

文章编号:1003-7578(2005)06-093-05

基于网格水文单元的流域水资源自然再生能力评价*

曾维华, 孙强, 杨志峰

(北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

提 要: 首先, 从水资源自然再生能力的基本概念探讨入手, 提出了一种网格水文单元水资源自然更新率概念, 用以表征该网格水文单元的水资源自然再生能力; 在此基础上, 建立了一种全新的水资源自然再生能力评价方法。其次, 在基于 GRID 的泾河流域水量动态平衡模拟基础上, 通过逐网格计算泾河流域 1996 年各月水资源自然更新率, 来对泾河流域 1996 年水资源自然再生能力进行评价。评价结果表明: 泾河流域水资源自然再生能力在年内时间尺度上存在明显的准周期运动规律。泾河流域水资源自然更新率在 -1.5 到 1.5 之间, 4 月为最低值, 6 月为最高值, 整个趋势受降水的影响较大, 丰水期与枯水期差别明显。与此同时, 泾河流域水资源自然再生能力也存在明显的空间分布规律, 具体表现为泾河流域中部的水资源自然再生能力最高, 流域南部地区中等, 流域北部水资源自然再生能力较弱。水资源的这种空间分布规律主要取决于该流域降水、蒸发, 以及植被与土壤等下垫面空间分布规律。

关键词: 水资源再生能力; GRID; 泾河流域; 水资源更新速率

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

水资源的再生性是指水资源存储量可以通过某种循环不断补充, 且能够重复地开发利用的特征, 是水资源的基本属性。水资源再生是有一定限度的, 国际上一致认为水资源最大利用量不能超过其再生量, 法国将水资源可再生性作为流域水资源管理应遵守的原则之一。近几年, 在水资源可再生性理论与评价研究方面, 以杨志峰教授为首的国内很多学者从各个角度对水资源再生性理论进行了广泛的研究与探讨, 取得了很多瞩目的研究成果。曾维华、杨志峰等从水资源再生方式角度, 提出水资源可再生性可分为自然可再生性和社会可再生性, 而水资源再生能力是由可再生性决定的, 具有相对性、波动性和时空分布变异性的特征; 水资源的自然再生能力取决于水资源的自然循环: 降水、径流、蒸发、地形以及水文地质条件等^[1]。夏军、王中根从水资源的量与质角度, 提出水资源的再生性可分为水资源量的可再生性和水资源质的可再生性, 水量可再生性和水质可再生性综合决定了水资源的可再生性, 并提出了关于单元水体水量恢复周期和水资源量可再生性指数的概念, 从微观角度研究水资源可再生性。这两种观点是从不同角度对水资源的可再生性理论进行研究的^[2]。在水资源可再生性(能力)评价方面, 沈珍瑶、杨志峰等在对水资源再生性影响因子的定性分析的基础上, 建立黄河流域水资源可再生性评价指标体系, 利用灰色关联方法与主成分分析方法进行指标筛选并对评价指标进行赋权; 最后, 利用灰关联分析方法与模糊综合评判法对黄河流域水资源可再生性进行了评价^[3]。在此基础上, 沈珍瑶、杨志峰等进一步深入地提出定量描述水资源的自然可再生性问题, 将水资源自然再生能力与水资源的更新速率联系起来, 认为用单位面积单位时间的可更新水资源量来表述水资源天然再生能力是一条可行之路^[5]。

目前所开展的流域水资源可再生(性)能力评价大多以流域分区作为评价单元, 通过建立评价指标体系, 利用综合评价方法, 评价各水文分区的水资源再生能力。基于栅格(GRID)的流域水资源再生能力评价刚刚起步, 有待在实践中进一步应用。另外, 尽管流域水资源可再生性的物理意义研究已取得一定的成

* 收稿日期: 2005-06-21。

基金项目: 国家自然科学基金(70273005), 国家高科技研究发展计划(2003AA601010)。

作者简介: 曾维华(1965-), 男, 博士, 副教授, zengwh@bnu.edu.cn, 8610-58800486。

果,但对于其数学表达的研究还处于起步阶段,如何从众多影响因子中筛选主要因子,构造反映流域水资源再生能力的综合指标问题尚有待进一步研究。

针对目前流域水资源可再生性及其评价理论研究中存在的问题,本文拟在构造流域水资源自然再生能力概念、物理意义与综合评价指标等方面进行初步尝试;并以黄河流域泾河子流域为例,在基于 GRID 的泾河流域水平衡动态模拟研究基础上,确定影响泾河流域水资源自然再生能力主要因子的时空分布;进一步动态模拟泾河流域水资源自然再生能力的时空演化规律。

1 基于网格水文单元的流域水资源自然再生能力评价模型

1.1 水资源自然再生能力概念

水资源再生能力是由水资源可再生性决定的,它是指某一流域或区域水环境,在现有或近期技术经济能力支持下,通过水资源自然循环与社会循环,不断补充、循环利用水资源的能力^[1]。水资源再生能力包括水资源自然再生能力与社会再生能力两部分。前者是指水资源通过蒸发、降水与径流周而复始的自然循环而得到更新的能力,它包括水资源在"量"上得到的补充和在"质"上得到的净化;后者是从水资源社会循环角度,通过优化调整水资源的社会循环,使水资源得到再生的能力,它包括通过工程技术手段实现水资源的净化和重复利用。

水资源的自然再生是通过水资源的自然循环过程实现的,因此水资源的自然再生能力取决流域水文循环过程。水资源自然再生能力影响因子即影响流域水文循环过程的主要因素,具体包括:降水、气温、湿度、高程、蒸发、地表径流、地下径流、土壤蓄水等。其中降水、蒸发和地表与地下径流,以及土壤蓄水是水资源自然再生能力的最主要影响因子。

1.2 基于网格水文单元的水资源自然再生能力评价

水资源自然再生能力评价方法有两种:

(1) 在建立评价指标体系基础上,利用综合评价方法,进行水资源自然再生能力评价,这种方法比较成熟^[3,4,6];

(2) 本文所采用的是利用水资源自然再生能力的主要定量影响因子,构造一个具有特定物理意义的综合指标,来表征水资源自然再生能力,这种方法尚处于探索阶段。

沈珍瑶、杨志峰等探讨了水资源自然再生能力与水资源更新速率的关系问题,提出了用单位面积单位时间的可更新水资源量来表征水资源自然再生能力^[5]。夏军、王中根等从流域单元水体水资源可再生的角度,采用水箱模型描述单元水体的水文循环基本过程,并单元水体水平衡基础之上提出了单元水体水量恢复周期" τ "和单元水体水资源量可再生性指数" α "来表征单元水体的水资源再生能力^[2]。

不同于上述基于整个流域、子流域、行政区或单元水体进行水资源自然再生能力评价,本文所采用的方法是基于 GRID 的流域水资源自然再生能力评价方法。所谓基于 GRID 的方法就是将研究的流域(区域)划分为若干网格,可根据流域的大小、要求精度的不同划分为 1km、4km、8km 网格。以网格为单位,通过模拟网格内与网格间的水文循环过程,得到各网格降水、蒸发、地表径流、地下径流与土壤蓄水等水资源自然再生能力的主要定量影响因子。最后,利用这些影响因子构造出反应流域水资源自然再生能力的综合指标。

本文拟采用基于网格水文单元的水资源月内的自然更新比率来对表征其自然再生能力,称为网格水文单元水资源自然更新率,即为网格内每月水资源变化量与网格内相对静态水资源量的比值。将每个网格作为一个独立的水文单元,其自然水文循环过程主要包括:降水、实际蒸发、土壤水蓄水、地下水蓄水以及形成的径流(图 1)。

对于任意时段(例如月),某个网格水文单元的水资源收入项为 I ,输出项为 V 。则 $I = P + Q_i$ (1)

$$V = E + Q_e \tag{2}$$

其中 Q_i 为该单元水体输入径流量(mm), Q_e 为单元水体输出径流量(mm), P 为单元水体本月内的平

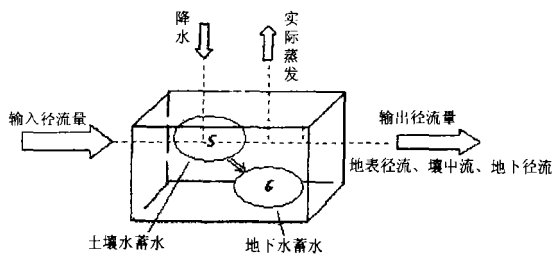


图 1 网格水文单元自然水文循环过程

Fig. 1 Natural hydrological process on the basis of GRID hydrological cell

均降水量 (mm), E 为单元水体在月内的平均蒸发量 (mm)。因此, 月内该单元水体的水资源更新的量 $W = I - V$ 。用水资源更新的量与当月相对静态水资源总量 W 的比值即为该单元水体在该月的水资源更新率 (q): $q = \frac{W}{W} = \frac{I - V}{W} = \frac{P + Q_i - E - Q_e}{W}$ (3)

假设在理想状态下, $Q_e = Q_i + Q$, 即输入径流量 Q_i 全部通过单元水体输出, 在输出径流量中, 还包括单元水体在当月中产生的径流量 Q ; 而相对静态水资源总量用土壤水蓄水量 S 和地下水蓄水总量 G 之和来表示。因此水资源更新率可进一步表示为: $q = \frac{W}{W} = \frac{P - E - Q}{S + G}$ (4)

用单元水体的月水资源自然更新率 q 来表征单元水体在该月内的自然再生能力, 并通过分析流域内各个网格在不同月份内的水资源更新率在空间和时间上的分布规律, 来对流域水资源自然再生能力进行评价。

2 基于网格水文单元的泾河流域水资源自然再生能力评价

3.1 输入数据

首先利用基于 GRID 的流域简单水平衡模型, 按网格模拟泾河流域逐月水文循环过程; 由此得到各网格的降水、蒸发、径流、土壤蓄水与地下水等影响水资源自然再生能力的定量因子的时空分布。在此基础上, 利用表征水资源自然再生能力的综合指数: 基于网格水文单元水资源更新率按网格评价流域水资源自然再生能力。

图 2 - a, b, c, d, e 分别为泾河流域 1996 年 6 月降水量、蒸发量、径流量、土壤水蓄水量和地下水蓄水量的空间分布状况。由此可见, 泾河流域的径流量主要集中在流域南部与中部, 流域北部径流相对较低, 这与流域降水分布关系密切 (图 2 - a)。泾河流域的土壤蓄水与地下水蓄水量的分布类似, 且与径流分布有一定相关性。



图 2 - a 降水量 图 2 - b 蒸发量 图 2 - c 径流量 图 2 - d 土壤水蓄水量 图 2 - e 地下水蓄水量
Fig. 2 - a precipitation Fig. 2 - b evaporation Fig. 2 - c runoff Fig. 2 - d soil water Fig. 2 - e groundwater

3.2 基于网格水文单元的泾河流域水资源自然再生能力评价

(1) 泾河流域水资源自然再生能力的准周期变化规律

表 1 为泾河流域 1996 年各个月份水资源自然更新率的范围和平均值, 图 3 是泾河流域水资源自然更新率均值的年内变化情况。

表 1 泾河流域 1996 年水资源自然再生能力评价结果

Tab. 1 Assessment results of natural water resources renewability of Jin river basin in 1996

水资源更新率	一月	二月	三月	四月	五月	六月
最小值	- 1.99544	- 2.07426	- 2.13134	- 2.36643	- 2.33375	- 0.18619
最大值	- 0.00571	- 0.86035	0.888858	- 0.19147	0.811773	2.371236
平均值	- 0.3164	- 0.5881	- 0.49963	- 1.24405	- 0.80948	1.197826
水资源更新率	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
最小值	0.56333	0.015613	- 0.60204	- 0.35559	- 1.76339	- 1.97953
最大值	2.268143	2.047367	1.757279	1.813009	0.132098	- 0.06622
平均值	1.039573	0.203928	0.137948	0.125352	0.00474	- 0.16652

从图 3 中可以看出, 1 月 - 5 月水资源自然更新率为负值。这是由于这个几个月整个泾河流域的降水量较少, 不能满足流域蒸发和形成径流的消耗, 而水资源的输出的大部分在这个几个月之中是由土壤水和地下水补给完成的。4 月的水资源自然更新率值为全年最低, 这是由于在四月由于气温回升等因素蒸发量增大, 而降水量增加幅度较小, 使得水资源损失相比与一月、二月降水量和蒸发量均小的情况更为显著。随着 5 月降水开始大幅增加, 水资源自然更新率开始回升。到了汛期, 由于降水量激增, 流域水资源得到大量的补充, 在 6 月、7 月使得泾河流域水资源自然更新率达到年内最大值; 8 月、9 月、10 月流域的降水

量、蒸发量、径流量均有大幅的回落,但基本保持平衡,水资源自然更新率维持在 0 - 0.25 之间。到了 11 月、12 月份,进入枯水期,又开始年初的流域水资源消耗大于输入的状况,流域水资源的自然更新率也随之变为负值;由此,完成一个流域水资源自然再生能力的准循环周期。

(2) 泾河流域水资源自然再生能力的空间分布规律

除了在时间上的准周期运动规律外,泾河流域的水资源自然再生能力在空间也具有一定的分布规律。图 4 是 1996 年泾河流域水资源年均自然更新率的分布图。蓝色部分表示水资源自然更新率较高,即水资源的自然再生能力较强;红色则表示水资源自然更新率较低,即水资源的自然再生能力较弱。

如图 4 所示,整个泾河流域水资源自然更新率空间分布规律明显。红色区域主要集中在泾河流域北部,上游马莲河地区,该区域属于黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区,植被稀少、土质疏松,全年的蒸发量大于降水量,故而全年水资源自然可更新率为负值。

蓝色区域主要集中在流域的中部,西部以及泾河流域的发源区,其中流域中部和西部属湿润地区,汇流众多,包括 河、洪河、蒲河、茹河等几条支流,植被覆盖状况较好。通过 1996 年泾河流域降水分布状况可知该区域 1996 年降水丰厚,该区域年水资源自然更新率在 0.11 以上。

与流域中部不同,在泾河流域南部地区年水资源自然更新率在 0 左右。尽管从降水分布来看,该区域是流域降水最丰厚的地区之一;但其范围内有大量的作物区,植被覆盖率较高,蒸发量也不小;这使得这个地区各网格水资源变化量为零,即输入等于输出。这一区域的水资源自然再生能力属中等水平。

比较特殊的是流域的最北部地区,从气象条件和小垫面条件来看,该区域属干旱少雨区,其水资源自然再生能力应与周围地区相近,但从图中显示该区域的水资源自然更新率较高。经过分析,本文认为该区域的水资源总量较少,因此水资源量的微弱变化即会引起区域自然更新率的巨大变化,因此这一部分的偶然因素更多一些,具体情况还需做其他年份年均水资源自然更新率的状况做纵向比较获得。

总之,泾河流域 1996 年水资源自然再生能力分布具有一定的空间规律性,流域中、西部地区再生能力最高,流域南部地区中等,而流域北部是属于水资源自然再生能力较弱地区。这一规律主要取决于流域降水分布与下垫面(土壤、植被等)的分布等。

3 结论

(1) 本文在系统总结流域水资源自然再生能力评价已有研究基础上,建立了基于网格水文单元的水资源自然再生能力评价方法。相比基于流域、流域分区或行政区的综合评价方法,该方法的最大的特点是物理意义明确,而且可以按网格水文单元给出水资源自然再生能力的空间分布,有利于对流域水资源时空分布规律进行深入研究。

(2) 本文利用基于 GRID 的泾河流域水量平衡模拟结果,通过计算表征流域水资源自然再生能力的水资源自然更新率来对泾河流域 1996 年水资源自然再生能力进行评价。评价结果表明:泾河流域水资源自然再生能力在年内时间尺度上存在明显的准周期运动规律。泾河流域水资源自然更新率在 - 1.5 到 1.5 之间,4 月为最低值,6 月为最高值,整个趋势受降水量的影响较大,丰水期枯水期差别明显。同时,在空间上泾河流域水资源自然再生能力也存在明显的分布规律,具体表现为在泾河流域中、西部,水资源自然再生能力最高,流域南部地区中等,流域北部水资源自然再生能力较弱。水资源的这种空间分布规律主要取决于该流域降水、蒸发,以及植被与土壤等下垫面空间分布规律。

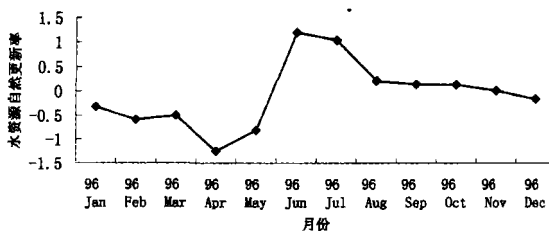
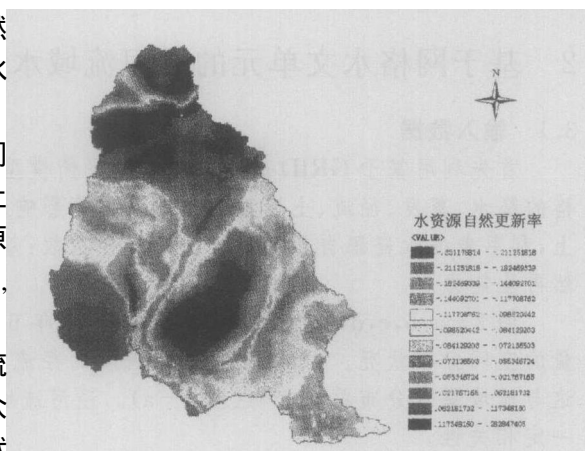


图 3 泾河流域 1996 年月水资源自然再生能力评价结果图
Fig. 3 Assessment results figure of natural water resources renewability of Jin river basin in 1996



参考文献

- [1] 曾维华, 杨志峰等. 水资源再生能力论议[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 276 - 279.
- [2] 左其亭, 王中根. 现代水文学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 99 - 129.
- [3] 沈珍瑶, 杨志峰. 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 188 - 197.
- [4] 杨晓华, 杨志峰, 沈珍瑶等. 水资源可再生能力评价的遗传投影寻踪方法[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 73 - 76.
- [5] 沈珍瑶, 杨志峰, 刘昌明. 水资源天然再生能力及其与更新速率之间的关系[J]. 地理科学, 2002, 22(2): 162 - 165.
- [6] 杨晓华, 杨志峰, 沈珍瑶等. 水资源可再生能力综合评价的多目标决策理想区间法[J]. 中国科学 E 辑技术科学, 2004, 34(增刊 I): 34 - 41.

Natural Renewability Assessment of Water Resources of Jin River Basin based on GRID Hydrological Cell

ZENG Wei - hua , SUN Qiang , YANG Zhi - feng

(School of Environment , Beijing Normal University ; State Key Laboratory of Water Environmental Simulation , Beijing 100875 , China)

Abstract

First of all , start with the basic concept of the natural renewability of water resources , a concept of renew rate of water resources based on the GRID hydrological cell was proposed in order to represent the natural renewability of water resources of the GRID hydrological cell. On the basis of this , a completely new method of natural water renewability assessment was developed. In the next place , on the basis of dynamic water balance simulation of Jin river basin based on the GRID , the natural water renewability of the river basin in 1996 was assessed by calculating the renew rate of water resources of the river basin grid by grid in 1996. The assessment results indicate there are quasi cycle motion law of natural water resources renewability of Jin river basin in the time scale in years. The natural renew rate of water resources of Jin river basin is between - 1.5 and 1.5 , and the lowest in the April and the largest in the June. All the trend is influenced by precipitation very much , and there is obvious different between the high water period and law water period. At same time , there is a obvious law of distribution of natural water renewability of Jin river basin in space. It represent concretely that natural water resources renewability is highest in the middle and the west of the Jin river basin , and the lowest in the north. This kind of space distribution of natural water resources renewability is depended on the space distribution law of the precipitation , evaporation and underlying surface of Jin river basin , such as soil and vegetation in the river basin.

Key words : water resources renewability ; GRID ; Jin river basin ; Renew rate of water resources