

基于系统动力学的北方大型灌区生态环境需水量研究

刘占宝¹, 魏晓妹¹, 张艳妮¹, 白静²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 河北工程大学水电学院, 河北 邯郸 056021)

摘要: 通过生态灌区理论,界定了灌区生态环境需水量的定义,明确了北方大型灌区生态环境需水量内涵。运用系统动力学原理,构建了灌区生态环境需水量系统动力学(SD)模型,并以陕西省宝鸡峡灌区为例,模拟计算了2005~2030年的灌区生态环境需水量。模拟结果表明,宝鸡峡灌区生态环境需水量每年以6.08%的速度增长,河流、植被、塘库、城镇4个模块的生态环境需水量都有较好的提高,促进灌区朝着生态灌区方向快速发展。

关键词: 生态灌区;生态环境需水量;系统动力学(SD)

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)01-0021-06

大型灌区是我国商品粮、棉、油的重要基地,在保障国家粮食安全、保护生态环境、发展区域经济、建设现代农业等方面起到了至关重要的作用^[1]。长期以来由于灌区建设受到经济、技术、资源等条件的限制,存在着重工程建设和经济效益,轻灌区生态环境的倾向^[2]。全球气候变暖、经济社会的快速发展、人口的持续增长、对生态环境需水关注不足,造成了灌区内生态系统结构和功能的下降。如何在可持续发展态势下,推进建设和管理生态灌区,保证大型灌区生态环境需水量将成为当前相关研究领域的关注热点。

1 生态灌区

当前,占全国大型灌区总数62.7%、现状有效灌溉面积占全国现状65.4%的北方大型灌区,在传统操作模式下,由于只注重灌区工程建设、多引水、多浇地、提高水的利用效率、提高作物产量等经济目标,再加上北方灌区水资源供需矛盾突出,诱发了严重的生态环境问题。主要表现在以下三方面。(1)地表水引用过大,导致进入天然河道的水量减少甚至干涸;地表水灌溉水量过大,导致地下水补排失调、地下水位大幅度上升,加剧了灌区耕地渍涝盐碱化;灌区渠道防渗比例小,田间灌溉定额大,排水系统不健全,地面蒸发强烈,又导致灌区地下水位抬升,引发大面积土壤次生盐渍化。(2)地下水大量开采,造成不同程度地下水位下降,河北中南部平原地区地下水位平均每年下降1~1.5 m,机井井深从二三十米发展到三四百米;地下水位下降对北方地区以吸收土壤水和潜水赖以生存的植被系统构成极

大威胁,催发了土壤含水量减少、植被衰退、土地沙化和农作物减产;(3)在传统灌溉和耕作方式下农田中施用的化肥、农药大量流失增加了水体的营养程度,加速了水体的富营养化,不仅降低了水体的纳污能力,而且使其他动植物受到毒害,生长不良以致死亡,破坏了生物多样性和生态系统的稳定性。

灌区良好的生态环境是灌区生产力发展的基础,生态优先原则要求灌区在制定发展规划时要充分论证其对生态环境的影响,充分考虑生态环境的承受能力,防止由建设和开发活动引起生态环境的破坏。因此,调整灌区建设的发展理念,探索出以灌区生产力和生态环境并重为核心的灌区建设新模式——生态灌区^[3]显得尤为重要。生态灌区是指具有很高的生产力、健全的灌排功能、合理的水资源配置的基础上同时具备良好生态环境的灌区,是现代化灌区发展的高级阶段^[4]。生态灌区追求的是生态与经济的双赢目标,使经济与生态形成合理、高效的生态经济良性循环,实现可持续发展,为人类提供一个良好的生产和生活环境。生态灌区是具有比自然生态系统有更高生产力的“水-生态-社会经济”复合生态系统。为提高灌区生态功能,必须坚持生态优先的原则,依据生态学理论确定反映灌区生态系统健康的灌区生态环境需水量。

2 灌区生态环境需水量

国外关于生态环境需水量的研究起源于20世纪40年代,直到1998年,Gleick才明确提出生态环境需水量就是保证恢复和维持生态系统健康发展所需的水量^[5]。20世纪90年代后期,国家“九五”科

收稿日期:2009-06-29

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAD11B05);国家自然科学基金(50879071)

作者简介:刘占宝(1982—),男,河北肃宁人,硕士研究生,主要研究方向为水资源管理与利用。E-mail: zhanbaoliu@163.com。

通讯作者:魏晓妹(1957—),甘肃甘谷人,教授,博士生导师,主要从事水资源利用与管理方向的教学及科研工作。

技攻关项目“西北地区水资源合理利用与生态环境保护”的实施,代表了我国生态环境用水研究的开始^[6]。当前国内对生态环境需水量的研究大多为相对缺水地区(如西北地区)^[7,8]、河流^[9,10]、湖泊湿地^[11,12]、城市^[13,14]等,而针对灌区的研究还不多见。近年来,我国学者在表述各类生态系统需水时,相继采用了生态需水、生态用水、环境需水、环境用水、生态环境需水、生态环境用水等术语。在本次研究中,鉴于灌区的研究对象既要考虑生物群落,又要考虑无机环境,依据文献^[15]、^[16]的建议,采用生态环境需水量的术语。

生态环境需水量的概念还没有形成统一,但公认广义上是指维持全球生物地理生态系统水分平衡所需的水,包括水热平衡、生物平衡、水盐平衡、水沙平衡等;狭义上是指维持生态环境不再恶化并逐渐改善所需消耗的水资源总量^[17]。本研究中依据文献^[15]确定灌区生态环境需水量定义为“维系灌区生态系统健康所需的水量”。由此定义可知,在进行灌区生态环境需水量研究时,至少应包括以下几方面内容:(1) 维护天然植被所需水量,如天然林地、草地、生态防护林、退耕还林(草)等;(2) 保护河流正常存在及功能发挥而常年保持的基流量;(3) 水库塘坝等较为敏感功能区所需水量;(4) 保障城镇生态环境所需水量。

3 基于系统动力学(SD)的灌区生态环境需水量模型

灌区作为一个以人为主体的典型人工生态系统,不同于区域、流域的复杂生态系统,其受人类干扰和主观意识的影响程度非常高。随着社会发展进程加快,灌区的产业结构、用水结构、耕地面积、种植结构、灌溉用水水平在不断地发生着变化,这些变化相应地影响着灌区生态环境需水量的变化。灌区生态环境需水量的研究关系到生态灌区发展的潜力和社会生活的质量。当前有关生态环境需水量模型的研究很多,有基于水循环的耦合模型^[18,19]、优化配置模型^[20,21]、整合计算模型^[22]等,这些研究不仅侧重于静态的需水总量计算,缺乏科学的定性定量分析相结合的动态预测,而且其模型建立繁琐、计算操作过程复杂不适宜广泛应用到当前北方大型灌区规划管理之中。

本次研究采用系统动力学方法来直观描述灌区生态环境需水各子系统之间的因果关系,通过 Vensim PLE 软件构建模型,进行仿真和计算,掌握灌区生态系统的现状与未来需水动态行为,以便为灌区

的规划建设提供直观、有效、快捷的基础数据资料。

3.1 系统动力学

系统动力学(System dynamics,以下简称 SD)由美国麻省理工学院 Forrester J W 教授于 1956 年始创,并于 1972 年正式提出。随后,系统动力学应用范围日益扩大,几乎遍及各个领域,尤其在国土规划、城市经济发展、环境保护、企业经营管理和工程系统等方面逐渐形成了比较成熟的学科。系统动力学方法强调系统的联系、发展与运动的观点,以开放的社会系统为研究对象,能够容纳大量变量,并以定性分析为先导,以定量分析为支持达到定性定量分析的结合与统一。

3.2 系统动力学特点

系统动力学作为一种仿真技术具有以下特点^[23]:(1) 能够容纳大量变量,适合大系统研究的需要;(2) 描述清楚,模型具有很好的透明性;(3) 模型可以反复运行,模型所含因素和规模可不断扩展,能起到实际系统实验室的作用;(4) 系统动力学通过模型进行仿真计算的结果,可用来预测未来一定时期各种变量随时间而变化的曲线和数值的变化情况。

3.3 生态环境需水量系统动力学模型构建

研究中将系统的边界定义为灌区的区域边界,整个系统分为社会经济子系统和生态环境子系统。在生态环境子系统中,按生态系统类型的不同对灌区生态环境进行分类,植被生态环境需水量、河流生态环境需水量、园林绿化生态环境需水量。相应地,模型包括植被生态环境需水子模块、河流生态环境需水子模块和园林绿化生态环境需水子模块。在社会经济子系统中,主要考虑人口数量和人均 GDP 对生态环境需水的影响。参照文献^[24]构建灌区生态环境需水量系统动力学模型基本流程图(图 1),其各变量含义见表 1。

3.3.1 生态环境子系统模块 由于在灌区规划设计中将农业需水量作为重要因素,在此不将农田生态环境需水量计算入内。(1) 植被生态环境需水子模块。在植被生态环境系统中,蒸散发是其水分输出的主要形式,因此本文中选取蒸散发为维持灌区植被健康所必需的水分。在计算中,将防护林面积、灌区耕地面积作为流率变量,灌区耕地缩减率与防护林面积增长率作为辅助变量。灌区耕地缩减面积方面以退耕还草与城市建设用地为变量反映灌区农业结构调整与城市化进程表征社会经济发展水平。(2) 河流生态环境需水子模块。河流生态环境需水由河流基流量、河道输沙需水量、渗漏损失量和蒸发

损失量 4 部分组成。河流基流量采用最小月平均流量法,即采用河流最小月平均实测径流量的多年平均值。(3) 塘库生态环境需水子模块。在灌区塘库生态系统中,蒸发和渗漏是塘库水分输出的主要部分。(4) 城市生态环境需水子模块。城市生态环境

需水以城镇园林绿化生态环境需水为主,主要指公园、街道、工厂企业绿化美化所需的水量,居民绿化用水往往包括在生活用水中,未予考虑。灌区生态环境子系统各子模块主要变量及其计算内容见表 2。

表 2 灌区生态环境子系统计算表

Table 2 Calculation of the environmental subsystem of an irrigation district

变量 Variable	计算内容 Content of the calculation	变量 Variable	计算内容 Content of the calculation
SFHL	INTEG(FHLBH + SFHL, SFHLCS)	WHLZF	(WHLZFS - WDNJS) × SHD
WLD SH	SLD × WLDZSF	WTKSL	VTKST × PTKSL
SGQGD	INTEG(SGQGD BH + SGQGD, SGQGD CS)	WTKZFS	(WTKZF - WDNJS) × STK
STGHC	SGQGD × PTGHC	SCZRJLH	6.7766 × LN(GDPRJ/7.9) - 44.388 ^[25]
WCDSH	WCDZSF × SCD	SYLLH	NCZRK × SCZRJLH
WHDSS	WSYLS/(SYLSL - WCY)	WCZYLSH	SYLLH × WYLZS
WHDSL	VHS × PHDSL		

3.3.2 社会经济子系统 社会经济子系统主要有灌区人口总数量、国内生产总值、人均国内生产总值和城镇化率 4 个主要变量,其计算见表 3。

表 3 灌区社会经济子系统计算

Table 3 Calculation of the social subsystem of an irrigation district

变量 Variable	计算内容 Content of the calculation
PCZH	4.563 × LN(GDPRJ/7.9) - 6.162
NCZRK	NGQRK × PCZH
GDPRJ	GDP/NGQRK

3.4 模型检验

在完成灌区生态环境需水量模型构建后,模型的检验是必要的。系统动力学模型的检验可分为 4 组:模型结构的适合性、模型行为的适用性、模型结构与实际系统的一致性以及模型行为与实际系统的一致性检验。在此作者仅将所建灌区生态环境需水量系统动力学模型利用 VENSIM 仿真软件中的“Check Model”和“Units Check”进行模型结构适合性检验,即量纲的一致性、模型界限的适合性检验等,经检验所建立模型结构适合。

4 模型应用

4.1 研究区概况

宝鸡峡灌区位于陕西省关中地区西部,是陕西省目前最大的灌区,也是我国著名的十大灌区之一。灌区是一个多枢纽、引抽并举、渠库结合、长距离输水、建筑物齐全的大型灌排系统,其东西长 181 km,南北平均宽 14 km,最宽处 40 km,总控制面积为

2 355 km²。灌区范围涉及宝鸡、咸阳及西安三市的金台、宝鸡、岐山、眉县、扶风、杨凌、武功、兴平、乾县、礼泉、泾阳、秦都、渭城及高陵等 14 个县(区),97 个乡镇。自灌溉以来,已累计引水 300 亿 m³,累计增产粮食 273 亿 kg,产生的社会效益达 320 亿元,对陕西省农业乃至整个国民经济与社会发展起到举足轻重的作用。

4.2 模型参数的设定

依据 1981~2005 年宝鸡峡灌区统计资料、陕西省水资源公报^①,以 2005 年为基准年,并参照陕西省“十一五”水利发展专项规划^[26]、渭河流域重点治理规划^②、陕西省“十一五”生态建设专项规划^[27]确定灌区生态环境需水量 SD 模型中的各个参数,其中 10 个主要参数的设定见表 4。

4.3 模型仿真结果

通过 SD 模型仿真,得到宝鸡峡灌区生态环境需水量计算结果(表 5)。从表 5 中可以看出,灌区生态环境需水总量逐年增加,由 2005 年的 6 413.7 万 m³,增长到 2010 年的 6 804.4 万 m³,再到 2020 年的 7 128.7 万 m³,最后达到 2030 年的 8 369.3 万 m³,年均增长 78 万 m³ 左右。宝鸡峡灌区水资源总量约为 12.90 亿 m³,生态环境需水量占水资源总量相应地由 4.97% 逐渐增长到 6.49%,年均增长 6.08%。在预测水平年内,不同类型生态环境需水量的大小顺序发生了改变,在 2005~2020 年之间由大到小的顺序为河流生态环境需水量 > 塘库生态环境需水量

① 陕西省水利厅. 陕西省水资源公报. 1981~2005.

② 黄河水利委员会. 渭河流域重点治理规划. 2005.

> 植被生态环境需水量 > 城镇园林生态环境需水量, 而到 2020 年后其顺序改变为河流生态环境需水量 > 植被生态环境需水量 > 塘库生态环境需水量 >

城镇园林生态环境需水量, 表明随着灌区社会经济的进步, 该区正朝着生态灌区方向发展。

表4 灌区生态环境需水 SD 模型参数设定

Table 4 SD model parameter settings of eco-environmental water requirement in an irrigation district

变量 Variable	2005	2010	2020	变量 Variable	2005	2010	2020
PFHLZ(‰)	2.7	2.9	3.2	PRK(‰)	3.2	3.4	3.1
WLDZSF(mm)	48.6	48.6	48.6	PGDP(‰)	15	12	10
PGQGSJ(‰)	13	12	10	SYT(km ²)	6.4	7.2	7.5
PTGHC(‰)	27	29	26	VTKST(×10 ⁴ m ³)	3.42	3.39	3.41
WSDZSF(mm)	168.7	168.7	168.7	WHLZFS(mm)	1110	1110	1110

表5 宝鸡峡灌区生态环境需水量模型仿真计算结果

Table 5 Simulation results of eco-environmental water requirement model in Baojixia irrigation district

变量 Variable	2005	2010	2020	2030
WZBSH(10 ⁴ m ³)	393.5	735.1	1112.4	2259.3
WCZYLSH(10 ⁴ m ³)	335.2	384.2	465.0	536.7
WHLSH(10 ⁴ m ³)	4925.5	4925.5	4749.3	4754.4
WTKSH(10 ⁴ m ³)	759.5	759.5	802.4	818.8
WQOSH(10 ⁴ m ³)	6413.7	6804.4	7128.7	8369.3

5 结论与建议

1) SD 模型方法用于研究灌区生态环境需水量, 可以较好地模拟生态系统的动态行为过程, 解决了以往研究中侧重于静态的需水总量计算而无法达到定量与定性相结合的动态需水量预测。

2) 较好地反映了“水-生态-社会经济”耦合关系, 模拟系统的动态行为。同时, 该模型可以通过调整参数, 应用于其它北方大型灌区, 从而为建设生态灌区提供基础数据。

3) 本文以宝鸡峡灌区为例进行了模拟研究, 结论表明该灌区生态环境需水量每年以 6.08‰ 速度增长, 该区的生态环境正在逐步转好, 该灌区正在朝着生态灌区发展。

参考文献:

- [1] 翟浩辉. 加大灌区改造力度 保障国家粮食安全[J]. 求是, 2004, (6): 31—33.
- [2] 顾斌杰, 王超, 王沛. 生态灌区理念及构建措施初探[J]. 中国农村水利水电, 2005, (12): 7—9.
- [3] 姜开鹏. 建设生态灌区的思考——用生态文明观, 扩展思路, 促进灌区可持续发展[J]. 中国农村水利水电, 2004, 2: 4—7.
- [4] 杨培岭, 李云开, 曾向辉, 等. 生态灌区建设的理论基础及其支撑技术体系研究[J]. 中国水利, 2009, (14): 34—35.
- [5] Gleick P H. Water in crisis: Paths to sustainable water use[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 571—579.
- [6] 赵西宁, 吴普特, 王万忠, 等. 生态环境需水研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 617—622.
- [7] 王芳, 梁瑞驹, 杨晓柳, 等. 中国西北地区生态需水研究(1)——干旱半干旱地区生态需水理论分析[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 1—8.
- [8] 夏军, 郑冬燕, 刘青娥. 西北地区生态环境需水估算的几个问题探讨[J]. 水文, 2002, 22(5): 12—17.
- [9] 钟华平, 刘恒, 耿雷华, 等. 河道内生态需水估算方法及其评述[J]. 水科学进展, 2006, (3): 430—434.
- [10] 王西琴, 张远, 刘昌明. 辽河流域生态需水估算[J]. 地理研究, 2007, 26(26): 23—28.
- [11] 崔宝山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 213—218.
- [12] 刘静铃, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604—609.
- [13] 丁晓, 陈雅聪. 城市生态环境需水量研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (6): 4—7.
- [14] 田英, 杨志峰, 刘静铃, 等. 城市生态环境需水量研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(1): 100—106.
- [15] 马乐宽, 李天宏. 灌区生态环境需水概念与定义的探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(5): 168—173.
- [16] 郝伏勤, 黄锦辉, 李群. 黄河干流生态环境需水研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [17] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [18] 刘武艺, 邵东国, 王乾, 等. 城市河湖生态循环模型与应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(6): 25—29.
- [19] 阳书敏, 邵东国, 沈新平. 南方季节性缺水河流生态环境需水量计算方法[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1341—1346.
- [20] 郭韧, 曹光. 优化分配水资源[J]. 运筹与管理, 2005, 14(5): 89—93.
- [21] 赵薇, 黄介生, 姜海, 等. 面向生态的水资源协调优化配置模型[J]. 水电能源科学, 2006, 24(3): 11—16.
- [22] 刘静铃, 杨志峰, 肖芳, 等. 河流生态基流量整合计算模型[J]. 环境科学, 2005, 25(4): 436—441.
- [23] 汪应洛. 系统工程理论、方法与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.

- [24] 马水亮, 邹春静, 孙 卿, 等. 基于系统动力学的崇明岛生态需水量预测[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 140—144.
- [25] 王开运, 邹春静, 张桂莲, 等. 生态上海建设的理论与实践——生态承载力符合模型系统与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 64.
- [26] 陕西省发展和改革委员会. 陕西省“十一五”水利发展专项规划[EB/OL]. [2006-09-30]. <http://www.sndrc.gov.cn/view.jsp? ID = 3881>.
- [27] 陕西省发展和改革委员会. 陕西省“十一五”生态建设专项规划[EB/OL]. [2006-09-30]. <http://www.sndrc.gov.cn/view.jsp? ID = 3884>.

Study on water requirement for eco-environment in the northern large-scale irrigation districts based on system dynamics

LIU Zhan-bao¹, WEI Xiao-mei¹, ZHANG Yan-ni¹, BAI Jing²

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China)

Abstract: Based on the theory of ecological irrigation district, this paper discussed the contents of the northern large-scale irrigation districts' water requirement for eco-environment, and defined it for the maintenance of healthy water requirement for irrigation districts' ecosystem. Using the system dynamics approach, it constructed a system dynamics (SD) model of water requirement for eco-environment of irrigation districts. Taking Baojixia Irrigation District in Shaanxi Province as an example, it also simulated the water demand for its eco-environment from 2005 to 2030. The results show that the water demand for ecological environment in Baojixia irrigation district increases at the rate of 6.08‰ per year. And this irrigated area is developing in the same direction as an eco-irrigation district.

Keywords: ecological irrigation district; water requirement for eco-environment; system dynamics (SD);

(上接第 10 页)

Study on the infiltration model and factors affecting the parameters of stony-soil

YANG Yan-fen¹, WANG Quan-jiu^{1,2}, ZENG Chen², LIU Jian-jun¹, LI Tao¹

(1. Water Resources Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest A & F University, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: Four kinds of rock fragment content and five kinds of particle size were chosen and pure soil was used as control, and 20 groups of one dimensional vertical ponding infiltration experiments and 20 groups of measured saturated hydraulic conductivity experiments were conducted to analyze the effect of rock fragment content on water movement parameters of stony-soil media and the applicability of water movement model. The major findings are as follows: some parameters in Green - Ampt formula, Philip formula and one dimensional vertical algebraic model decrease with the increase of rock fragment content at first, and then increase, and decrease again at last. The applicability of the model is different from rock fragment particle size. When the particle size is between 0.5 ~ 3 cm, one dimensional vertical algebraic model could describe with relative accuracy of the saturated hydraulic conductivity of stony-soil media, and the saturated hydraulic conductivity of stony-soil media described by Green - Ampt formula has higher precision when the particle size is 3 ~ 5 cm.

Keywords: stony-soil media; rock fragment content; water movement parameters; water movement model; applicability of the model