

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0117

龙秋波,朱文彬,吕爱锋.水资源承载风险监测预警理论与方法探析[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1147-1156. LONG Q B,ZHU W B,LYU A F. Theory and methodology for water resources development carrying capacity risk monitoring and early warning system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(6):1147-1156. (in Chinese)

水资源承载风险监测预警理论与方法探析

龙秋波¹,朱文彬²,吕爱锋²

(1. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司,长沙 410007;2. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要:基于风险理论和国家资源环境承载力监测预警研究进展,提出水资源承载风险监测预警的概念内涵、理论模型、警报准则和体系框架。从自然水循环和社会水循环2个层面提出水资源承载风险的危险性与脆弱性因子,解析水资源承载风险监测预警内涵,提出耦合水资源承载状态与风险预警等级的理论模型,采用指标预警法设计警报准则,搭建由监测层、预警层、决策层和反馈调控层构成的监测预警体系框架,及时发出预警信息,为水资源管理决策者提供调控依据,降低水资源承载风险,将经济社会发展的水资源压力控制在水资源系统可承载的范围之内。

关键词:风险评价;水资源承载力;监测指标;预警体系

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水资源作为资源环境系统的重要组成部分,是生命之源、生产之要和生态之基,对于经济社会的协调发展具有极其重要的支撑作用。随着我国水资源开发利用强度的增加,水生态空间、水环境容量及水资源数量的约束效应日益凸显,我国水资源安全保障的主要矛盾已逐步从供给不足转向承载过度^[1-2]。在此背景下,开展水资源承载风险监测预警研究既是落实上述中央文件的应有之意,也是新形势下保障我国水资源安全的时代要求。

水资源承载力作为一个科学术语,在20世纪80年代末就被明确提出,用于新疆维吾尔自治区的水资源开发利用与策略研究^[3]。随后,我国学者^[4-5]对水资源承载力的概念内涵、指标体系与评价方法等开展了大量的研究工作,到21世纪初基本形成了相对完善的理论方法与应用体系。承载力概念及内涵的认知与应用不断发展,从最初物理概念逐步扩展至生态学、土地学、环境学和资源学等领域。水资源承载力从以水资源供需比^[6]、水资源可利用

量^[7]、水资源承载最大人口规模^[8]等指标衡量发展到从水量、水质、水域空间和水流状态等多个维度来评估^[1],研究方法日趋多样化,主要包括经验公式法、指标体系评价法和系统分析法。经验公式法简单直观,易于推广,但具有一定程度的主观性,难以把握动态承载变化;指标体系评价法具有较强的理论基础,考虑了水资源承载力主客体的耦合作用,但指标选择形式多样,一般只作定性评价;系统分析法从水资源系统整体性、复杂性和多目标性定量分析水-经济-生态系统的内在联系,能反映出经济社会发展与资源环境之间的有机联系。

然而,受限于水资源承载主客体系统及其过程关系的复杂性,当前的水资源承载力研究在概念内涵、评价指标乃至成果表征等方面仍存在诸多分歧,严重影响了水资源承载风险监测、预警、调控技术的推广应用^[9]。在此背景下,2016年7月,国家重点研发计划(2016YFC0401307)关于水资源承载能力监测预警研究项目正式立项实施。作为科技部优先

收稿日期:2020-08-18 修回日期:2020-11-06 网络出版时间:2020-12-10

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201209.1606.008.html>

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401307);湖南省重大水利科技专项(XSKJ[2019]081-08)

作者简介:龙秋波(1986—),男,湖南保靖人,工程师,博士,主要从事水资源规划与管理研究。E-mail:longqiubo17@126.com

通信作者:朱文彬(1987—),男,山东青岛人,副研究员,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:zhuwb@igsr.ac.cn

启动的“水资源高效开发利用”专项,该项目的研究内容之一便是研发区域水资源承载风险评估与监测预警技术为我国水资源承载能力监测预警机制建设提供科技支撑。本文的研究目标是基于该项目的研究进展,结合全国资源环境承载能力预警的基点和技术方法,提出水资源承载风险评估预警的概念内涵、理论模型、预警准则和体系框架,以期为区域的水资源安全保障提供科学参考与决策支撑。本研究是风险理论和承载理论在水资源管理领域的跨学科综合,拓展了水资源承载力研究领域。多学科综合的水资源承载风险评估机理是水资源承载风险评估、监测与预警的理论基础,是基于风险的水资源承载管理所必须解决的重大科学问题,也是水资源管理由事实管理趋向风险管理的必要前提。

1 水资源承载风险评估预警的概念内涵

水资源承载风险评估是水资源承载力研究的新领域。虽然国内外研究在水资源风险^[10-11]、水资源短缺风险^[12-13]、水资源安全风险^[14-15]和水生态风险^[16-17]等方面均有了长足的进展,但关于水资源承载风险评估的研究尚处于起步阶段^[18-19]。从字面上看,水资源承载风险评估是灾害风险理论在水资源承载力领域的具体化应用,灾害风险理论和资源环境承载力理论构成了水资源承载风险评估预警的两大理论基础。尽管当前学术界在资源承载力领域仍有诸多分歧,但各类研究的最终落脚点无外乎资源的承载能力和承载状态 2 个方面^[20];根据灾害风险理论,风险是指不利事件发生的严重程度及概率,其本质特征是不确定性^[21]。基于以上两点,并区别于已有的各类水资源风险定义,本研究将水资源承载风险评估定义为在各种不确定情形下发生水资源超载事件的概率。

由该定义可知,水资源承载风险评估预警与传统的水资源承载力评价紧密联系、相辅相成,前者是后者的延伸,后者是前者的基础。水资源承载风险评估预警依然需要水资源承载力评价指标体系与方法的支撑,所不同的是它需要根据风险评估的框架重新梳理。从灾害风险评估的角度而言,风险的组成要素主要包括致灾体和承灾体 2 个方面^[22]。致灾体的危险性和承灾体的脆弱性(包括承灾体的暴露度和应对能力 2 个方面)共同影响区域灾害风险水平^[23-24]。水资源承载系统是由水资源系统与经济社会系统共同组成的复合系统,既有水资源对经济社会的支撑作用,也有经济社会发展对水资源的压力作用。基于经典的压力-状态-响应模型,结合前

面的灾害风险理论可知,水资源承载风险评估的危险性主要来自社会经济系统,综述已有的水资源承载力评价指标体系,可以将来自社会经济系统的危险源概括为城镇化水平、产业结构和用水效率等 3 个方面^[25-26];在全球变暖的大背景下,近年来越来越多的水资源安全评价开始关注气候变化的影响,因此气候变化也成为水资源承载风险评估重要的致灾因子之一^[27-28]。相比之下,水资源承载风险评估的脆弱性主要源自水资源系统本身,包含“量、质、域、流”等 4 个维度,分别代指允许经济社会消耗的水资源量、允许排入河湖水体的污染物质、维持一定水域空间的地表水量和地下水位、维持特定生态功能的河流生态流量^[2,29]。水资源承载风险评估预警的目的就在于通过对水资源承载系统危险性指标和脆弱性指标的实时监测,基于水资源承载力和承载状态评价结果,确定水资源承载风险评估类、级的阈值,构建从单类指标因子风险评估到区域水资源承载风险评估的多层次预警技术体系,防患于未然,将经济社会发展的水资源压力控制在水资源系统可承载的范围之内。

2 水资源承载风险评估预警的理论模型

水资源承载风险评估是最近才被提出的科学概念,因此目前国内外还缺乏水资源承载风险评估预警的系统性理论模型。尽管如此,近年来在国家建立资源环境承载力监测预警机制的推动下,学术界在资源环境承载能力监测预警研究方面已经取得了长足的进步,为水资源承载风险评估预警提供了可参照的现实理论基础^[30-32]。

资源环境承载能力监测预警的理论基础是可持续发展的增长极限理论,通过资源环境承载状态的实时评估来反映区域发展的可持续性是其监测预警的逻辑起点^[33]。参照经典的资源环境承载能力 S 曲线,水资源承载能力监测预警的内涵见图 1(a)。区域的水资源量常用多年水文序列的平均态表征,因此单纯从水资源量角度考虑,区域的水资源承载能力处于恒定状态。在此假设前提下,区域的水资源承载状态随着社会经济的发展可以表示为时间的函数,区域水资源承载能力监测预警的关键是要识别临界超载、超载和不可逆 3 个关键状态的阈值。在本研究中,水资源承载风险评估是指在各种不确定情形下发生水资源超载事件的概率。这里的不确定性主要是指致灾因子的不确定性,所谓致灾因子是指可能导致水资源承载系统发生变化的要素,包括水循环要素变化驱动因子和用水方式变

化驱动因子,具体化为气候变化、人口增长与城镇化、经济发展与产业结构、用水技术与效率水平等 4 个方面。因此,水资源承载风险监测预警的关键是识别上述 4 个致灾因子引发水资源承载系统中风险、较高风险和高风险的阈值。图 1 给出了水资源承载风险监测预警的内涵解析图。具体来说,在调水和节水等水资源承载能力调控措施缺失的条件下,随着区域的水资源承载状态趋于饱和,水资源承载风险将不断增大。与图 1(a)中水资源承载的 3 个关键状态相对应,水资源承载风险也可以表示为时间的函数,区域水资源承载风险监测预警的关键就是要识别中风险、较高风险和高风险 3 个关键的

风险阈值。将其公式化,发展提出水资源承载风险监测预警的理论模型

$$\begin{cases} R=f(X,Y) \\ Z=F(R,t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 表示水资源的承载风险; X 表示水资源承载系统的脆弱性; Y 表示致灾因子的危险性; f 表示 X 与 Y 两者匹配关系的函数,在本研究中两者为乘积关系; Z 表示预警程度; F 表示 R 随时间 t 变化的函数。根据 f 曲线的拐点(中风险、较高风险和高风险),可将 R 划分为低风险、中风险、较高风险和高风险等 4 种类型;根据 R 随时间 t 的变化趋势,可将 Z 划分为无警、轻警、中警和重警等 4 种类型。

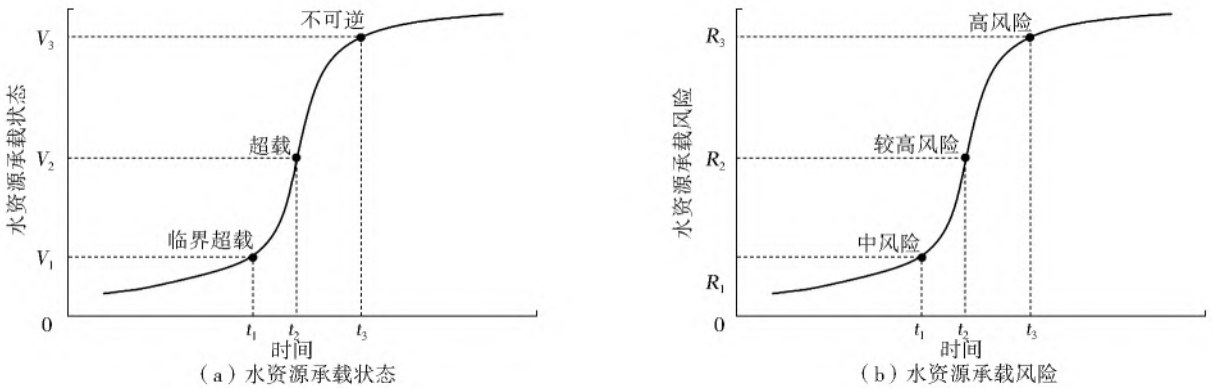


图 1 水资源承载风险监测预警内涵解析

Fig. 1 Basis of monitoring and early-warning system of water resources carrying capacity risk

X 表示水资源承载系统的脆弱性,是对水量、水质、水域空间和水流状态等 4 个因子的综合表达,各个因子又可进一步细化,共同构成水资源承载系统的承载体。单项因子及组合状态决定了 R 的取值,公式为

$$R=f[C(x_1,x_2,x_3,x_4),Y] \quad (2)$$

式中: x_1,x_2,x_3,x_4 分别表示水量、水质、水域、水流 4 个因子; C 表示不同因子的组合函数。

Y 是对致灾因子危险性的表征,具体到水资源承载风险可以概括为气候变化、人口结构、产业结构和用水效率等 4 个因子,各个因子又可进一步细化,共同构成水资源承载系统的危险性,则 R 又可表达为

$$R=f[X,U(y_1,y_2,y_3,y_4)] \quad (3)$$

式中: y_1,y_2,y_3,y_4 分别表示气候变化、人口结构、产业结构和用水效率 4 个因子; U 表示不同因子的并集。一般来说,一个区域水资源的量、质、域、流都有较为明确的管理目标(譬如最严格水资源管理制度明确规定了水资源开发利用红线和水功能区限制纳污红线),共同构成了水资源承载系统的内在约束。因此,水资源承载风险监测预警的重点是结合

区域的社会经济发展进程,确定上述理论模型中 4 个致灾因子不同预警程度的阈值。

3 水资源承载风险监测预警的警报准则

预警准则是指一套判别规则或标准,用来决定在各项监测指标变动的情形下警报发出与否和类级。常用的警报准则设计方式有指标预警和因素预警 2 种,本研究采用指标预警法来进行警报准则设计。

指标预警是根据预警指标数值大小的波动来发出不同程度的警报^[34]。根据水资源承载风险监测预警的理论模型,预警指标包括气候变化、人口结构、产业结构和用水效率等 4 个因子。参考已有的水资源承载力评价研究,上述 4 个因子在实际应用中又具体化为多项指标。譬如:黄庆旭等^[35]将气候变化因子具体化为气温、降水量和地表湿润指数等 3 个指标,借以揭示全球气候变暖对北京水资源承载力的影响;薛辰影等^[36]在对湖州市水资源承载力评价研究中,将人口结构因子具体化为人口密度、城镇化率和户籍人口数等 3 个指标;何刚等^[37]在对长江经济带水资源承载力评价研

究中,在产业结构因子方面重点考虑了 GDP、GDP 增速和第三产业比重等 3 个指标;左其亭等^[38]在用水效率因子方面重点考虑了万元工业增加值用水量、万元 GDP 用水量、灌溉定额和人均生活用水量等 4 个指标,以进行黄河流域 9 省区的水资源承载力评价。表 1 通过文献综述列出了上述 4 个因子常

用的具体指标。在水资源承载风险监测预警中,需要对各项具体指标通过权重设置进行系统集成,常用的集成方法包括层次分析法、模糊数学法和灰色系统法等,将各项定量指标概化为气候变化预警指数、人口结构预警指数、产业结构预警指数和用水效率预警指数。

表 1 水资源承载风险监测预警因子及其指标构成

Tab. 1 Indicators and components of WRCC risk

预警因子	气候变化	人口结构	产业结构	用水效率
指标构成	气温 ^[35,42-43]	人口密度 ^[26,29,36-37,39-40]	GDP ^[36,37,41]	工业用水定额 ^[26,29,37-38,40]
	降水量 ^[35,42-43]	城镇化率 ^[26,29,36-37,39-40]	人均 GDP ^[19,26,29,39,41]	万元 GDP 用水量 ^[29,37-38,40-41]
	地表湿润指数 ^[35]	户籍人口 ^[36]	GDP 增速 ^[26,36-37,40]	灌溉定额 ^[26,29,36,38,40]
	干旱指数 ^[29]	人口自然增长率 ^[19,26,37,40]	第三产业比重 ^[29,36-37,39]	水资源开发利用率 ^[29,37,39-40]
	水资源量 ^[42-43]	城市建成区面积比重 ^[39]	第一产业比重 ^[40]	生活用水定额 ^[26,37-38,40-41]

需要特别指出的是,表 1 中的各项预警因子根据其与水资源承载风险的正负反馈作用可以分为正反馈因子和负反馈因子 2 类。所谓正反馈因子是指该因子指数的增加将会加剧区域的水资源承载风险,譬如气候变化指标中的气温和干旱指数、人口结构指标中的人口密度和城镇化率、产业结构指标中的 GDP 和 GDP 增速、用水效率指标中的各类用水定额等;同理,负反馈因子是指该因子指数的增加将会缓解区域的水资源承载风险,主要包括气候变化指标中的降水量、地表湿润指数和水资源量等。由于表 1 中的各类预警因子以正反馈因子居多,这里仅以正反馈因子为例,给出水资源承载风险监测预警的指标准则。结合水资源承载风险监测预警理论模型,设要进行预警的指数为 y ,该指数引发中风险、较高风险和高风险的临界阈值分别为 y_a 、 y_b 和 y_c ,则水资源承载风险为低风险时该指标的取值区间为 $[0, y_a)$,中风险该指标的取值区间为 $[y_a, y_b)$,较高风险该指标的取值区间为 $[y_b, y_c)$,高风险该指标的取值区间为 $[y_c, \infty)$ 。基于此,水资源承载风险监测预警的警报准则设计见图 2。当 $0 \leq y < y_a$ 时,不发出警报;当 $y_a \leq y < y_b$ 时,发出轻度警报;当 $y_b \leq y < y_c$ 时,发出中度警报;当 $y_c \leq y$ 时,发出重度警报。阈值即表征风险的指标值超过了既定界限时的值,其值确定往往带有决策者的主观意识。阈值确定通常采用比较法、专家咨询法和聚类分析法等,各种方法适用背景各有不同。比较法直观明了,简单可行;专家咨询法应用广泛,结果客观,只是流程较为复杂;聚类分析法简单直观,只是在应用过程中需注意异常值和特殊的变量对聚类的影响。

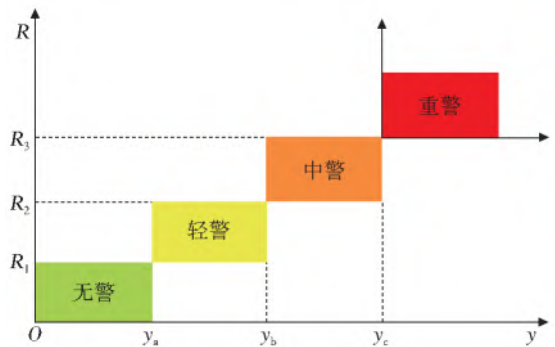


图 2 水资源承载风险监测预警警报设计准则

Fig. 2 Warning rules for WRCC risk monitoring and early-warning system

4 水资源承载风险监测预警的体系框架

水资源承载风险监测预警的根本目的是通过对水资源承载系统各种指标因子的监测,识别预警指标的数值,根据水资源的承载风险及时发出从单类因子预警到区域水资源承载风险预警的警报信息,为水行政主管部门水资源管理提供决策依据,通过对水资源承载系统的科学调控,降低水资源承载风险,将经济社会发展的水资源压力控制在水资源系统可承载的范围之内。基于此,一个完整的水资源承载风险监测预警体系框架应该包含监测层、预警层、决策层和反馈调控层等 4 个层次^[44-45]。

监测层的核心任务是发展全面、准确、实时的水资源承载信息获取与处理技术,主要包括信息监测、数据复核和数据库构建等 3 个方面的工作。基于本研究构建的水资源承载风险监测预警理论模型,监测要素包括水资源承载系统的脆弱性指标和危险性指标。脆弱性指标包括水资源的量、质、域、流等 4 个方面,具体化为人均水资源量、水体水质状况、水资源开发利用率、水域面积率、库径比指数、产水模

数等;危险性指标包括气候变化、人口结构、产业结构和用水效率等 4 个方面,具体细化指标详见表 1。上述信息获取的主要途径是国家各部委发布的统计年鉴与公报数据,一方面是由于该类资料权威可信、口径一致、序列完整,能够在很大程度上保证水资源承载风险监测预警的精度;另一方面该类资料也便于与决策层、反馈层相衔接,直接服务于国家各部委的水行政主管部门。

预警层包括预警方法、预警内容和信息发布等 3 个层次,其中构建合理有效的水资源承载风险监测预警方法是核心,主要包括预警模型和警报准则等 2 个方面。预警内容应包括预警指标的实时数值、警报级别及参考阈值、预警指标的发展方向等。

预警信息的发布范围应涵盖整个水资源承载风险评价的各个层面,包括与预警指标构成要素相关的各类水行政主管部门。

决策层与反馈层都是指水行政主管部门对预警信息的响应。决策层偏重于水行政主管部门的决策过程,包括信息交换、专家评议、部门协商、形成决议和决策下达等 5 个层次;反馈层偏重于水行政主管部门对水资源承载风险的具体管控,主要包括管控措施与效果评价等 2 个层次。

图 3 给出了水资源承载风险监测预警的体系框架,该框架的适用对象是水行政主管部门。基于此,水资源承载风险监测预警的基本流程概括如下。

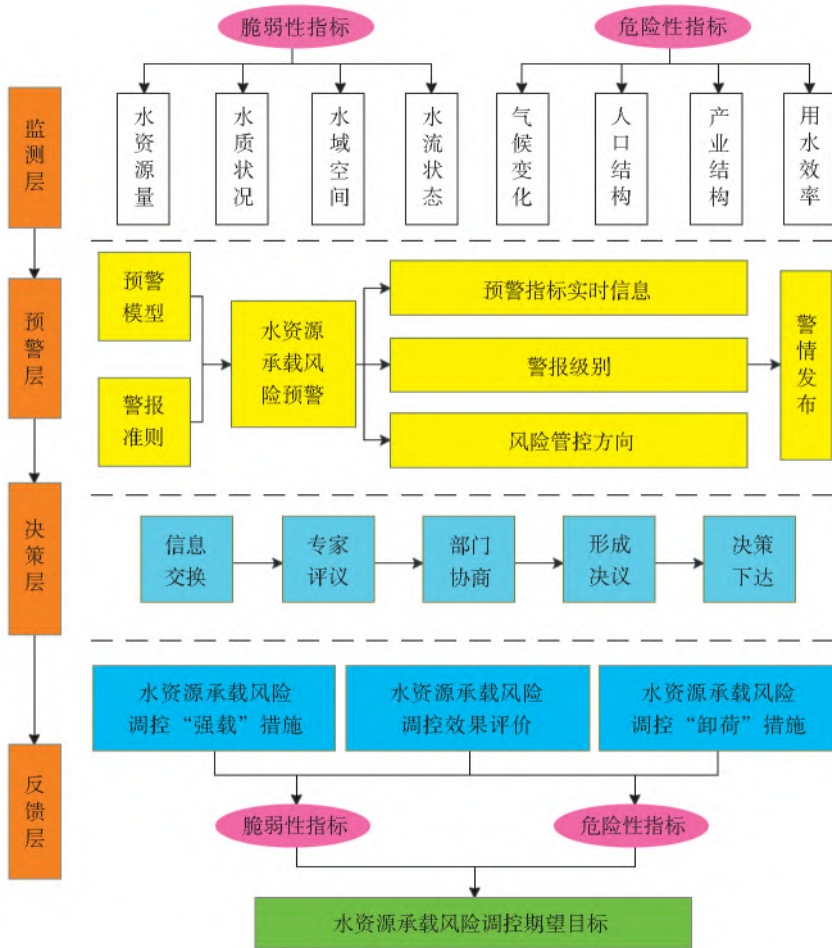


图 3 水资源承载风险监测预警体系框架

Fig. 3 General framework for WRCC risk practical applications

(1)对水资源承载系统的脆弱性指标因子(水量、水质、水域、水流)和危险性指标因子(气候变化、人口结构、产业结构、用水效率)进行实时监测与收集处理。

(2)根据预警模型和警报准则进行水资源承载风险预警,从预警指标、警报级别和风险管控方向等 3 个方面发布警情。

(3)水行政主管部门会同相关部门,通过信息交换、专家评议、部门协商等环节商定决策方案并下达。

(4)耦合决策方案与预警模型,从“强载”和“卸荷”2 个方面对水资源承载系统进行反馈调控和效果评价,直到水资源承载风险达到期望目标^[46-47]。

值得注意的是,警情应根据水资源承载风险程

度的高低发布至不同级别的水行政主管部门。当水资源承载风险处于“轻度警报”或“中度警报”时,警情发送至市县基层水行政主管部门并报送省级水行政主管部门备案;当水资源承载风险处于“重度警报”时,警情应即刻报送省级水行政主管部门,并及时报送国家水行政主管部门备案。

5 结论与讨论

基于风险理论和资源环境承载力监测预警研究进展,创造性地提出水资源承载风险监测预警的概念内涵、理论模型、警报准则和体系框架,主要从自然和社会水循环的角度辨析水资源承载风险危险性与脆弱性因子,阐述水资源承载风险监测预警内涵,搭建水资源承载状态与风险预警等级的耦合理论模型,继而采用指标预警法设计警报准则,提出包含监测层、预警层、决策层和反馈调控层的监测预警体系框架。研究方法和成果为水资源管理决策者提供理论支持和监控依据,对未来降低水资源系统承载风险,调控经济社会发展的水资源压力大有裨益。此外,水资源承载风险是灾害风险理论和资源环境承载理论在水资源管理领域中的跨学科应用,在国家水资源承载能力监测预警机制建设的时代背景下,探索开展水资源承载风险监测预警研究具有重要的理论价值与现实意义。

然而,水资源承载风险是水资源承载力研究的新领域,学术界对水资源承载力的内涵与表征尚有分歧,水资源承载风险的监测预警必然还存在诸多科学问题有待明晰。

(1)在作用机理方面,水资源承载风险的监测预警需要合理解析气候变化、产业结构、人口结构和用水效率等致灾因子对水资源承载系统的影响路径,提出主要过程和因子影响的概念模式,明确不同危险性因子与脆弱性因子的交互反馈机制,揭示水资源承载风险的作用机理。但是,本文初步给出了水资源承载风险监测预警的理论方程,有待进一步强化其适用性,建议后续研究可以根据相关文献或物理机制进一步细化。

(2)在评估方法方面,需要从水资源承载能力及负荷的概念及其影响因素出发,研究影响因素的风险特征,解析因子风险的传导过程及其传导效应,提出水资源承载风险识别指标的层次结构,研究不同水资源承载风险识别指标权重的确定方法,构建多层次水资源承载风险识别指标体系。

(3)在监测预警技术方面,需要研发水资源承载风险分类分级方法,确定不同水资源承载风险类、级

的阈值,探讨阈值时空差异及其影响因素;以水资源承载风险分类分级和阈值为基础,研发从指标因子风险到水资源承载风险的多层次水资源承载风险监测预警技术体系。

参考文献(References):

- [1] 王建华,姜大川,肖伟华,等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报,2017,48(12): 1399-1409. (WANG J H, JIANG D C, XIAO W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: Definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1399-1409. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170651.
- [2] 王建华,翟正丽,桑学锋,等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报,2017,48(9):1023-1029. (WANG J H, ZHAI Z L, SANG X F, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1023-1029. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20170377.
- [3] 新疆水资源软科学课题研究组. 新疆水资源及其承载能力和开发利用对策[J]. 水利水电技术,1989(6):2-9. (Xinjiang Water Resources Science Research Group. Xinjiang water resources and carrying capacity and development strategy [J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 1989(6): 2-9. (in Chinese)) DOI: CNKI:SUN:SJWJ.0.1989-06-000.
- [4] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3):1-6,54. (ZUO Q T. Review of research methods of water resources carrying capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 1-6, 54. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2017.03.001.
- [5] WANG Y X, WANG Y, SU X L, et al. Evaluation of the comprehensive carrying capacity of interprovincial waterresources in China and the spatial effect [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575, 794-809. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.076.
- [6] MILANO M, RUELLAND D, DEZETTER A, et al. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin [J]. Journal of Hydrology, 2013, 500(11):114-126.
- [7] FALKENMARK M, LUNDQVIST J. Towards water security: political determination and human adaptation

- crucial [J]. Nature Resources Forum, 1998, 21(1): 37-51.
- [8] 王浩,秦大庸,王建华,等. 西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 151-159. (WANG H, QIN D Y, WANG J H, et al. Study on carrying capacity of water resources in inland arid zone of northwest of China [J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(2): 151-159. (in Chinese))
- [9] 王建华,何凡,何国华. 关于水资源承载力需要厘清的几点认识[J]. 中国水利, 2020(11): 1-5. (WANG J H, HE F, HE G H. Some understandings about the clarification of water resources carrying capacity [J]. China Water Resources, 2020(11): 1-5. (in Chinese))
- [10] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 980-989. (WANG H R, QIAN L X, ZHAO Z Y, et al. Theory and assessment method of water resources risk [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 980-989. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20190177.
- [11] 赵钟楠,田英,张越,等. 水资源风险内涵辨析与中国水资源风险现状[J]. 人民黄河, 2019, 41(1): 46-50. (ZHAO Z N, TIAN Y, ZHANG Y, et al. Analysis of connotation and current situation of water resources risks in China [J]. Yellow River, 2019, 41(1): 46-50. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2019. 01. 011.
- [12] 胡惠兰,周亮广. 淮河流域水资源短缺风险评估与时空分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 59-65. (HU H L, ZHOU L G. The risk assessment and space-time analysis of water resources shortage in Huaihe River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 59-65. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbqk. 2017. 06. 009.
- [13] 廖强,张士锋,陈俊旭. 北京市水资源短缺风险等级评价与预测[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 140-147. (LIAO Q, ZHANG S F, CHEN J X. Risk assessment and prediction of water shortages in Beijing [J]. Resources Science, 2013, 35(1): 140-147. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZRZY. 0. 2013-01-021.
- [14] 梁缘毅,吕爱锋. 中国水资源安全风险评价[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 775-789. (LIANG Y Y, LYV A F. Risk assessment of water resource security in China [J]. Resources Science, 2019, 41(4): 775-789. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2019. 04. 14.
- [15] 孔锋,王品,吕丽莉. 全球气候变化背景下雄安新区建设水资源安全风险与治理对策[J]. 水利发展研究, 2018, 18(2): 12-14, 39. (KONG F, WANG P, LYU L L. Water resources security risks and countermeasures of Xiong'an New Area construction under the background of global climate change [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(2): 12-14, 39. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2018. 02. 004.
- [16] 迟妍妍,许开鹏,王晶晶,等. 京津冀地区水生态风险及对策建议[J]. 环境影响评价, 2019, 41(2): 32-35. (CHI Y Y, XU K P, WANG J J, et al. The water ecological risk and its control in Beijing, Tianjin and Hebei [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(2): 32-35. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SXHS. 0. 2019-02-011.
- [17] 娄保锋,陈洁. 水生态风险评估方法探讨[J]. 人民长江, 2014, 45(18): 1-4. (LOU B F, CHEN J. Discussion on evaluation method of water ecology risk [J]. Yangtze River, 2014, 45(18): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4179. 2014. 18. 001.
- [18] 叶海焯,董增川,杭庆丰,等. 盐城市水资源承载状态预警研究[J]. 水利经济, 2018, 36(5): 31-35, 76. (YE H Z, DONG Z C, HANG Q F, et al. Study on Yancheng's water resources carrying capacity [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(5): 31-35, 76. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SLJJ. 0. 2018-05-008.
- [19] 王彦,孟令爽. 基于熵权理想点的水资源承载力风险评估[J]. 人民长江, 2019, 50(4): 142-146. (WANG Y, MENG L S. Risk evaluation on water resources carrying capacity based on entropy weighting ideal point method [J]. Yangtze River, 2019, 50(4): 142-146. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2019. 04. 025.
- [20] 封志明,李鹏. 承载力概念的源起与发展: 基于资源环境视角的讨论[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1475-1489. (FENG Z M, LI P. The genesis and evolution of the concept of carrying capacity: A view of natural resources and environment [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1475-1489. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20170967.
- [21] AVENT T. On how to define, understand and describe risk [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95: 623-631. DOI: 10. 1016/j. ress. 2010. 01. 011.

- [22] 马保成. 自然灾害风险定义及其表征方法[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 16-20. (MA B C. Definition and expression methods for natural disaster risk[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 16-20. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2015. 03. 003.
- [23] 金菊良, 董涛, 郦建强, 等. 区域水资源承载力评价的风险矩阵方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 46-50. (JIN J L, DONG T, LI J Q, et al. Risk matrix method for evaluating regional water resources carrying capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2018, 39(2): 46-50. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-5634. 2018. 02. 007.
- [24] 黄国如, 罗海婉, 卢鑫祥, 等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6, 17. (HUANG G R, LUO H W, LU X X, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6, 17. (in Chinese))
- [25] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002(3): 262-269. (XIA J, ZHU Y Z. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002(3): 262-269. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2002. 03. 002.
- [26] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269. (LIU J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2011. 02. 009.
- [27] 夏军, 邱冰, 潘兴瑶, 等. 气候变化影响下水资源脆弱性评估方法及其应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(4): 443-451. (XIA J, QIU B, PAN X Y, et al. Assessment of water resources vulnerability under climate change and human activities[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(4): 443-451. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; DXJZ. 0. 2012-04-009.
- [28] KUMAR P. Hydro-complexity: Addressing water security and emergent environmental risks[J]. Water Resources Research, 2015, 51, 5827-5838. DOI: 10. 1002/2015WR017342.
- [29] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 358-371. (YU H Z, LI L J, LI J Y. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 358-371. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2020. 02. 14.
- [30] 樊杰, 王亚飞, 汤青, 等. 全国资源环境承载力监测预警(2014 版)学术思路与总体技术流程[J]. 地理科学, 2015, 35(1): 1-10. (FAN J, WANG Y F, TANG Q, et al. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity(V2014)[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2015. 01. 001.
- [31] 陈晓雨婧, 吴燕红, 夏建新. 甘肃省资源环境承载力监测预警[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2378-2388. (CHEN X Y Q, WU Y H, XIA J X. Dynamic monitoring and early warning of resources and environment carrying capacity in Gansu, China[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2378-2388. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20191110.
- [32] 徐勇, 张雪飞, 周侃, 等. 资源环境承载力预警的超载成因分析方法及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 277-285. (XU Y, ZHANG X F, ZHOU K, et al. Method and application of cause analysis for earlywarning of resource and environmental system overloading[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 277-285. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2017. 03. 002.
- [33] 樊杰, 周侃, 王亚飞. 全国资源环境承载力监测预警(2016 版)的基点和技术方法进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 266-276. (FAN J, ZHOU K, WANG Y F. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environment carrying capacity(V2016). Progress in Geography, 2017, 36(3): 266-276. (in Chinese)) DOI: 10. 18306/dlkxjz. 2017. 03. 001.
- [34] 朱平. 区域水资源预警方法研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007. (ZHU P. Study on regional water resources early warning method[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007. (in Chinese))
- [35] 黄庆旭, 何春阳, 史培军, 等. 气候干旱和经济发展双重压力下的北京水资源承载力变化情景模拟研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 859-870. (HUANG Q X, HE C Y, SHI P J, et al. Modeling water resources carrying capacity change under stress of

- drought and socioeconomic development in Beijing [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(5): 859-870. (in Chinese) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2009. 05. 013.
- [36] 薛辰影,方红远,吉久伟. 水资源承载力评价指标约简方法研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 23-30. (XUE C Y, FANG H Y, JI J W. An index reduction method for water resources carrying capacity[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(3): 23-30. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0056.
- [37] 何刚,夏业领,秦勇,等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 287-292, 300. (HE G, XIA Y L, QIN Y, et al. Evaluation and spatial-temporal dynamic change of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 287-292, 300. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2019. 01. 042.
- [38] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 1-7. (ZUO Q T, ZHANG Z Z, WU B B. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River basin based on combined weight TOPSIS model [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2020. 02. 001.
- [39] 韩雁,张士锋,吕爱锋. 外调水对京津冀水资源承载力影响研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2236-2246. (HAN Y, ZHANG S F, LYU A F. Research of effection water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region by water transfer[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2236-2246. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2018. 11. 10.
- [40] 王友贞,施国庆,王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(4): 597-604. (WANG Y Z, SHI G Q, WANG D S. Study on evaluation indexes of regional water resources carrying capacity[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 597-604. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y716697.
- [41] 贾绍凤,周长青,燕华云,等. 西北地区水资源可利用量与承载能力估算[J]. *水科学进展*, 2004, 15(6): 801-807. (JIA S F, ZHOU C Q, YAN H Y, et al. Estimation of usable water resources and carrying capacity in northwest China[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(6): 801-807. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2004. 06. 020.
- [42] 左其亭,张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(4): 387-394. (ZUO Q T, ZHANG X Y. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(4): 387-394. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2015. 04. 002.
- [43] 姜大川. 气候变化下流域水资源承载力理论与方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018. (JIANG D C. Study on theory and method of water resources carrying capacity[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018. (in Chinese))
- [44] 李宁,刘晋羽,谢涛. 水资源环境承载能力监测预警平台设计探讨[J]. *环境科技*, 2015, 28(2): 57-61. (LI N, LIU J Y, XIE T. Discussion on monitoring and warning platform design for water resources and environment capacity [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 28(2): 57-61. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-4829. 2015. 02. 014.
- [45] 李海辰,王志强,廖卫红,等. 中国水资源承载能力监测预警机制设计[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(S1): 316-319. (LI H C, WANG Z Q, LIAO W H, et al. Design and decision of monitoring warning mechanisms for carrying capacity of the national water resources [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(S1): 316-319. (in Chinese))
- [46] 修红玲,朱文彬,韦家兴,等. 中国水资源承载能力调控关键技术与政策研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(3): 467-473. (XIU H L, ZHU W B, WEI J X, et al. Key technologies and policies to adjust water resource-carrying capacity[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2020, 56(3): 467-473. (in Chinese)) DOI: 10. 12202/j. 0476-0301. 2020230.
- [47] 窦明,胡瑞,张永勇,等. 淮河流域水资源承载能力计算及调控方案优选[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(6): 28-33, 59. (DOU M, HU R, ZHANG Y Y, et al. Calculation and scheme selection for water resources carrying capacity of Huaihe River basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(6): 28-33, 59. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN; SFXB. 0. 2010-06-006.

Theory and methodology for water resources development carrying capacity risk monitoring and early warning system

LONG Qiubo¹, ZHU Wenbin², LYU Aifeng²

(1. *Hunan Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd, Changsha 410007, China;*
2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

Abstract: Multi-disciplinary and comprehensive water resources carrying capacity risk is a theoretical basis of water resources carrying risk identification, monitoring and early warning. It is not only a major scientific problem that must be solved for risk-based water resources carrying management, but also prerequisite for fact management to risk management for water resources management.

Water resources carrying capacity risk refers to the probability of water resources overload under various uncertain circumstances. Water resources carrying capacity risk monitoring and early warning need the support of water resources carrying capacity evaluation index system and methods. It needs to be reported according to the framework of risk evaluation. The constituent elements of risk are disaster-causing body and disaster-bearing body. The risk of water resources carrying is social and economic system. The vulnerability of water resources carrying risk mainly comes from the water resources system itself, including four dimensions of "quantity, quality, domain and flow", which refer to the amount of water resources allowed for economic and social consumption, the amount of pollutants allowed to be discharged into rivers and lakes, the surface water volume and groundwater level to maintain a certain water space, and the river ecological flow to maintain specific ecological functions. Water resources carrying risk monitoring and early warning is a threshold of water resources carrying risk category and level based on the evaluation results of water resources carrying capacity and state and the purpose is to build a multi-level early warning system from single index factor risk early warning to regional water resources carrying risk early warning, taking preventive measures and control the water resources pressure of economic and social development within the range of water resources system.

A theoretical model coupling water resources carrying capacity state and risk monitoring and early warning level to point out the focus of water resources carrying risk monitoring and early warning and to determine the thresholds of different early warning degrees of four disaster causing factors in the theoretical model in combination with the process of regional socio-economic development. The indicator early warning method is used to design the alarm criteria and build a monitoring and early warning system framework composed of monitoring layer, early warning layer, decision-making layer and feedback regulation layer. The core task of the monitoring layer is to develop comprehensive, accurate and real-time water resources carrying information acquisition and processing technology, including information monitoring, data review and database construction. The early warning layer includes three levels: early warning method, early warning content and information release. To build a reasonable and effective early warning method for water resources carrying risk monitoring, including early warning model and alarm criteria. Both the decision-making layer and the feedback layer refer to the response of the water administrative department to the early warning information, and the decision-making layer focuses on the decision-making process of the water administrative department, which includes five levels: information exchange, expert evaluation, departmental consultation, decision-making and decision-making. The feedback layer focuses on the specific control of water resources carrying risk by the water administrative department, mainly including control measures and effect evaluation.

Through the monitoring and warning system, information can be timely sent out, providing the regulation basis for decision-makers to reduce the risk of water resources carrying capacity and control social-economic water resources pressure within the acceptable range. Water resources carrying capacity risk is a new field of water resources carrying capacity. There are some differences in the connotation and characterization of water resources carrying capacity. So, there must be many scientific problems to be clarified in the monitoring and early warning of water resources carrying capacity risk.

Key words: risk evaluation; water resources carrying capacity; monitoring indicator; early warning system