

# 复杂网络在水文中的应用研究综述

崔楠, 吴学文

(河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 水文系统由多个子系统组成,并受到多要素、多尺度的共同作用,导致它们在时空上产生多种复杂形式的关联结构,形成了一个巨大的复杂系统。因此,利用复杂网络理论研究水文问题也引起学者的注意。首先分析了水文系统的复杂性,介绍了复杂网络的相关知识,然后综述了其在水文研究中的应用,包括利用复杂网络统计性质分析水文过程;利用复杂网络社团挖掘算法进行流域划分;利用节点重要性评估优化水文监测网络。最后展望了利用复杂网络解决水文其它问题新的方向。

**关键词:** 水文; 复杂网络; 流域划分; 监测网络优化

**中图分类号:** P338+.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2016)05-0107-06

## Review on application of complex network to hydrology

CUI Nan, WU Xuewen

(College of Computer and Information Technology Engineering, HoHai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** The hydrological system is composed by subsystems, and affected by the interaction of multi factors, multi scale, which result in interaction structure of more complex produced in time and space and formed a great complex system. So it has also caused more attention by scholars to use complex network theory to study hydrological problem of. This paper first analyzed the complexity of hydrological system, and introduced the related knowledge of complex network. Then it summarized some applications in hydrological research which included analysing hydrological process by using the statistical properties of complex networks; realizing watershed delineation by using complex network's community mining algorithm; optimizing hydrological monitoring network by using the evaluation of node's importance. Finally, the paper prospected the new direction to resolve other problems in hydrological system with complex networks.

**Key words:** hydrology; complexity; watershed delineation; monitoring network optimization

## 1 研究背景

水文循环是一种复杂的大气及水文过程,其时空变化表现为强烈的非线性特征,并且深受人类活动、地形地貌等诸多因素的影响。就某一特定区域而言,水文过程的改变受到区域气候特征、区域地理及土壤条件等因素的影响<sup>[1]</sup>。组成水文循环系统的因子较多并且这些因子之间存在强烈的非线性作用,系统组份和相关过程表现出高度的时空异质性。这些因子自身的复杂性以及因子之间的复杂关联构成了水文系统的复杂性<sup>[2-3]</sup>。研究水文系统的复杂性、揭示水文系统中这些关联的本质特性是水文研

究中的一个重要研究方向。

复杂网络作为一门交叉学科,在研究系统复杂性方面有其独特的优势,并成功应用到很多学科中。目前,复杂网络理论广泛应用于包括社会学、计算机网络及生态网络在内的各个领域。在科学家合作关系网中,将每个科学家视为节点,将科学家之间合作过的著作视为边,则可建立一个科学家合作网络,研究表明这个网络具有明显的小世界模型特性<sup>[4]</sup>;在万维网中,节点是一个个网页,边是网页间存在的超链接,研究发现万维网具有明显的无标度特性<sup>[5]</sup>。随着研究深入,学者们越来越重视复杂网络的各种特性,比如网络脆弱性、节点和边的重要性以及复杂

收稿日期:2016-03-31; 修回日期:2016-05-25

作者简介:崔楠(1992-),女,江苏徐州人,在读硕士研究生,研究方向:复杂网络。

通讯作者:吴学文(1962-),男,江苏南京人,副教授,研究方向:嵌入式系统技术;网络化信息获取与处理;信息系统及其工程应用。

网络动态特性等。将复杂网络理论应用于电力系统,倪向萍等<sup>[6]</sup>提出了输电线路脆弱度的评估方法,结合复杂网络理论研究电力网络的脆弱性及稳定性;将复杂网络应用于城市交通网络,赵月等<sup>[7]</sup>建立城市交通网络模型,并在此基础上研究如何寻找 hub 节点即重要节点,应用复杂网络动力学研究预防和控制交通拥堵的方法;Sporns 提出人的大脑是一个复杂网络并应用复杂网络理论研究人脑连接组的网络动态特性<sup>[8]</sup>。随着技术的进步和革新,各种真实数据的获取和处理变得越来越简单,复杂系统的研究发展迅猛,各种新的概念和模型被提出,复杂网络的应用也越来越广泛。

由于水文系统本身就是一个巨大的复杂系统,利用复杂网络来研究水文系统中的复杂性已经引起了学者的广泛关注。本文对其在水文研究中已有的应用进行归类总结,并试图在已有的研究基础上利用复杂网络解决更多水文问题。

## 2 水文领域复杂网络性质分析

### 2.1 复杂网络简介

目前,复杂网络还没有形成统一、清晰、精确的

定义,钱学森院士对复杂网络的定义如下:复杂网络是指具有自相似、自组织、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络<sup>[9]</sup>。

复杂网络的研究基础是图论,图论是解决网络实际系统中的有效工具之一。将网络抽象为图论中节点和边构成的集合。节点代表实际系统中的一个实体,连边代表实体间的相互作用,连边可以是无向的,也可以是有向的。一个具体的网络可以抽象为一个图  $G = (V, E)$  ( $V$  表示节点的集合,  $E$  表示边的集合)。

为了能够定量地研究复杂网络的整体结构特性,可以借助概率统计的思想来定义网络的特性,即采用一些几何量来描述复杂网络,目前较常见的几何量有:度分布、平均度、聚类系数、介数等。每个特征量从不同的角度反映网络的某一特性,节点的度定义为与该节点相连的节点的数量,是定量描述节点属性的最简单的统计特征值。

聚类系数是用来描述整个网络节点的紧密程度,介数用来描述相应的节点或边在整个网络中的作用和影响力。具体计算见表 1 中各种复杂网络计算公式。

表 1 复杂网络统计性质

统计特性	计算公式	参数说明
度	$k_i = \sum_j a_{ij}$	$k_i$ 表示节点的度, $a_{ij}$ 表示节点 $i$ 和节点 $j$ 的连接关系
聚类系数	$C_i = 2E_i / (k_i(k_i - 1))$	$k_i$ 表示节点的度, $E_i$ 为 $k_i$ 个节点之间实际存在的边数
介数	$B_i = \sum_{j, k \in V(j \neq k)} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$	$m_{jk}$ 表示从节点 $j$ 到节点 $k$ 的最短路径的数量, $n_{jk}(i)$ 表示 $n_{jk}$ 中经过节点 $i$ 的最短路径的数量

### 2.2 问题相似性分析

不同流域所处的地理位置如果相近,气候因素与地理条件也相似,由其综合影响而产生的水文现象在一定范围内也具有相似性,其在地区的分布上也有一定的规律。如在潮湿地区的河流,其水量丰富,年内分配也相对比较均匀;而在干旱地区的大多河流,则水量不足,年内分配也不均匀。又如同一地区的不同河流,其汛期与枯水期都十分相近,径流变化过程也都十分相似。另一方面,相邻流域所处的地理位置与气候因素虽然相似,但由于地形地质等条件的差异,从而会产生不同的水文变化规律。如在同一地区,山区河流和平原河流的洪水运动规律就各不相同;地下水丰富的河流与地下水贫乏的河流,其枯水水文动态就有很大差异。发现并分析水文过程在地区上的相似性与差异性是水文研究的重

要问题。

复杂网络的节点用来描述水文研究中的位置变量;边以及边上的权值用来描述变量间的相关性以及相关性的强弱;边的方向代表了关联的因果性,无向网络描述相互间的影响;复杂网络的演化过程用来描述水文系统的动态变化<sup>[10]</sup>。因此,用复杂网络来研究水文系统具有一定的可行性。

假设所研究流域内共有  $n$  个监测站用于观测所需的水文数据,监测点  $i$  监测到的水文数据为  $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,则以监测站作为复杂网络的节点,依据不同监测站水文过程的相关性作为判断两节点之间是否存在连边的标准,若节点  $i, j$  之间水文数据的相关性大于给定的阈值  $\varepsilon$ ,则认为两节点之间存在连边。其中相关性可以使用皮尔森系数  $\rho_{x_1, x_j}$  或互

信息  $I(X_i; X_j)$  等。

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} = \frac{E[(X_i - u_{X_i})(X_j - u_{X_j})]}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (1)$$

$$I(X_i; X_j) = \sum_{x_1 \in X_i} \sum_{x_2 \in X_j} p(x_1, x_2) \frac{p(x_1, x_2)}{p(x_1)p(x_2)} \quad (2)$$

式中:  $u_{X_i}$  为  $X_i$  的均值;  $P(\cdot)$  为  $\cdot$  出现的概率。

网络中节点的度表示水文节点的影响能力,聚类系数表示流域的相似程度,介数表示水文过程的传播影响能力。

### 3 复杂网络在水文中应用

本文以文献应用领域进行分类,分为水文过程分析、流域划分以及水文监测网络优化3个方面。

#### 3.1 水文过程分析

水文过程研究常用的方法有成因分析法、数理统计法和地理综合法,对于成因分析法,由于影响水文现象的因素极其复杂,其形成机理还不完全清楚,因而本法在定量方面仍然存在很大困难;地理综合法是根据气候因素和地形地质等因素的分布具有地区特征,从而使水文现象的变化在地区的分布上呈现出一定的规律性,但从长期来看,同一地区的水文现象在总体上也有着缓慢变化;数理统计法主要是针对水文数据进行分析,但传统的数据分析一般采用数理统计学的知识作为基础手段,辅以相关分析模型,描述序列的动态性和发展变化规律,它们都是从序列本身出发,研究序列的相关性、平稳性、随机性或周期性等,在这种分析模式下,关注的是数据本身,不关心它们的结构特征。复杂网络把复杂系统元素之间的相互作用抽象成节点与节点之间的边连接,这种抽象着重体现了元素相互作用的拓扑结构,而弱化了作用的具体形式。因此从序列的结构特征出发,可以去挖掘一些传统分析方法所不能得到的性质。

从微观层次来说,复杂网络模型中节点的度代表了节点因子在此水文系统中的重要程度,若一个节点的度很大表明此节点代表的因子在水文系统中具有较大的影响力,许多其余因子都会受到它的影响;节点聚集系数代表了水文系统节点因子之间的聚集程度,若一个节点的聚集系数很大,则表明此因子在时间或空间上关联密切;节点的介数代表了节点因子在水文过程传播中的重要程度,若一个节点的介数很大,则表明此节点因子的改变会极大影响水文过程的传播。从宏观层次来讲,复杂网络水文

模型的平均集群系数以及平均最短距离在一定程度上反映了此模型是否具有小世界性,小世界性反映了水文系统的节点因子在时间或空间上相互关联程度,表明了即使空间相距很远的两个地方,一个地方水文状态的改变也会很快影响到另一区域;模型的度分布反映了系统是否具有无标度性,无标度性反映了水文系统中“hub”节点的存在, hub 节点使得系统具有很强的鲁棒性及脆弱性,即 hub 节点水文状态的改变会很大程度改变整个系统的水文状态,但是非 hub 节点水文状态的改变则对系统整体状态影响甚小。

Boers 等<sup>[11]</sup>利用复杂网络研究了南美季风系统的极端降雨事件。利用介数中心度来解释区域在极端降雨事件传播中的重要性;利用聚类系数来表示区域间的相关性;同时根据分析需要定义了一个新的变量——长范围导向来表示节点间跨越地理距离的联系程度。Scarsoglio 等<sup>[12]</sup>将全球按经纬度进行划分,利用区域间降水之间的相互影响,建立了全球降雨复杂网络模型,来分析全球降雨相互影响的机制。Sivakumar 等<sup>[13]</sup>对加拿大 230 个监测站 68 a 的月降雨数据构建复杂网络模型,采用不同的阈值分析了网络的聚类系数以及度分布,研究发现此复杂网络模型不是随机网络,其度分布是指数截断幂律分布。Jha 等<sup>[14]</sup>利用复杂网络检测并解释了澳大利亚降雨状况的空间联系,利用聚类系数来量化网络的聚集倾向,并结合地理因素(经度、纬度、海拔)以及降雨的统计性质(平均降雨量、均方差和变异系数)等进行分析。吴学文等<sup>[15-16]</sup>将复杂网络应用到河流研究分析中,建立河网模型,解决水资源管理等问题。

#### 3.2 流域分类

汇集地面水和地下水的区域称流域,即分水线所包围的区域。分水线有地面分水线和地下分水线之分,前者构成地面集水区,后者构成地下集水区。有些流域因水文地质条件的关系,地面分水线和地下分水线并不完全重合,因此难以确定流域准确边界。流域分类<sup>[17-18]</sup>涉及河流形态、河流演化机制、水文气候因素、土地状况等很多因素,并且存在着众多的非线性交互以及对初始状态的敏感等问题。过去的几十年针对流域分类问题建立了很多的模型,但这些模型结构复杂,虽然这样的模型有利于对流域以及相关过程的理解,但同时这些模型的建立也是基于特定流域、特定区域、特定过程的,因此难以扩展。基于流域分类的“复杂性”,Sivakumar 等<sup>[19]</sup>

认为利用复杂系统科学的理论作为研究流域分类问题具有可行性,利用复杂网络相关算法进行流域划分是一种相对简便同时可靠性也较高的方法。这种基于复杂网络的流域分类算法可以在较大空间、时间尺度进行研究,同时便于向其他区域扩展。

利用复杂网络研究流域划分,首先根据需求建立复杂网络模型。流域划分是基于分水线,即一流域内水量的封闭性,因此选择以区域径流量作为构建复杂网络的输入,建立河流径流量的复杂网络模型。复杂网络理论中有许多社区挖掘的方法,比如基于划分的 GN 算法,基于模块性优化的 Newman 快速算法,基于标签传播的标签传播算法,基于动力学的 Markov 聚类算法以及基于仿生计算的蚁群算法、遗传算法等等。这些算法以寻找网络最优模块化为目标。所谓模块性是指网络中连接社团结构内部节点的边所占的比例与另外一个随机网络中连接社团结构内部节点的边所占比例的期望值相减得到的差值,即

$$Q = \frac{1}{2M} \sum_{i,j} \left[ (a_{i,j} - \frac{k_i k_j}{2M}) \delta(\sigma_i, \sigma_j) \right] \quad (3)$$

式中:  $a_{i,j}$  为节点  $i, j$  之间的连接关系;  $k_i, k_j$  为与此网络具有相同性质的随机网络中节点  $i, j$  的度;  $\sigma_i, \sigma_j$  分别为节点  $i, j$  所在的社团,当节点  $i, j$  在同一社团时,  $\delta(\sigma_i, \sigma_j) = 1$ , 否则  $\delta(\sigma_i, \sigma_j) = 0$ ,  $M$  为网络的总边数。

因此利用复杂网络的社团挖掘算法可以对河流径流量复杂网络模型进行社团划分,划分出来的社团则在一定程度上代表了交互紧密的水流过程,即社团内的水量和外界交互相对较少,即可代表流域划分的结果。

Halverson 等<sup>[20]</sup>利用复杂网络理论研究了加拿大降雨监测网络。选取了那些自然的、未经人类工程影响的地区设立监测站,以监测站作为复杂网络的节点,以监测站之间的日流量数据的线性相关系数作为判断节点之间是否存在连线的标准。在此基础上,分析了径流网络的社区结构,利用复杂网络的社团分类方法,将流域分类。通过对流域分类结果的分析,可以看出基于复杂网络构建模型的流域划分依然能起到很好的效果。

### 3.3 水文数据监测系统优化

水文资料对研究水文过程极其重要。因此,建立一个合理有效的监测网络成为水文研究的一个方向。水文监测站设立的位置、数量以及密度等很多问题对获取有效的水文数据有着重要影响。但监测

站的设立、维护受很多因素影响,比如所监测区域的重要性、地形特性、需要测量的变量以及监测站建立和维护费用等等。对于许多国家来说,随着政府预算的减少,监测站的数量也趋于减少<sup>[21]</sup>。在这种情况下,如何建立更为有效的监测站,使得监测到的数据充分发挥其功能就变的尤为重要<sup>[22]</sup>。一方面,对于重要区域要保证其监测站能满足需要标准;另一方面,希望可以根据区域之间的相关性,从已有的监测站预测无监测站的状况,即无测站水文预测问题<sup>[23]</sup>。

以优化网络结构、最大度利用监测数据为目标,在水文监测网络设计中应给予网络中比较重要的监测站足够的重视,同时在相对稀疏的地区设立监测站。从复杂网络角度出发,则应当考虑节点的重要程度,即节点重要性评价<sup>[24-26]</sup>。第1类是社团中节点度较大的节点(图1中的  $v_4$ ),这类节点和本区域内较多节点存在关联,因此这个节点的数据对流域的水文过程分析比较重要;第2类是边介数较大的节点(图1中  $v_7$ ),这些节点往往是社团之间的桥梁,对这些节点的预测一般难以准确,但这些节点的存在却对分析区域间联系相对重要;第3类节点是小社团结构中的节点(图1中  $v_{13}$ ),由于小社团中监测站比较少,因此数据冗余度很低,所以这些节点一般应给予保留。同样,若是考虑增加节点,要优先考虑将节点增加在相对重要的区域以及监测站密度较低的区域,以发挥监测站最大效用,优化监测网络。

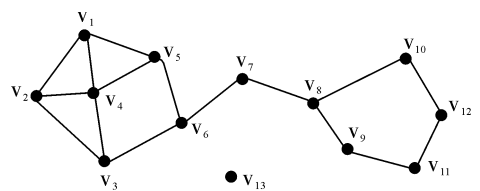


图1 水文监测网络

## 4 结论及展望

本文综述了复杂网络在水文方面的应用,利用水文资料在空间上的相关性来实现水文过程到复杂网络的映射,然后利用构建的复杂网络模型解决水文中的一些问题。主要包括:水文过程分析、流域划分以及水文监测网络优化。复杂网络的统计性质用来分析水文系统的结构特征,比如度、度分布、聚类系数等;复杂网络中的社团挖掘算法用来对流域进行分类,比如 GN 算法、FN 算法等;利用复杂网络节点重要性评估来指导水文监测网络的优化。

基于复杂网络理论研究水文中的一些问题是卓有成效的,并可将其应用到更广阔的空间:

(1) 无测站流域水文预测(PUB)。无测站流域水文预测(PUB)问题一直以来都是众多学者苦心钻研的问题,基于 Sivapalan 等<sup>[27]</sup>、Murugesu 等<sup>[28]</sup>、Archfield 等<sup>[29]</sup>提出的关于水文预测的一些模型<sup>[30-32]</sup>,结合本文利用复杂网络的思想来发掘分析系统中复杂性的理论,可以尝试利用复杂网络建立流域水文数据预测模型。Prinzio 等<sup>[33]</sup>指出以流域划分结果指导无测站流域水文预测,可以减少水文数据的不确定性。因此针对本文提出的以复杂网络为基础的流域划分方法,以划分的结果作为评价监测站之间是否是“相邻节点”,同时以其在复杂网络的重要程度评判其在系统结构中发挥的作用,以此来完成无测站流域水文预测问题。

(2) 水文机制研究。通过复杂网络对水文数据的研究,可以发现数据的结构特征,从而可以在宏观上指导水文过程研究,比如水文模型是否存在小世界性、无标度性等。这些性质反映的是水文数据在结构上的特征,而不仅仅是数据本身的特征,因此它在一定程度上可以反映水文过程的演化机制。

(3) 演化模型建立。根据大量的实例研究,加上对水文过程演化机理的理解,可以尝试建立水文复杂网络演化模型。

(4) 动力学问题。复杂网络主要研究社会和自然界中各种复杂网络的传播机理与动力学行为以及对这些行为高效可行的控制方法,如何描述这些事物的传播过程,揭示它们的传播特性,进而寻求出对这些行为进行有效控制的方法。对水文复杂网络模型进行同步混沌分析,可以对水文的传播机理了解更深,同时借助分析结果,指导对一些极端水文事件的预防等。

## 参考文献:

[1] 刘祖涵. 塔里木河流域气候-水文过程的复杂性与非线性研究[D]. 上海:华东师范大学,2014.

[2] Dooge J C I. Looking for hydrologic laws[J]. *Water Resources Research*, 1987,96(1-4):3-4.

[3] Paola C, Foufoula - Georgiou E, Dietrich W E, et al. Toward a unified science of the Earth's surface: opportunities for synthesis among hydrology, geomorphology, geochemistry, and ecology[J]. *Water resources research*,2006,42(3):1-6.

[4] Fan Ying, Li Menghui, Chen Jiawei, et al. Network of econophysicisis: a weighted network to investigate the de-

velopment of econophysics [J]. *International Journal of Modern Physics B*,2004,18(17):2505-2511.

[5] Yook S H, Jeong H, Barabási A L. Modeling the internet's large-scale topology[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002,99(21):13382-13386.

[6] 倪向萍,梅生伟,张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2008,32(4):1-5.

[7] 赵月,杜文,陈爽. 复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用[J]. *城市交通*, 2009,7(1):57-65.

[8] Sporns O. The human connectome: a complex network[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2011,1224(1):109-125.

[9] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J]. *自然杂志*, 1990,13(1):3-10.

[10] Sivakumar B. Networks: a generic theory for hydrology? [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015,29(3):761-771.

[11] Boers N, Bookhagen B, Marwan N, et al. Complex networks identify spatial patterns of extreme rainfall events of the South American Monsoon System [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013,40(16):4386-4392.

[12] Scarsoglio S, Laio F, Ridolfi L. Climate dynamics: a network-based approach for the analysis of global precipitation. [J]. *Plos One*, 2013,8(8):14102-14109.

[13] Sivakumar B, Woldemeskel F M. A network-based analysis of spatial rainfall connections [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015,69:55-62.

[14] Jha S K, Zhao H, Woldemeskel F M, et al. Network theory and spatial rainfall connections: an interpretation [J]. *Journal of Hydrology*, 2015(527):13-19.

[15] 吴学文,李玲,方国华. 复杂河流网络节点重要度分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2013,24(2):145-150.

[16] 吴学文,瞿永钢,李玲. 基于复杂网络理论的河流网络建模与分析[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2014,42(2):177-182.

[17] Harris N M, Gurnell A M, Hannah D M, et al. Classification of river regimes: a context for hydroecology [J]. *Hydrological Processes*, 2000,14(16-17):2831-2848.

[18] Olden J D, Kennard M J, Pusey B J. A framework for hydrologic classification with a review of methodologies and applications in ecohydrology [J]. *Ecohydrology*, 2012,5(4):503-518.

[19] Sivakumar B, Singh V P, Berndtsson R, et al. Catchment classification framework in hydrology: challenges and directions[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013,20

- (1):A4014002.
- [20] Halverson M, Fleming S. Complex networks, streamflow and hydrometric monitoring system design[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2014,11(12):1-48.
- [21] Mishra A K, Paulin C. Developments in hydrometric network design; A review[J]. Reviews of Geophysics, 2009, 47(47):2415-2440.
- [22] 孙丽,唐晓青,韩雪,等. 关于建立区域水环境质量监测网络定期优化机制的思考[J]. 中国环境监测, 2015,31(3):27-31.
- [23] Li Chao, Singh V P, Mishra A K. Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy [J]. Water Resources Research, 2012,48(5):311-314.
- [24] 秦李,杨子龙,黄曙光. 复杂网络的节点重要性综合评价[J]. 计算机科学, 2015,42(2):60-64.
- [25] 刘建国,任卓明,郭强,等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展[J]. 物理学报, 2013,62(17):178901-178901.
- [26] 喻依. 复杂网络节点重要性研究[D]. 广州:暨南大学, 2015.
- [27] Sivapalan M. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology [J]. Hydrological Processes, 2003,17(15):3163-3170.
- [28] Murugesu S, Blöschl G, Zhang Lu, et al. Downward approach to hydrological prediction [J]. Hydrological processes, 2003,17(11):2101-2111.
- [29] Archfield S A, Vogel R M. Map correlation method: selection of a reference streamgage to estimate daily streamflow at ungauged catchments. [J]. Water Resources Research, 2010,46(10):5613-5618.
- [30] 刘苏峡,刘昌明,赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J]. 地理科学进展, 2010,29(11):1333-1339.
- [31] 郭其一,路向阳,李维刚,等. 基于小波分析和模糊神经网络的 水文预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005,33(1):130-133.
- [32] 刘国东,丁晶. BP 网络用于水文预测的几个问题探讨[J]. 水利学报, 1999,30(1):65-70.
- [33] Prinzi M D, Castellarin A, Toth E. Data-driven catchment classification; application to the pub problem [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(6):1921-1935.

(上接第 106 页)

#### 参考文献:

- [1] 王逸群. 新疆伊犁湿地资源现状与生态环境评价[J]. 水土保持研究, 2006,13(6):314-318.
- [2] 张树军,赵峰,罗陶露,等. 生态补水综合效益评价指标体系建立[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008,38(5):813-819.
- [3] 韩会玲,徐丽娟. 白洋淀生态补水效益评价指标体系建立[J]. 水科学与工程技术, 2010(5):46-49.
- [4] 王瑞玲,连煜,黄锦辉,等. 黄河三角洲湿地补水生态效益评价[J]. 人民黄河, 2011,33(2):78-81+83+147.
- [5] 王宪恩,闫旭,周佳龙. 我国湿地补水生态补偿机制探析[J]. 环境保护, 2012(4):48-49.
- [6] 于森,王明玉,刘佳,等. 人工补水条件下的缺水河流生态修复综合评价方法[J]. 环境科学学报, 2013,33(2):626-634.
- [7] 吴金鸿,杨涵,杨方社,等. 额尔齐斯河流域湿地生态系统健康评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014(6):149-154.
- [8] 李晓文,李梦迪,梁晨,等. 湿地恢复若干问题探讨[J]. 自然资源学报, 2014,29(7):1257-1269.
- [9] 卿晓霞,郭庆辉,周健,等. 小型季节性河流生态补水需水量及调度方案研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5):876-881.
- [10] 侯保灯,李佳蕾,潘妮,等. 基于改进熵权的灰色关联模型在湿地水质综合评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2008,8(6):80-83.
- [11] 余海霞,廖新峰,周侣艳,等. 基于模糊数学的西溪湿地水质评价[J]. 水资源与水工程学报, 2013,24(4):54-57.
- [12] 戚湧,李千目. 科学研究绩效评价的理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [13] 华生. 保护“地球之肾”共建美丽家园[J]. 绿色中国(综合版), 2013(20):18-27.