城市水资源需求场理论及应用初探

陈似蓝^①, 刘家宏^{①②*}, 王浩^{①②}

① 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;

② 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100044

* 联系人, E-mail: liujh@iwhr.com

2016-01-15 收稿, 2016-03-23 修回, 2016-03-23 接受, 2016-04-06 网络版发表

国家自然科学基金(51279208)和国家自然科学基金优秀青年科学基金(51522907)资助

摘要 随着人类社会的发展进步及城市化进程的加快, 人类活动对水资源的需求日益增加. 水循环也从最初的自然水循环演变成“自然-社会”二元水循环. 二元水循环理论的提出, 为水文水资源学科的发展指明了新方向. 迄今为止仍然没有统一的数理公式对二元水循环过程进行精确描述. 本研究以城市为重点, 深入剖析了社会经济用水需求对水循环的干扰和驱动原理, 通过类比物理学中的麦克斯韦方程组, 初步定义了城市水资源需求场——“水场”的概念, 提出了城市“水场”强度的计算公式. 以海河流域22个主要城市为例, 应用水场强度计算公式定量描述了海河流域的水场强度, 分析了水资源的流动趋势. 结果表明, 水场强度公式能够较好地描述城市水资源的驱动力和流动趋势.

关键词 二元水循环, 城市水资源需求场, 水场理论, 场强公式, 海河流域

水资源是人类赖以生存的自然资源. 从人类起源至今, 水资源在社会发展, 人类的各类生产生活中起到了至关重要的作用. 人类社会的发展至今, 随着气候不断变化, 人类活动不断增强, 水资源短缺问题日益突出, 在一些地区水量不能保证, 水质急剧恶化. 随着城市化进程的加快, 城市需水量不断增加, 自然水循环提供给城市的水资源已经远远不够. 因此, 城市通过各种方式的供水和调水工程, 将水资源运送到城市中, 供城市生产生活所需. 水循环由最初的仅受自然因素影响的自然水循环, 发展到现如今受社会因素和自然因素协同影响驱动的二元水循环. 人类活动对水循环影响的研究已经相继开展, 引起了广泛关注^[1-3]. “自然-社会”二元水循环理论自1999年提出以来, 在水资源评价中得到广泛应用. 2010, 贾仰文等人^[4]开发了海河流域二元水循环系统模拟模型. 大规模人类活动影响了天然水循环在大气、地

表、土壤和地下的各个过程, 致使当前环境下的水循环呈现“自然-社会”二元特性^[5,6]. 二元水循环理论体系已经基本建立完善^[7,8], 具体描述了循环驱动力的二元化, 循环结构的二元化以及水资源服务功能的二元化. 二元水循环理论强调了自然水循环的分离、耦合和模拟, 对人工干扰因素的表达式采用统计学的方法. 目前二元水循环理论尚缺乏关键性的数学控制方程来刻画人类活动对水循环的影响. 特别是在二元驱动力的描述上, 驱动力的二元化体现在: (1) 自然状态下的重力作用、太阳辐射能、地球自转与公转, 以及毛细作用等; (2) 在人类经济系统中, 经济梯度和人口梯度, 以及与人类社会经济运行相关的驱动机制, 包括公平机制、效益机制、效率机制和国家机制等. 在对驱动力的描述上, 由于缺乏数学基础公式, 在应用上遇到困难, 无法定量分析驱动力. 本研究通过物理学中对电场描述方法的类比研究, 提

引用格式: 陈似蓝, 刘家宏, 王浩. 城市水资源需求场理论及应用初探. 科学通报, 2016, 61: 1428–1435

Chen S L, Liu J H, Wang H. Initial research on the theory and application of urban water demand field (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1428–1435, doi: 10.1360/N972016-00058

出了城市水资源需求场理论,建立了二元水循环的“水场”及其场强计算公式.并以海河流域的22个主要城市为例计算了城市的“水荷”大小,定量模拟了海河流域城市水资源需求场的分布、等势线等,科学描述了海河流域水资源在城市需求场中的受力情况,其结果与实际情况基本符合,初步印证该理论的科学性和实践价值.

1 水资源的受力分析

1.1 水资源在自然重力场中的受力

在自然流域中,水资源的流动受到太阳辐射、地球自转公转等影响,其中主要受重力场的驱使,由地势高的地方流向地势低的地方,即“水往低处流”.在天然无人工驱动力附加的情况下,流域中的水循环为一元水循环,即仅仅受自然力的作用.

因此,在一元的自然重力场中,坡面上体积为 Q 的水资源收到重力作用下的驱动力方向指向地球球心,其大小为

$$F_G = \rho g Q \sin \theta, \quad (1)$$

其中, F_G 为水资源所受到的重力在坡面方向上的分力; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; Q 为水的体积; θ 为坡度.

单位体积的水资源在重力场中受到的重力作用的大小即可表示为重力场的场强大小,如下:

$$E_G = \rho g \sin \theta. \quad (2)$$

重力场强的量纲可以表示为

$$\frac{M}{L^3} \cdot \frac{L}{T^2} = ML^{-2}T^{-2}. \quad (3)$$

1.2 水资源在社会经济需求场中的受力

随着人类社会的发展进步,以及城市化进程的加快.水资源不仅仅只受到自然条件下重力的作用,同时,人类生活的城市也会对水资源施加作用力.例如,当城市用水不足时,会通过引水、调水工程将外部的水调用到城市内,供城市的生产生活使用.这些人类活动的干预,影响了自然水循环的过程,使得水资源的流通、分配规律发生变化.水资源有可能不再如在自然重力场里那样运动.当需求驱动力对水资源的影响足够大,比重力作用的影响还大时,水资源有可能会沿着重力场作用的反方向运动.例如处于地势高处的城市由于用水需要,将处于地势低处的

水资源通过泵站等形式提升,克服了重力作用.这样,水资源则从原本的自然一元水循环转变为“自然-社会”二元水循环.

城市对水资源的需求,可以类比成一个向外界吸引水资源的场.当该城市的需水量越大,为满足城市自身的生产生活运转,则其会从各种可能的途径获取水资源,相当于对外部水资源的吸引力就越大.通过人工的一些途径、方式水资源会被吸引进入到城市.这样城市在社会经济用水需求的驱使下对城市外部的的水资源就形成了需水场.

当一个城市存在需水场时,它对周边水资源的吸引力是一定的,只能影响、获取一定范围内的水资源.而当一个地区的城市都处于需水状态,它们所形成的需水场相互叠加之后,会对更远距离的水资源产生吸引力,驱动水资源向该城市群运送,典型的例子就是“南水北调”工程.由于京津冀城市群急缺水资源,对水资源的需求量大,产生的需水场对南方的水资源产生吸引力.通过修建“南水北调”输水工程,水资源被运送到京津冀地区的缺水城市.

2 水场的定义

在物理学研究中,电磁场理论在建立过程中促进了第二次技术革命,提高了当时的生产效率,使人类对于电与磁有更深层次的认识.电磁场理论的创建人——麦克斯韦在经过了大量研究之后,在1856年发表了第一篇电磁学理论的文章《论法拉第力线》,推导出了库仑定律和高斯定律^[9].1862年他发表了第二篇论文《论物理力线》,该论文扩充到磁场变化产生电场,电场变化产生磁场^[10].1864年发表的论文《电磁场的动力学理论》建立了系统的电磁场理论.在本篇论文中,他全面阐述了电磁场的含义,他指出:“电磁场是包含和围绕着处于电或磁状态的物体的那部分空间,它可能充有任何一种物质”^[11].

我们所研究的城市水资源需求场,可以与电场进行类比研究.因此,从物理上抽象,一定区域内的每一个城市由于自身的需水情况,会产生不同的需水场.类比电场的形成,建立“水场”的概念.电荷在空间中会形成电场,与形成电场直接相关的就是电荷的电荷量 Q ,同样地,每个城市的水资源需求量用 Q 表示,称为城市的“水荷”.城市的需水情况用“水荷”来描述,“水荷”是城市的基本属性,与城市的人口、经济发展等因素有关.“水荷”越大,代表城市的

需水量越大,进而对周边的需水强度就越大.如图1,将点电荷电场与“水荷”水场进行类比.城市的“水荷”相当于负点电荷,对周围的水场产生吸引力.

麦克斯韦方程组的高斯定律描述了电荷如何产生电场:

$$\int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

式中, E 表示电场强度, S 表示空间表面, q 表示电荷量, ϵ_0 表示介电常数. 该式表示了电场强度在任意封闭曲面上的面积分与封闭曲面所包围的电荷量成正比.

方程的左边就是通过闭合曲面 S 的电通量(电场线的数量)的数学描述,而公式的右边则是曲面包围的电荷总量除以真空电容率. 因此,在一个真实的或者想象的任意大小和形状的闭合曲面空间内,若曲面内部没有电荷,那么通过该曲面的电通量为零. 若在曲面中存在一个正电荷,那么通过曲面的电通量为正,反之,若在曲面中再放入一个等电荷量的负电荷,那么通过该曲面的电通量为零^[12].

在电场的定义中,单位电场是指单位电荷施加在单位带电物体上的电排斥力. 电场可以由如下公式定义:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}e}{q}, \quad (5)$$

$\mathbf{E}$ 是矢量,大小正比于电场力,方向为正点电荷的受力方向.

由电场的库仑定律:

$$E = \frac{kq}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (6)$$

其中 E 为电场强度, q 为电荷的大小; r 为该点与电荷的距离; ϵ_0 为真空中的介电常数.

电场描述的是一个三维的概念. 而由于城市的需水对水资源的作用力主要体现在平面上,故本文定义的“水场”是一个二维的场. 类比麦克斯韦方程

进行水场的推导. 水场强度在任意闭合曲线上的线积分与闭合曲线所包围的水荷量成正比. 由

$$\int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{Q}{\epsilon_w}, \text{ 得到 } E_w \cdot 2\pi r = \frac{Q}{\epsilon_w}, \text{ 则}$$

$$E_w = \frac{Q}{2\pi r \epsilon_w} = \frac{k_w Q}{r}, \quad (7)$$

其中 E_w 为“水场”中某一点的场强; Q 为“水荷”的大小; r 为该点与“水荷”的距离; ϵ_w 为介水常数; k_w 表示了水场常数, $k_w = \frac{1}{2\pi\epsilon_w}$.

2.1 介水常数

类比电场描述中的介电常数,本文将描述水场的常数 ϵ_w 命名为介水常数. 在电磁学中,真空中的介电常数 ϵ_0 表示了孤立电荷 q 在给定的距离 r 上产生的电场强度的大小. 介质在外加电场的作用下会产生感应电荷而削弱电场. 在电介质中的介电常数为 ϵ , 其与真空中介电常数的比值定义为一个无量纲的相对介电常数 ϵ_r . 相对介电常数表征了电介质束缚电荷能力的强弱. 将介电常数大的材料放在电场中,电场强度会在电介质内明显减小. 介电常数可以表示为温度、湿度、工作频率的函数^[13].

在水场中,城市对周边一定范围内的水资源具有吸引力,当城市外部水资源禀赋较好,且该点与城市间有河流或者输水管道,则周边的水资源便能够被城市吸引过来. 在这种情况下,相当于介水常数较大,城市水资源需求产生的水场在周边区域的场强较小. 反过来,当城市周边水资源条件不好,而且缺乏输水设施将周边的水资源输送到城市中,那么城市用水需求很难得到满足. 在这种情况下,相当于介水常数非常小,导致城市产生的水场在周边区域的场强很大,对更远的水资源也能产生很大的吸引力. 此时,该城市对水资源的吸引力影响范围会扩大,进而吸引更远距离的水资源. 例如,在沙漠中的一个城市,其周围没有可用的水资源,此时城市形成的水场强度非常大,使其能够吸引远距离的水资源;相反地,在南方富水地区的城市周边,介水常数较大,形成的水场强度较小. 另外,如果城市外部某一点的水资源其运送成本很大,水价很高时,城市的水场强度会大大增强,以至于能够吸引到这部分的水资源,此时,介水常数较小. 因此,介水常数随着水资源条件和社会经济条件不同是存在各向异性的. 由于水源

图1 负点电荷(a)与城市水荷(b)

Figure 1 Negative point charge (a) and urban water charge (b)

条件、输水方式、输水难易程度、输水成本等影响因素的存在,介水常数在不同方向上是有所不同的,即呈现各项异性.

为了方便计算,需要确定介水常数的量纲.“水场场强”对水循环的驱动作用在本质上和重力场强是一致的,因此二者的量纲应是相同的,即 $M^3L^{-2}T^{-2}$.而常数 k_w 的量纲未知,通过与重力场强的量纲对比,有

$$ML^{-2}T^{-2} = L^3L^{-1}k_w, \quad (8)$$

$$k_w = ML^{-4}T^{-2}, \quad (9)$$

由于 $k_w = \frac{1}{2\pi\epsilon_w}$,故介水常数 ϵ_w 的量纲应为 $M^{-1}L^4T^2$.

为了计算重力场场强的数量级,将式(2)重力场场强的大小 $E_G = \rho g \sin \theta$ 代入具体数值, ρ 为 10^3 kg/m^3 ; g 为 9.8 m/s^2 ; $\sin \theta$ 取当量值0.1,则重力场场强 E_G 的大致量级为 10^3 .

为确定介水常数的大小,假设在距离水荷100 km处的水场强度与重力场强度为相同数量级(城市水资源需求场的有效作用距离假定为100 km),即

$$E_w = \frac{Q}{2\pi r \epsilon_w} = \frac{k_w Q}{r} \text{ 在 } r \text{ 为 } 10^5 \text{ m 处的数量级为 } 10^3. \text{ 因此,}$$

表示水资源在此处不再是只受重力主导,人工需水场的场强与重力场的场强达到相同的数量级,人工需水场对该处以近的水资源产生了显著的吸引力.

参照海河流域城市的年用水量数据,年用水量的量级约为 $10^7 \sim 10^8 \text{ m}^3$,将城市的年用水量作为城市的“水荷”大小,则 Q 的量级为 $10^7 \sim 10^8$.于是可得 k_w 的数量级为 $10^0 \sim 10^1$,进而可得 ϵ_w 的数量级为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$.

2.2 水场中的场强计算

(i) 单点水荷水场中场强计算. 建立水场的

坐标系,对于水场中的点 $A(x, y)$,只受到点水荷 $Q_1(x_1, y_1)$ 形成的水场影响.根据水场的场强计算公式(7),A点在单一水荷产生的水场中受到的场强的大小为

$$|E_A| = \frac{k_w Q_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}}. \quad (10)$$

以图2(a)所示 x 轴及 y 轴正方向,受到的场强的矢量表达式为

$$|E_A| = \frac{k_w Q_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} [(x-x_1)i + (y-y_1)j]. \quad (11)$$

(ii) 两个点水荷水场中场强计算. 水场中的点 $A(x, y)$,A点在点水荷 $Q_1(x_1, y_1)$ 和点水荷 $Q_2(x_2, y_2)$ 形成的水场中既受到 Q_1 的场强影响,同时也受到 Q_2 的场强影响,场强是两个场强的矢量叠加.根据水场的场强计算公式,A点在两个点水荷产生的水场中受到的场强为

$$|E_A| = \frac{k_w Q_1}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} [(x-x_1)i + (y-y_1)j] + \frac{k_w Q_2}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} [(x-x_2)i + (y-y_2)j], \quad (12)$$

根据向量方向整理得到

$$|E_A| = \left[\frac{k_w Q_1 (x-x_1)}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} + \frac{k_w Q_2 (x-x_2)}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \right] i + \left[\frac{k_w Q_1 (y-y_1)}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} + \frac{k_w Q_2 (y-y_2)}{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \right] j. \quad (13)$$

(iii) n 个点水荷水场中场强计算. 当点A处在 n 个点水荷的水场中,其受到的场强为 n 个点水荷在A点场强的叠加.

图2 (a) 单点水荷水场; (b) 两个点水荷的水场

Figure 2 (a) Water field of single point water charge; (b) water field of two point charges

$$E_A = k_w \sum_{h=1}^n \left[\frac{Q_h(x-x_h)}{(x-x_h)^2 + (y-y_h)^2} i + \frac{Q_h(y-y_h)}{(x-x_h)^2 + (y-y_h)^2} j \right]. \quad (14)$$

3 海河流域主要城市水资源需求场叠加计算

为了具体研究城市水资源需求场强度, 本文选取海河流域的地级及以上城市(北京, 天津, 石家庄, 张家口, 承德, 唐山, 廊坊, 大同, 保定, 沧州, 忻州, 衡水, 阳泉, 德州, 邢台, 邯郸, 聊城, 长治, 安阳, 鹤壁, 焦作, 新乡)进行水场强度计算, 进而模拟水资源的流向趋势(图3).

3.1 海河流域主要城市“水荷”

海河流域主要城市“水荷” Q 大小的确定本文采用各城市的实际用水量表示. 因为城市用水的保障率最高, 其用水量基本和需求量相等. 根据水资源公报的统计数据, 得到海河流域10个城市的2000~2013年均用水量数据, 则各城市的“水荷” Q 的大小如图4所示.

由图4可以看出, 北京市的城市“水荷”最大, 是城市“水荷”第二大的天津市的两倍. 将各个城市的需求情况抽象成需求水场的概念, 作图表示, 如图5. 可

图4 海河流域主要城市“水荷”

Figure 4 Water charges of major cities in Haihe River Basin

以看出, 各个城市的水场在一定程度上存在叠加. 说明当流域范围内的一部分城市群同时处于需水状态, 那么对外界水资源的需水场场强就会叠加后增大.

3.2 海河流域水场强度计算

(i) 海河流域平面坐标化. 在海河流域上建立平面坐标系, 如图6所示. 图6中每个单元格表示60 km×60 km 的流域面积. 正东方向为x轴的正方向, 正北方向为y轴的正方向. 同时确定22个主要城市的坐标, 表示为22个点水荷.

(ii) 海河流域水场强度程序计算. 根据公式(14), 编写流域网格点水场强度计算程序. 以每个网格点的中心点代表整个网格所受到的叠加水场强度.

图3 海河流域主要城市分布图

Figure 3 Distribution of major cities in Haihe River Basin

图5 (网络版彩色)海河流域城市水资源需求场

Figure 5 (Color online) Urban water demand field in Haihe River Basin

图6 海河流域坐标系
Figure 6 Coordinate system of Haihe River Basin

计算程序的输入为各个城市水荷点的坐标, 及各个城市的水荷大小 Q 以及所计算的网格中心点坐标. 程序的输出为每个网格点受到的叠加水场强度的大小和方向. 本次计算暂不考虑介水常数的各向异性, 介水常数统一取值为0.1. 将计算结果运用Origin作图软件作流域的水资源场强等势图以及水场分布图, 如图7(a)和(b). 由图7(a)可以看出, 城市水荷越大的城市, 水场强度越大. 同时, 城市水资源需求场相互叠加, 形成区域的水场. 例如, 北京、廊坊、天津、沧

州形成了城市群, 在这四个城市周边场强最大. 图7(b)中, 箭头表示的是水资源的流动方向. 由图7(b)可以看出, 水资源大体呈现向城市流动的趋势, 即可以抽象为是城市由于需水, 将水资源从周边地区吸引过来.

为提高精度, 将海河流域的坐标划分细化成 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 的坐标系, 采用同样方法计算得到海河流域水场分布图, 如图8所示.

由图8可以看出, 水资源流动的方向集中向城市. 在城市水资源需求场的影响下, 水资源受到城市水资源需求场的作用力, 存在向城市流动的趋势. 在城市所在位置, 箭头集中指向城市点. 流域边缘的水流也指向流域内部. 但是, 仍然有一些箭头方向较不合理, 主要原因可能与网格点的空间分辨精度有关, 还与介水常数的空间变异性相关, 另外一些城市的水荷过大, 对远距离的水资源存在一定影响. 从总体上来看, 在水场作用下, 水资源的流动趋势具有一定的规律性, 且基本符合现实中的水循环流动方向.

4 结论与讨论

本文尝试将电场和水场进行类比, 将麦克斯韦方程借鉴到水资源水场的计算中, 提出了水场的场强计算公式. 水场的概念可以较好地描述社会水循环下水资源的运动趋势和规律. 在城市逐渐发展, 城市需水量逐渐增加的背景下, 将城市类比做电场中的点电荷. 点电荷形成电场, 而城市用水需求则形成水场. 点电荷的电场能过相互叠加, 产生的电场强度也相互叠加. 同理, 一定区域范围内, 临近的几个城

图7 (网络版彩色)(a) 海河流域水场强度等势图; (b) 海河流域水场分布图(60 km $\times$ 60 km)
Figure 7 (Color online) (a) Contour map of water field intensity in Haihe River Basin; (b) distribution of water field in Haihe River Basin(60 km $\times$ 60 km)

图8 海河流域水场分布图 10 km×10 km

Figure 8 Distribution of water field in Haihe River Basin 10 km×10 km

市的水场相互叠加,那么,其产生的水场强度亦相互叠加.进而,叠加的水场对周边的作用力就会有所增强.在水场强度公式的类比构建过程中,目前假设水场强度在一个平面上作用,故水场可以看作是一个二维的向量场.同样地,在电场场强的计算中,有一个非常重要的参数——介电常数,那么在水场中,本文定义了水场的“介水常数”.介水常数在空间中呈

现各向异性.

通过海河流域的初步应用,可以看出,通过水场的分布,能够较准确、有效地描述社会水循环中的水资源流动趋势和方向.同时,通过水场强度的计算公式,能够算出城市的水场强度大小,为研究城市对周围外界水资源的吸引强度.本文的研究成果还是初步的,仅仅是从二元水循环的社会侧驱动力角度来初步探究其基本的数学公式.在海河流域初步应用中,对介水常数做了各向同性的假设,对各点水场强度的大小还没有结合当地水资源和工程条件、水循环流动通量等进行深入的分析.另外,通过类比物理学中麦克斯韦方程组对于电场的描述的高斯定律,本文定义了水场及其强度计算公式.那么对于麦克斯韦方程组另外三个方程,关于二元水循环的研究仍可以进行类比研究,以期定量刻画水资源需求场、供给场(水循环流动场)以及二者的相互作用关系.科学的逻辑启示我们水资源的需求场会“感生”供给场,供给场的变化又带来需求场的变化,二者是相互隐式耦合的关系,需要用偏微分方程来定量表达.进一步的研究将通过水资源需求场的实证研究确定不同水资源和社会经济条件下的介水常数等关键参数,完善水资源需求场理论.

参考文献

- 1 Wang H, Wang J H, Qin D Y, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model (in Chinese). *J Hydr Eng*, 2006, 37: 1496–1502 [王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法. 水利学报, 2006, 37: 1496–1502]
- 2 Ali U K, Ayhan E, Sukriye O. Possible impacts of climate change on soil moisture availability in the southeast anatolia development project region (GAP): An analysis from an agricultural drought perspective. *Clim Change*, 1998, 40: 3–4
- 3 Wiberg D A, Kenneth M. The impact of climate change on regional surface water supply from reservoirs storage in China. In: *Proceedings of the 1st International Yellow River Forum on River Basin management*. 2003. 21–23
- 4 Jia Y W, Wang H, Zhou Z H, et al. Development and application of dualistic water cycle model in Haihe River Basin. I Model development and validation (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2010, 21: 1–8 [贾仰文, 王浩, 周祖昊, 等. 海河流域二元水循环模型开发及其应用——I. 模型开发与验证. 水科学进展, 2010, 21: 1–8]
- 5 Wang H, Chen M J, Qin D Y, et al. *Research on Northwest Water Allocation and Carrying Capacity* (in Chinese). Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003 [王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2003]
- 6 Wang J H, Jiang D. *Inversion Study of the Yellow River Basin Binary Water Cycle Factors* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2005 [王建华, 江东. 黄河流域二元水循环要素反演研究. 北京: 科学出版社, 2005]
- 7 Liu J H, Qin D Y, Wang H, et al. Dualistic water cycle pattern and its evolution in Haihe River Basin. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1688–1697
- 8 Qin D Y, Lu C Y, Liu J H, et al. Theoretical framework of dualistic nature-social water cycle. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 810–820
- 9 Tong H. Establish classical electromagnetic theory system (in Chinese). *Silicon Valley*, 2011, 22: 39–39 [佟华. 经典电磁场理论体系的建立. 硅谷, 2011, 22: 39–39]
- 10 Niven W D. *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press, 1890
- 11 Forbes N, Mahon B. Faraday, Maxwell, and the Electromagnetic Field: How Two Men Revolutionized Physics. *Weekly*, 2014
- 12 Daniel F. *Maxwell's Equations* (in Chinese). Beijing: Mechanical Engineering Press, 2013 [Daniel F. 麦克斯韦方程直观. 唐璐, 刘波峰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2013]
- 13 Wu Y S, Yu L Y. Research on the concept of dielectric constant (in Chinese). *Modern Electron Technol*, 2007, 30: 177–179 [武岳山, 于利亚. 介电常数的概念研究. 现代电子技术, 2007, 30: 177–179]

Initial research on the theory and application of urban water demand field

CHEN SiLan¹, LIU JiaHong^{1,2} & WANG Hao^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

² Engineering and Technology Research Center for Water resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100044, China

With the rapid development and progress and the urbanization of human society, the demand for water of human activity is increasing. In the development of human society, with the climate changing and human activities increasing, water shortages have become increasingly prominent. The amount of water in some areas cannot be guaranteed, as well as a sharp deterioration in water quality. With the acceleration of urbanization, urban water demand is increasing. The water resources in the natural water cycle which are supplied for the city are not enough. Thus, in various urban water supply and water diversion projects, water is transported to the city, with the purpose of supplying water for the city production and life. Water cycle has also evolved from the original natural water cycle to dualistic nature-social water cycle. The dualistic water cycle theory indicates a new direction for the development of hydrology and water resources disciplines. So far there is still no uniform mathematical formula that can accurately describe the dualistic water cycle. In this study, we try to explore the mathematical and physical foundation of dualistic water cycle. We focused on the cities and did the in-depth analysis of the interference and driving principle of the socio-economic water demand on the water cycle. By analogy in physics Maxwell equations, the urban water demand field-the concept of “water field” was preliminary defined. According to the concept of electric charge, we define the “water charge” as the water requirement intensity. In the progressive development of the city, the city is in the analogy of a point electric charge in electric field. The electric field is formed by the point electric charge, while the water demand field is formed by the urban water demand. Point charge electric field can be superimposed over each other, so the electric field strength is also superimposed. Also, the water field strength of each cities which are close can be superimposed, and the city group will attract the water resources more far from their location, for example, the South-North water conversion project. And the formulas for calculating the city “water field” intensity were proposed. We also defined the constant in the formulas. This study took 22 major cities in the Haihe River Basin as an example, the water demands of every city are consider the city “water charge”. And the Haihe River Basin water field strength was quantitative described by applying the water field strength calculation formulas, and the trends in water flow were analyzed. The results showed that the water field strength formulas can describe the driving force and the mobility trend of urban water resources. Through the preliminary application, with the distribution of water field, the water cycle of social trends and the direction of water flow in the Haihe River Basin can be more accurately and effectively described. Meanwhile, using the field strength calculation formulas, the water field strength of city can be calculated, which represents the attracting strength of the city for the water resources around the city.

dualistic water cycle, urban water demand field, water field theory, field strength calculation formulas, Haihe River Basin

doi: 10.1360/N972016-00058