭性的后果。干旱持续时间的增加会减少大型无脊椎动物的物种丰度^[15],长时间的低流量会导致水生生物聚集、植被数量与多样性减少或消失,降低植物生长速度^[16],相反,随着流量的增加,生物的多样性与丰度恢复^[17]。例如新西兰 Waipara 河,长时间的持续干旱减少了鱼类的数量与多样性,而短期的干旱对鱼类影响较小^[18]。因此,长时间的持续干旱对生态环境系统的影响要远远大于短时间的干旱。

2.4 低流量值

干旱时低流量值微小的改变会引起水生态系统巨大的反馈。新西兰的试验表明,试验区河流流量

减少 10% 时,对大型无脊椎动物的影响相对较小^[19];而在美国,当河流流量减小到多年平均的 96% 时,鲑鱼的密度和生长速度减小至原来的 60%~67%^[20]。不同的低流量阈值与流域特征相互作用会导致不同的水生生态系统的响应,小流域基流量的变化对水生生态系统的影响要远远大于大型流域^[21]。因此,生态系统对流域河道低流量值的响应,在某种程度上还要取决于流域的特征,如流域面积、多年平均径流量、植被景观格局等。

2.5 干旱发生时间

如果干旱发生在水生生物产卵季节,会影响水生生物产卵、繁殖过程中信号的传递,阻隔水生生物的迁徙。季节性洪峰流量的消失会中断鱼类产卵、孵化和迁徙,鱼类无法进入湿地或回水区,改变了水生生物的食物链结构,岸边植被恢复能力降低或消失,植被生长的速度减缓^[22]。干旱发生的时间和季节不同,对生态系统造成的影响也会不同。干旱若发生在水生生物洄游、产卵季节、自然生产力较高、河道流量较大的季节,对生态系统的影响会更大。研究表明,冬季发生的干旱对幼鲑鳟鱼在栖息地之间的游动与成长速度影响较小^[23],但是如果干旱发生在夏季,就会明显减缓幼鱼的成长速度^[24]。

2.6 旱涝急转速率

旱涝急转速率是干旱向洪涝转变的时间^[25-26],即图 2 中阴影部分直角三角形的斜率,斜率越大,旱涝急转速度越快,反之越慢。旱涝急转速度越快,冲刷越显著、敏感物种丧失、生物生命循环遭到破坏。流量急骤变小时,来不及游到避难所的鱼类就会由于搁浅缺水而死亡^[27],另外,由于缺乏必需的养养物质来源,靠捕食浅滩生物的水生生物数量骤减^[28]。旱涝急转速度越快,对生态系统的负面影响越大。

2.7 干旱发生频率

近年来,我国干旱发生频率整体呈增加趋势^[29],春、秋季干旱发生的频率增加,夏季干旱发生频率减少;春、秋干旱多于夏旱,特重旱多出现在春季。频繁发生的干旱对物种起到过滤作用,对干旱适应性较差的物种就会消失。有试验表明,干旱频率增加,持续时间减少,藻类细胞的密度减小,淘汰了对干旱适应能力差的物种^[30]。因此,干旱频发流域的生物对干旱具有较强的适应性^[31],相反,对于较少发生干旱的地区,干旱对一大批具有固定生活史特征的生物影响较大,无法适应气候变化的物种就会灭亡。

3 干旱对水生生物物理栖息地的影响

河道流量、水力条件与地形条件都会对水生生物的物理栖息地的面积与生物多样性产生影响^[32]。干旱发生时,河道水流速度变缓,水生生物栖息地的面积、深度减小,急流栖息地,如浅滩,容易受干旱的影响^[33]。干旱初期,单位面积上的水生生物的密度增加,特别是无脊椎动物和鱼类,同时流量减少、流速降低,水流挟沙能力减弱,切断了河流纵向、横向和垂向的物质、能量和信息流的交换。随着干旱的持续发展,栖息地之间缺乏联系时,河流生态系统的流态驱动食物链和营养结构,单位面积上捕食者的数量增加,物种对能量和食物的竞争性增强,食物链被压缩、营养级减少^[34]。生物会进行自然选择与进化,物种的生命周期变短、繁殖能力下降,鱼类幼崽的数量与河道外生物的数量减少^[35]。

河道流量与季节性变化都对水质产生显著影响^[36-37],干旱时,水中溶解氧(DO)数量减少,昼夜水温温差、导电率与盐度增加,并且河道水流出现温度分层、水体停留时间增加,垂向交换的减少增加了浮游植物和蓝藻菌类的数量。由于水生生物对水环境的适应性差异,导致水生生物呈现出不同的时空分布特征^[38-39]。

干旱减少河流各空间尺度上物质与能量之间的交换,避难所为种源群体提供栖息地^[40],在保护物种的脆弱性和多样性时发挥着重要的作用^[41]。干旱时,进入避难所能力强的生物对干旱表现出较强的适应性,同时,避难所的大小也会影响土著生物的保留与相关物种种群规模的扩大,因此,可根据物种散布与传播能力的差异判断不同生物对干旱的适应能力^[42]。干旱结束后,避难所对生物多样性的恢复也有重要的影响,河道中流量的改变影响河流水生生物组成的空间差异,如多样性^[43]。

4 干旱对河流生态系统物质能量流的影响

河流水文过程对生态系统的稳定发挥着重要的作用,水文循环维持着水生生态系统的健康,能够传递信息,输送物质和能量^[44]。横向尺度上,洪水将营养物质与泥沙带到洪泛区;纵向尺度上将营养物质输送到上下游不同位置的栖息地;垂向尺度上使营养物质在底泥和水体中进行交换和循环。

4.1 纵向尺度

能量和有机质会随着水流而纵向传递,干旱降

低了物质的流动速度,并且由于水流的挟带能力减弱,水体中有机质的停留时间增加^[45],食碎屑生物的密度增加,水底无脊椎动物数量减少,水体中有机碎屑分解能力减弱^[46],导致生态系统食物链中碳的输入量减少。

干旱同样会减少水体中颗粒有机物的输送距离,是干旱初期水体中大型无脊椎动物密度增加的主要原因^[47],如果干旱持续时间增加,最终会导致该类生物的密度减少。大型无脊椎动物的数量与活动范围的减小,减少了食肉型水生生物的食物来源,导致生物的生长速度减缓、种群规模变小、生产力降低。试验表明,河道流量与生物生长速度、种群规模呈现出正相关。

4.2 横向尺度

干早期横向水力联系的减少会割裂河道与洪泛区之间的能量通道^[48],横向水力联系的减少会改变食物链结构,引起外来物种的入侵,无机营养盐的生产力增强,自养生物变成更高级食物链的一个重要的有机碳源^[49]。横向水力联系切断时,鱼类等生物的搁浅、死亡释放出的营养物质会刺激洪泛区和河流中藻类植物的生长。

4.3 垂向尺度

底泥、地下水、地表水之间的水力联系控制着垂向的营养交换。干旱时地表水和地下水的循环使微生物活动更积极^[50]。泥沙、有机质的沉积增加,限制了营养物质从底泥、地下水、河底生物向地表水和食物链的输送。同时,地下水位的下降,沉积物增加,减少了水底大型无脊椎动物的数量,增加了穴居动物的数量,这种转变减少了底泥中有机质进入食物链的数量,导致水生生物个体生长速度变缓、种群规模变小^[51]。

5 水文过程-水生态系统耦合模型

20世纪70年代后期,水生态系统建模方法和技术都取得了突破性进展,侧重多层、多室、多成分的复杂模型对湖泊中的化学、物理、生物生态和水动力过程的模拟^[52],用来描述和揭示水生态系统中水生生物组成和种群结构的时空变化规律^[53]。研究对象由单一的水生生物向多种水生生物发展,空间模拟能力从零维、一维向三维扩展,逐渐耦合了水质、水动力等一些环境因子^[54]。随着水生态系统模型的迅速发展,研究人员也逐步开发出一些用于水生态系统动力学模拟的软件,如AQUATOX、PAMOLARE、CAEDYM、WASP、OOMAS等。不同的软件有

着不同的研究主体、状态变量、模型参数与模拟对象,这些软件在我国也得到了广泛的应用^[55-60]。由于水生态模型在应用时需要长期的实测数据来进行率定与校核,故降低了模拟的准确性。

水文情势、水力条件与地貌景观格局是影响河流水生态系统健康的主要生境因子,水文过程是水生态系统演替的主要驱动力之一^[61]。水文过程是水生生物生长过程所需营养物质的载体和介质,传播水生生物生态系统演替的信息流,塑造了河流地形地貌空间异质性的景观格局。水文过程-水生态系统耦合模型反映了水文过程和水生态系统相互作用与调节的耦合关系^[62]。河流水文过程形成了多种类型的河流水生生物栖息地,在维护河流生态系统生物群落多样性与整体性、保持物种生命节律等方面具有极其重要的作用^[63]。但是当前的水文过程-水生态系统模型研究中存在部分过程物理机制不明确,没有真正意义上耦合水文过程和水生态系统之间复杂的正负反馈、相互作用关系等问题。

6 结论与展望

干旱对河流水生态系统产生显著影响。干旱作为驱动力,造成水分亏缺,改变了流域水文循环条件,主要表现在:流域水量减少、流速降低、水面面积减少、污染物的形成迁移和转化规律改变、河流各尺度的连通性降低、生物量减少和物种多样性降低等方面。干旱对流域生态系统的影响程度主要取决于干旱持续时间、干旱发生时的低径流值、发生时间和季节、发生的空间地理位置以及发生流域的历史水文条件等因素。干旱发生时,食物链中物质和能量、栖息地的面积与深度、栖息地之间的联系减少,水生生物捕食竞争性加剧,水环境恶化,水生生物的空间分布特征改变,导致水生生物的多样性降低、繁殖能力下降、种群规模减小。

尽管关于干旱对水生态系统的影响已经取得了一些研究成果,但是由于技术手段和实验方法存在一些不足,并且对整个自然系统的认识有限,在该领域中仍然存在一些问题需要加强研究:

(1)加强加密水生态系统的长期观测,明确水文过程与水生态系统之间相互作用的物理机制,更加细致地量化水生态系统与水文过程的耦合关系。

(2)缺乏生态系统对干旱反馈机制方面系统的研究,同时,个体尺度如何扩展到整个生态系统尺度、干旱在不同时间与空间尺度上对生态系统的影响等是具有挑战性的研究方向。

(3) 由于生态系统的庞大以及复杂性,目前研究干旱对生态系统的影响多数基于实验,实验设备、方法和手段均存在不足,需要新的研究方法和工具对影响机理进行揭示与量化。

(4) 气候变化和人类活动改变了干旱发生的频度与强度,综合考虑多因素对干旱的影响,采用模型方法研究各种单因子的影响及多因素的协同影响是未来干旱研究中的主要方向之一。

参考文献:

- [1] 夏军,程书波,郝秀平,等. 气候变化对水质与水生态系统的潜在影响与挑战:以中国典型河流为例[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010,1(1):31-35.
- [2] 裴源生,蒋桂芹,翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. *水科学进展*, 2013,24(3):449-456.
- [3] 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.
- [4] ALLEN C D, MACALADY A K, CHENCHOUNI H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010,259(4):660-684.
- [5] GITLIN A R, STHULTZ C M, BOWKER M A, et al. Mortality gradients within and among dominant plant populations as barometers of ecosystem change during extreme drought[J]. *Conservation Biology*, 2006,20(5):1477-1486.
- [6] LINDNER M, MAROSCHEK M, NETHERER S, et al. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010,259(4):698-709.
- [7] FENSHAM R J, FAIRFAX R J, WARD D P. Drought-induced tree death in savanna[J]. *Global Change Biology*, 2009,15(2):380-387.
- [8] 赵进勇,董哲仁,杨晓敏,等. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. *水生态学杂志*, 2017,38(5):1-6.
- [9] FREDERICK J W, TERRY D P, JAMES D R, et al. 气候变化对水生生物区系,生态系统结构和功能的影响[J]. *AMBIO-人类环境杂志*, 2006,35(7):358-366+410.
- [10] ROBSON B J, MATTHEWS T G. Drought refuges affect algal recolonization in intermittent streams[J]. *River Research and Applications*, 2004,20(7):753-763.
- [11] 钱维宏,张宗婕. 西南区域持续性干旱事件的行星尺度和天气尺度扰动信号[J]. *地球物理学报*, 2012,55(5):1462-1471.
- [12] BIGGS B J F, NIKORA V I, SNELDER T H. Linking scales of flow variability to lotic ecosystem structure and function[J]. *River Research and Applications*, 2005,21(2-3):283-298.
- [13] FRITZ K M, DODDS W K. Harshness:characterisation of intermittent stream habitat over space and time[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2005,56(1):13-23.
- [14] STUBBINGTON R, GREENWOOD A M, WOOD P J, et al. The response of perennial and temporary headwater stream invertebrate communities to hydrological extremes[J]. *Hydrobiologia*, 2009,630(1):299-312.
- [15] ARSCOTT D B, LARNED S, SCARSBROOK M R, et al. Aquatic invertebrate community structure along an intermittence gradient:Selwyn River, New Zealand[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010,29(2):530-545.
- [16] NILSSON C, SVEDMARK M. Augusbasic principles and ecological consequences of changing water regimes:riparian plant communities[J]. *Environmental Management*, 2002,30(4):468-480.
- [17] FEMINELLA J W. Comparison of benthic macroinvertebrate assemblages in small streams along a gradient of flow permanence[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1996,15(4):651-669.
- [18] JOWETT I G, RICHARDSON J, BONNETT M L. Relationship between flow regime and fish abundances in a gravel-bed river, New Zealand[J]. *Journal of Fish Biology*, 2005,66(5):1419-1436.
- [19] JAMES A B W, SUREN A M. The response of invertebrates to a gradient of flow reduction-an instream channel study in a New Zealand lowland river[J]. *Freshwater Biology*, 2009,54(11):2225-2242.
- [20] MCCARGO J W, PETERSON J T. An evaluation of the influence of seasonal base flow and geomorphic stream characteristics on Coastal Plain stream fish assemblages[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2010,139(1):29-48.
- [21] 王红丽,黎明政,高欣,等. 三峡库区丰都江段鱼类早期资源现状[J]. *水生生物学报*, 2015,39(5):954-964.
- [22] 王青,严登华,翁白莎,等. 流域干旱对淡水湖泊湿地生态系统的影响机制[J]. *湿地科学*, 2012,10(4):396-403.
- [23] DARE M R, HUBERT W A, GEROW K G. Changes in habitat availability and habitat use and movements by two trout species in response to declining discharge in a regulated river during winter[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2002,22(3):917-928.
- [24] HARVEY B C, NAKAMOTO R J, WHITE J L. Reduced

- streamflow lowers dry – season growth of rainbow trout in a small stream[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2006, 135(4): 998 – 1005.
- [25] 闪丽洁, 张利平, 陈心池, 等. 长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2100 – 2107.
- [26] 牛建利, 何紫云, 张天宇, 等. 旱涝急转对生产、生活与生态的影响及应对措施效果分析——以安徽省巢湖市槐林镇为例[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(S1): 108 – 115.
- [27] BISSHOP K A, BELL J D. Observations of the fish fauna below Tallowa Dam (Shoalhaven River, New South Wales) during river flow stoppages[J]. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 1978, 29(4): 543 – 549.
- [28] KANNO Y, VOKOUN J C. Evaluating effects of water withdrawals and impoundments on fish assemblages in southern New England streams, USA[J]. Fisheries Management and Ecology, 2010, 17(3): 272 – 283.
- [29] 祁海霞, 智协飞, 白永清. 中国干旱发生频率的年代际变化特征及趋势分析[J]. 大气科学学报, 2011, 34(4): 447 – 455.
- [30] LEDGER M E, HARRIS R M L, MILNER A A M. Disturbance frequency influences patch dynamics in Stream Benthic Algal Communities [J]. Oecologia, 2008, 155(4): 809 – 819.
- [31] 李芬, 于文金, 张建新, 等. 干旱灾害评估研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 891 – 898.
- [32] 孙可可, 陈进. 典型洪水和干旱过程对湖泊湿地的生态作用[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(5): 5 – 8 + 12.
- [33] HAKALA J P, HARTMAN K J. Drought effect on stream morphology and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) populations in forested headwater streams[J]. Hydrobiologia, 2004, 515(1 – 3): 203 – 213.
- [34] MCCANN K S, RASMUSSEN J B, UMBANHOWAR J. The dynamics of spatially coupled food webs[J]. Ecology Letters, 2005, 8(5): 513 – 523.
- [35] NEBEL S, PORTER J L, KINGSFORD R T. Long-term trends of shorebird populations in eastern Australia and impacts of freshwater extraction[J]. Biological Conservation, 2008, 141(4): 971 – 980.
- [36] SHELDON F, FELLOWS C S. Water quality in two Australian dryland rivers: spatial and temporal variability and the role of flow[J]. Marine and Freshwater Research, 2010, 61(8): 864 – 874.
- [37] 曾庆慧, 秦丽欢, 程鹏, 等. 1990年以来北京密云水库主要水环境因子时空分布特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1204 – 1216.
- [38] MILLER S W, WOOSTER D, JUDITH L I. Resistance and resilience of macroinvertebrates to irrigation water withdrawals[J]. Freshwater Biology, 2007, 52(12): 2494 – 2510.
- [39] MILLER S W, WOOSTER D, LI J L. Does species trait composition influence macroinvertebrate responses to irrigation water withdrawals: evidence from the Intermountain West, USA[J]. River research and applications, 2010, 26(10): 1261 – 1280.
- [40] MAGOULICK D D, KOBZA R M. The role of refugia for fishes during drought: a review and synthesis[J]. Freshwater Biology, 2003, 48(7): 1186 – 1198.
- [41] REINFELDS I, LINCOLN - SMITH M, HAEUSLER T, et al. Hydraulic assessment of environmental flow regimes to facilitate fish passage through natural riffles: Shoalhaven river below Tallowa Dam, New South Wales, Australia [J]. River Research and Applications, 2010, 26(5): 589 – 604.
- [42] CROOK D A, REICH P, BOND N R, et al. Using biological information to support proactive strategies for managing freshwater fish during drought[J]. Marine and Freshwater Research, 2010, 61(3): 379 – 387.
- [43] THOMAZ S M, BINI L M, BOZELLI R L. Floods increase similarity among aquatic habitats in river – floodplain systems[J]. Hydrobiologia, 2007, 579(1): 1 – 13.
- [44] 杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 390 – 397.
- [45] ZOËS. DEWSON, JAMES A B W, DEATH R G. Invertebrate community responses to experimentally reduced discharge in small rivers of different water quality[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2007, 26(4): 754 – 766.
- [46] WALTERS A W, POST D M. How low can you go? Impacts of a low – flow disturbance on aquatic insect communities[J]. Ecological Applications, 2011, 21(1): 163 – 174.
- [47] JONES JR J B, SMOCK L A. Transport and retention of particulate organic matter in two low – gradient headwater streams[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1991, 10(2): 115 – 126.
- [48] BALDWIN D S, MITCHELL A M. The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river – floodplain systems: a synthesis [J]. Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management, 2000, 16(5): 457 – 467.
- [49] PREINER S, DROZDOWSKI I, SCHAGERL M, et al. The significance of side – arm connectivity for carbon dy-

- namics of the River Danube, Austria[J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53(2): 238–252.
- [50] BATTIN T J. Hydrodynamics is a major determinant of streambed biofilm activity; from the sediment to the reach scale[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(6): 1308–1319.
- [51] SUTTLE K B, POWER M E, MCNEELY L C. How fine sediment in riverbeds impairs growth and survival of juvenile salmonids[J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(4): 969–974.
- [52] NYHOLM N. A simulation model for phytoplankton growth and nutrient cycling in eutrophic, shallow lakes[J]. *Ecological Modelling*, 1978, 4(2): 279–310.
- [53] JØRGENSEN S E. Structural dynamic model[J]. *Ecological Modelling*, 1986, 31(1): 1–9.
- [54] 徐宗学, 赵捷. 生态水文模型开发和应用: 回顾与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 346–354.
- [55] 牛志广, 王秀俊, 陈彦熹. 湖泊的水生态模型[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(1): 217–225.
- [56] 陈戍, 钱新, 张玉超. 生态动力学模型在太湖水质模拟中的应用[J]. *环境保护科学*, 2010, 36(4): 6–9.
- [57] 胡志新, 胡维平, 张发兵, 等. 太湖梅梁湾生态系统健康状况周年变化的评价研究[J]. *生态学报*, 2005, 24(7): 763–767.
- [58] 刘永, 周丰, 郭怀成, 等. 基于管理目标的湖泊生态系统动力学[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3434–3441.
- [59] 刘玉生, 唐宗武. 滇池富营养化生态动力学模型及其应用[J]. *环境科学研究*, 1991(6): 1–8.
- [60] 翁白莎, 严登华, 赵志轩, 等. 人工湿地系统在湖泊生态修复中的作用[J]. *生态学报*, 2010, 29(12): 2514–2520.
- [61] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 550–559.
- [62] WOOD P. Ecohydrology: processes, models and case studies[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(12): 2655–2656.
- [63] BENKE A C, CHAUBEY I, WARD G M, et al. Flood pulse dynamics of an unregulated river floodplain in the south-eastern U. S coastal plain [J]. *Ecology*, 2000, 81(10): 2730–2741.

(上接第 11 页)

- [13] 邵进, 李毅, 宋松柏. 标准化径流指数计算的新方法及其应用[J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 79–87.
- [14] 吴杰峰, 陈兴伟, 高路, 等. 基于标准化径流指数的区域水文干旱指数构建与识别[J]. *山地学报*, 2016, 34(3): 282–289.
- [15] KHEDUN C P, CHOWDHARY H, MISHRA A K, et al. Analysis of drought severity and duration based on runoff derived from the Noah Land Surface Model [R]. *Symposium on Data – Driven Approaches to Droughts*, 2011.
- [16] KESKIN F, SORMAN A U. Assessment of the dry and wet period severity with hydrometeorological index[J]. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2010, 2(2): 29–39.
- [17] 刘新华, 徐海量, 凌洪波, 等. 阿克苏河流域径流量与降水量丰枯变化和相关性研究[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 741–750.
- [18] 陈青青, 陈超群, 杨志勇, 等. 阿克苏河径流演变及其对气候变化的响应[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(1): 88–99.
- [19] 柏铃, 陈忠升, 王充, 等. 西北干旱区阿克苏河径流对气候波动的多尺度响应[J]. *地理科学*, 2017, 37(5): 799–806.
- [20] 李思诺. 变化环境下阿克苏河流域干旱演变特征分析[D]. 河北工程大学, 2015.
- [21] 张玉虎, 刘凯力, 陈秋华, 等. 区域气象干旱特征多变量 Copula 分析——以阿克苏河流域为例[J]. *地理科学*, 2014, 34(12): 1480–1487.
- [22] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152–164.
- [23] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 等. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(1): 1–9.