

文章编号: 1672-3317(2025)01-0104-09

基于系统动力学模型的干旱区农业节水潜力计算

徐凯^{1,2}, 岳耀先³, 雷波¹, 杨开静^{1*}, 徐立荣²,
金汉林³, 白明皓¹, 刘慧博¹, 郭宇⁴

(1.中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2.济南大学 水利与环境学院,
济南 250022; 3.四川省都江堰水利发展中心, 成都 611800;
4.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:【目的】利用系统动力学方法评估干旱区农业节水潜力。【方法】考虑荒漠化、水土流失等因素对节水的影响, 选取农业用水量、耕地灌溉面积、灌溉水有效利用系数、粮经比、水土保持率等30个要素, 借助 Vensim PLE 软件绘制系统动力学流程图, 构建了干旱区农业节水潜力计算模型, 以内蒙古地区(不含东四盟市)为例, 对短期规划年(2035年)和长期规划年(2050年)的区域农业节水潜力进行预测。【结果】研究区短期规划年的节水潜力为25.18亿 m³, 长期规划年的节水潜力为29.58亿 m³, 其中巴彦淖尔市的节水潜力最大, 乌海市最小。在节水潜力组成中, 工程节水占比最大, 约为52.83%, 技术节水占比最小, 约为16.91%, 工程节水占比呈逐年增长趋势。【结论】本研究将系统动力学运用到农业节水潜力估算当中, 可为干旱区制定农业节水发展政策提供技术支撑。

关键词: 系统动力学; 农业节水潜力; 干旱区; Vensim 模型

中图分类号: S27

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggjs.2024261

徐凯, 岳耀先, 雷波, 等. 基于系统动力学模型的干旱区农业节水潜力计算[J]. 灌溉排水学报, 2025, 44(1): 104-112.

XU Kai, YUE Yaoxian, LEI Bo, et al. Calculating agricultural water-saving potential in arid areas using system dynamic model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(1): 104-112.

0 引言

【研究意义】水资源匮乏、时空分布不均是我国农业发展的制约因素之一, 农业节水潜力可以反映农业水资源利用效率, 节水潜力的估算和评价是节水农业发展的基础^[1]。【研究进展】关于农业节水潜力的概念较为多元化, 早期研究提出理论节水潜力的概念, 即作物在非充分灌溉条件下的需水量与实际灌溉用水量的差值。裴源生等^[2]以广义水资源理论为基础, 从耗水和取用水的角度探讨农业节水潜力, 认为实施节水措施前、后的耗水量差值是真正的区域节水潜力; 雷波等^[3]提出将减少的无效腾发和流失量作为净节水潜力。农业节水潜力计算最初从单个节水措施角度出发, 偏向于独立节水灌溉技术的效果研究。崔远来等^[4]认为节水潜力计算应考虑灌区、流域等不同尺度转换, 同种方法应用于不同尺度的结果略有不同。许多学者从灌区或省级尺度进行求解^[5], 综合考虑非工程措施和管理措施的影响,

并提出了计算农业灌溉节水潜力的新方法^[6]。有学者总结出各行业针对不同节水方式的节水潜力估算方法^[7], 还有研究者利用改进的 SWAT 模型^[8]、Elman 模型等对灌区节水潜力进行计算分析。朱正全等^[9]考虑了有效降水补给、输水和田间水量损失等因素, 建立了内蒙古河套灌区农业资源型节水潜力计算方法。Umair 等^[10]在我国华北平原进行了冬小麦漫灌、地下滴灌等不同情形下的节水潜力研究; Karimov 等^[11]利用水核算程序对锡尔河流域的上游河谷进行了节水潜力评估。众多学者提出了不同需求、不同尺度下农业节水潜力的求解方法, 深入剖析了不同地域和不同作物的节水潜力。总的来说, 节水潜力的概念和应用方面研究较多, 但一般农业节水潜力研究主要考虑灌溉节水量, 而忽略了渔业、林业、畜牧业等农业相关产业。准确合理的计算农业节水潜力有助于清楚认识区域水资源开发利用态势, 有益于未来农业水资源的科学配置和统筹管理。

【切入点】以往研究仅局限于灌区或流域等单一尺度, 缺少不同层次、不同要素间的交互效应, 系统动力学模型在复杂系统评估方面具有一定优势, 尚待应用于农业节水潜力的模拟和预测。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究利用系统动力学(SD)流程图构建工程、管理、技术等不同子系统之间的关

收稿日期: 2024-06-24 修回日期: 2024-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009142)

作者简介: 徐凯(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事农田水利方面研究。E-mail: 3141469835@qq.com

通信作者: 杨开静(1986—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事农业用水效率方面研究。E-mail: yangkj@iwahr.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

系，结合干旱区农业用水及气候变化特点，借助 Vensim PLE 软件评估农业节水潜力，可为干旱地区节水发展及水资源优化分配提供技术参考。

1 农业节水潜力理论概述

1.1 节水潜力构成

农业节水是通过工程或非工程措施来降低水分损失的过程，由于干旱区具有草原、戈壁、沙漠等独特自然特征，其节水路径与其他地区存在差异。农业节水潜力不仅与用水现状有关，还与节水模式、自然条件、经济发展水平等诸多因素有关^[12]。干旱区畜牧业较为发达，灌溉方式以滴灌、喷灌等高效节水为主，其牧草、青储等饲料作物和棉花、小麦等低耗水作物的种植比例较高，而水稻、蔬菜等需

水量大的作物占比小。

节水潜力是根据现状用水水平与未来节水指标的差值，利用当前发展的实物量指标估算的最大可能节水量。目前农业节水途径主要包含减少田间渗漏量、控制土面蒸发量、降低输水损失量、高效节水灌溉、非常规水利用和政策约束等方面，但区域气候条件变化和农业面源污染等外部因素也制约着农业节水发展。

1.2 农业节水措施效果分析

节水效率与土壤、肥料、作物品种等各项要素密切联系，因而农业节水具备综合特征，主要节水措施分为工程、管理和技术 3 类，不同节水措施的作用机理和效果见表 1。

表 1 不同节水措施的作用机理和节水效果

Tab.1 Mechanism of action and water-saving effect of different water-saving measures

节水类型	节水措施	衡量指标	作用机理	节水效率/%
工程	渠道衬砌	渠系水利用系数	减少输水损失	10~30
	高效节水灌溉	高效节水覆盖率	提高用水效率，减少灌水损失	15~25
	土地平整	田间水利用系数	缩短灌水时间，减少田间渗漏、蒸发	5~10 ^[13]
	水利工程建设	水利工程完好率	提高水资源配置能力	10~20
	回归水利用	回归水利用率	提高水资源利用效率	5~10 ^[14]
管理	灌溉制度优化	农业耗水量、灌溉量	减少用水量和损失量	10~20 ^[15]
	非充分灌溉	亏缺灌溉定额	减少灌溉用水量	20~30
	种植结构调整	粮经比	减少作物耗水量	5~25
	覆盖保湿	地膜覆盖面积、地膜使用量	减少土壤蒸发	5~20 ^[16]
	高标准农田建设	设施配套率、资金落实率	用水精细化	10~15
农业水价综合改革	水价改革普及率	用水计量，激励农户节水	5~10	
技术	抗旱育种	萌发胁迫指数、生物量等	减少水分供应	5~10
	合理密植	单产、棵间蒸发量	优化种植空间，减少水分损失	5~15
	改善水质	化学需氧量、生化需氧量、悬浮物、总氮等	减少水污染	10~20
	非常规水利用	再生水利用率、微咸水利用率	提高水资源利用效率	5~10

2 研究方法

2.1 模型结构

系统动力学（SD）模型可以将系统转化为多重信息的因果反馈机制，经仿真语言和 Vensim 软件模拟实现对真实系统的结构仿真^[17]。在宏观和微观层次上可以对多部门、多层次、非线性的复杂系统进行总体评估，在资源与环境领域广泛应用，由于农业节水潜力的影响因子较复杂，要素间的关系相互交织，系统动力学能够将相互作用的各部分有机联结。

本研究以干旱区为研究对象，时间边界为 2014—2050 年，其中 2014—2023 年为历史年份，

2024—2050 年为模型预测年份，时间步长为 1 a。内容边界包括灌溉、鱼塘、畜牧等相关部分，模拟系统分为工程节水、管理节水和技术节水 3 个子系统，受降水条件、荒漠化等因素约束，各系统相互链接形成复合系统，模型中变量和参数选取以此为基础。

2.2 系统流图

通过子系统分析构建变量间的函数关系，结合西北干旱区实际情况，探究气候变化加剧水资源的不稳定性和区域性缺水的问题，考虑多重因素对节水效果的影响，经反复调整而绘制出干旱区农业节水潜力 SD 模型流图（图 1）。

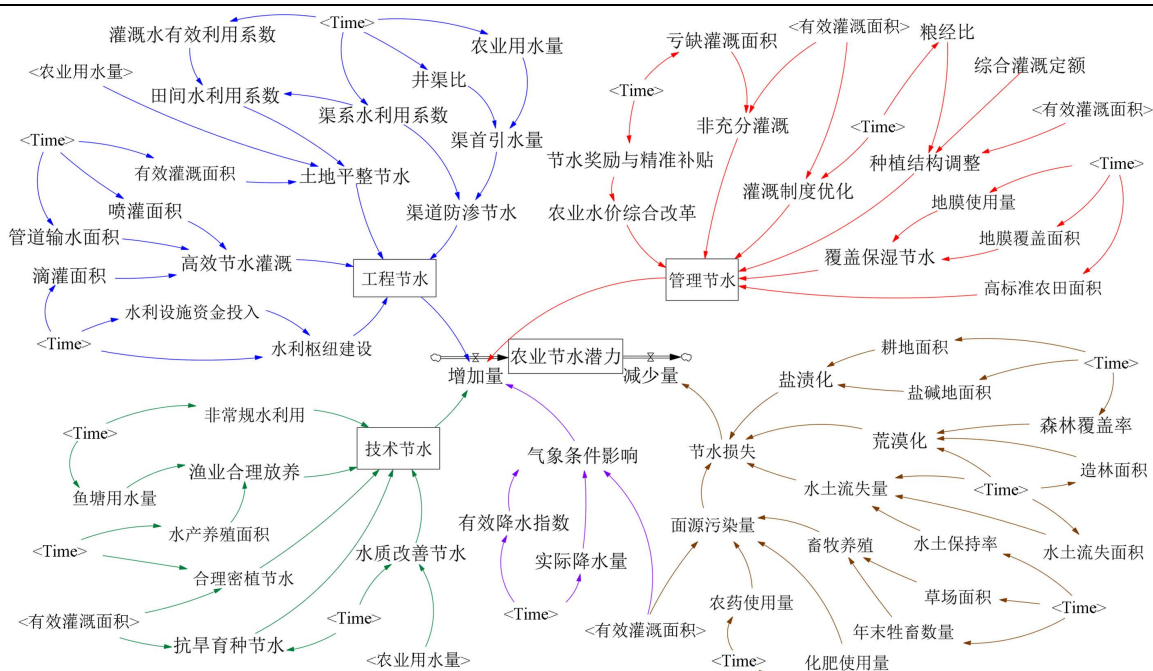


图 1 西北干旱区节水潜力 SD 流图

Fig.1 SD diagram of water saving potential in arid areas

2.3 模型主要方程及参数设置

SD 模型设置 55 个变量，其中辅助变量 45 个，常数变量 2 个，速率变量 4 个，水平变量 4 个，状态变量 2 个，采用 INTEG 函数对农业用水量、灌溉水有效利用系数等 30 个变量设置表函数。牲畜数量统计马、牛等大牲畜和猪、羊等小家畜，家禽不统计。有效降水对农业节水潜力起到促进作用，而土地盐碱化会引起土壤板结、透气性差、持水性能降低等次生障碍，对农业节水以及作物生长发育造成不良影响^[18]。因此本研究考虑自然条件影响，加入环境变化引起的增减量，其中包含水土流失、盐渍化、面源污染^[19]等导致的资源浪费，模型主要方程如下：

$$\Delta W = W_E + W_M + W_T + f(P_e, t) - \lambda, \quad (1)$$

式中： ΔW 为总节水潜力 (m^3)； W_E 、 W_M 、 W_T 分别为工程节水量、管理节水量、技术节水量 (m^3)； P_e 为有效降水量 (mm)； t 为时间 (h)； λ 为损耗量 (m^3)。

喷、微灌等高效灌溉方式根据作物生长所需而灌水，取消了田间渠道和排水沟，既节水还增加播种面积。渠道防渗是通过渠系衬砌和维护来实现，其节水量可由渠系水利用系数计算。魏占民等^[13]对内蒙古河套灌区畦田研究表明，土地平整约节省 9.7% 用水量，而灌区水利工程建设对节水的贡献率达到 43%~45%^[20]，工程节水可表示为：

$$W_E = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_j M_i \alpha_i (1 - K_j) + W_0 \left(\frac{\eta_b}{\eta_a} - 1 \right) + W_h + W_1, \quad (2)$$

式中： A_j 表示第 j 种高效节水灌溉措施的面积 (hm^2)； M_i 表示第 i 种作物的灌溉定额 (m^3/hm^2)； α_i 表示第 i 种作物播种面积占比； K_j 表示第 j 种高效节水方式的灌溉用水定额调节系数，由各地区灌溉用水定额标准确定； m 表示高效节水灌溉种类数； n 表示作物种类数； W_0 表示现状年渠首引水量 (m^3)； η_a 表示衬砌前渠系水利用系数； η_b 表示现状年渠系水利用系数； W_h 表示水利工程建设节水量 (m^3)； W_1 表示土地平整节水量 (m^3)。

种植结构调整所节省的水量由粮经比和灌溉用水定额计算，而灌溉制度优化表示为有效灌溉面积与时间的函数关系，比常规灌溉节省 10%~20% 的用水量^[15]。覆盖保湿节水与地膜使用量、覆盖面积有关，将水分利用率提高 9.09%~17.90%^[16]。高标准农田加强了农田水利设施的管护和升级，完善水源到田间的灌排体系，可节水 0.6 万~0.7 万 m^3/hm^2 。以节水奖励与精准补贴费用衡量农业水价综合改革的节水效果，用水主体按 0.15~0.2 元/ m^3 补贴标准，超定额部分和经济作物不享受补贴，由节水程度进行分档次奖励，奖励金额由节水量和用水定额决定，最终确定管理节水可表示为：

$$W_M = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \Delta q A_0}{(\alpha_1 + 1)(\alpha_2 + 1)} + f(A_d, t) + f(G_n, G_s, t) + f(A_0, t) + f(A_m, t) + f(K, t), \quad (3)$$

式中： α_1 、 α_2 分别为种植结构调整前后的粮经比； Δq 为经济作物与粮食作物综合灌溉定额之差 (m^3/hm^2)； A_0 为有效灌溉面积 (hm^2)； A_d 为亏缺

灌溉面积 (hm^2); A_m 为高标准农田面积 (hm^2); G_n 为地膜使用量 (t); G_s 为地膜覆盖面积 (hm^2); K 为节水奖励与精准补贴金额 (元)。

非常规水中的再生水、微咸水和雨水可用于农业灌溉, 渔业养殖技术的改进也将缩减水量消耗, 适当调节种植密度可提高产量和水分生产率, 假定作物育种、水质改善、合理密植技术随科技进步不断提高, 则技术节水潜力可表示为:

$$W_T = f(Q, t) + f(A_f, W_f, t) + f(A_0, t) + e, \quad (4)$$

式中: Q 为农业用水量 (m^3); A_f 为水产养殖面积 (hm^2); W_f 为鱼塘用水量 (m^3); e 为非常规水利用量 (m^3)。

2.4 模型验证

SD 模型的检验主要在结构合理性检验和真实性检验两方面进行, 模型结构合理性检验是通过 Vensim 软件中自带的“Unites Check”和“Check Model”2 个功能来进行, 其中 Unites Check 功能可检查模型中所有方程和公式中变量和参数单位的一致性, Check Model 功能用来验证模型中方程、参数和变量之间的逻辑正确性。该检验为验证量纲一致性、方程式极端条件和模型界限的适合性, 最终结果显示模型合理性检验通过。

积分误差测试检验也称为步长检验, 主要验证时间间隔是否合理。以巴彦淖尔市为例, 分别将步长 (Step) 设置为 1、0.5、0.25、0.125, 收集 2014—2023 年统计数据模拟 4 种步长条件下的结果, 结果显示 4 次模拟的节水潜力一致, 步长通过检验 (图 2)。

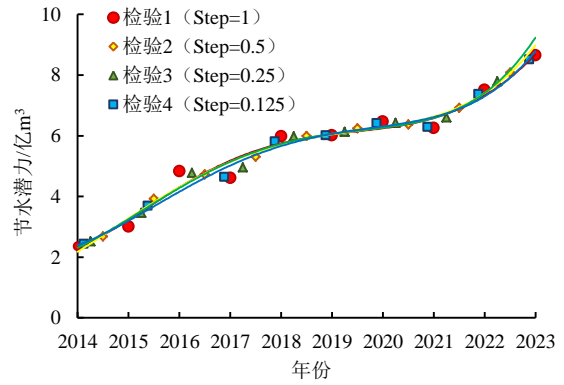


图 2 步长检验结果

Fig.2 Step size test results

真实性检验是指导模型改进和优化的常用方法, 可通过与其他方法测算结果的比较来评估模型的准确性和适应性。采用目前广泛使用的定额法计算, 通过现状年与未来年的综合灌溉定额计算最大可节水量, 该方法涵盖了工程及非工程措施的综合节水效果, 可以反映农业实际的用水情况:

$$\Delta W_{\text{农}} = A_1 (Q_0 - Q_t), \quad (5)$$

式中: $\Delta W_{\text{农}}$ 为农业节水潜力 (m^3); A_1 为现状年农田实灌面积 (hm^2); Q_0 、 Q_t 分别为现状、未来农田灌溉定额 (m^3/hm^2)。

首先选择鄂尔多斯市、巴彦淖尔市、阿拉善盟 3 个地区进行模拟, 步长设定为 1 a, 初始值选定为 2014 年的统计数据, 同时运用式 (5) 方法进行结果对比验证, 计算结果如图 3 所示。3 个市 (盟) 的计算值与模拟值误差都在 $\pm 20\%$ 之间, 平均误差介于 $\pm 10\%$, 真实性通过检验。

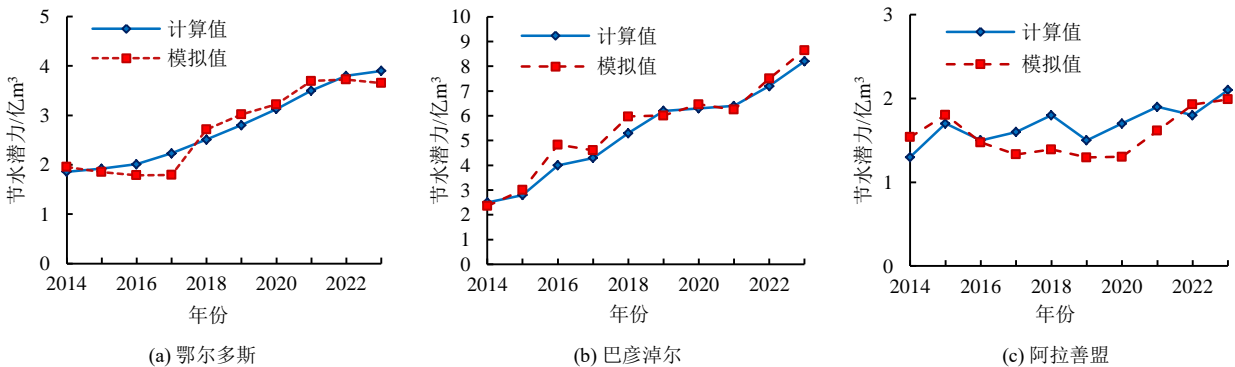


图 3 真实性检验结果

Fig.3 Authenticity test results

3 实例分析

3.1 研究区概况与情景设置

内蒙古自治区位于我国北部, 东西跨度约 2 400 km, 南北跨度约 1 700 km。地貌以高原为主, 海拔高程一般在 1 000 m 以上, 2023 年平均降水量 308

mm, 属温带大陆性季风气候。受地理位置和气候条件影响, 东四盟市与东北地区自然特征相近, 本研究以内蒙古中部和西部地区为研究对象, 含呼和浩特、乌海、包头、巴彦淖尔、鄂尔多斯、锡林郭勒、乌兰察布、阿拉善等 8 个地级市 (盟), 研究区位置见图 4。

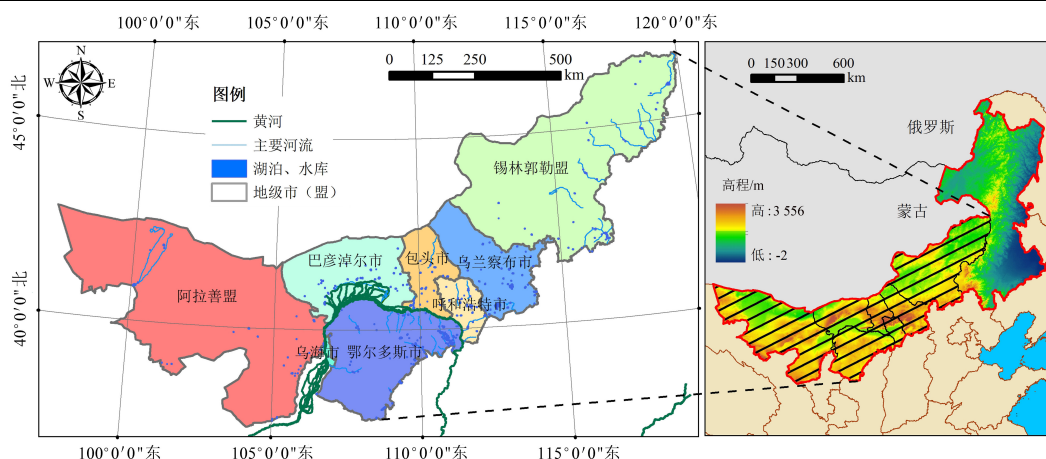


图 4 研究区位置

Fig.4 Study area location

以 2014 年为基准年, 收集了 8 个地级市(盟) 2014—2023 年统计资料。数据来源《2014—2023 年内蒙古统计年鉴》、《2014—2023 年内蒙古自治区水资源公报》、《2014—2023 年内蒙古自治区水土保持公报》、《2014—2023 年各市(盟)统计年鉴》、《行业用水定额(DB15/T 385—2015)》、《行业用水定额(DB15/T 385—2020)》、《内蒙古自治区国民经济和社会发展的第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》等文件, 降水量数据来源于欧盟及欧洲中期天气预报中心等组织发布的 ERA5-Land 数据集。地图来源于资源环境科学与数据平台 (<https://www.resdc.cn>), 数字高程(DEM)数据通过地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn>) 下载。

本研究从多层次、多角度深入挖掘要素, 依据《国家农业节水纲要(2012—2020 年)》, 在工程、管理、技术和自然条件等方面分别选取指标, 符合《“十四五”节水型社会建设规划》(发改环资〔2021〕1516 号)要求。各类消耗品及面积指标由地级市(盟)累加而得, 系数指标按地级市(盟)农业用水量加权, 降水量按地级市(盟)面积加权, 数据均由统计年鉴、水资源公报和水土保持公报等公开资料获取, 现状年农业节水潜力指标取值见表 2。

参考内蒙古自治区水资源规划等政策文件, 将 2035、2050 年分别作为短期和长期规划年, 依据《内蒙古自治区国民经济和社会发展的第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》, 分析 2 种情景下灌

溉水有效利用系数、高效节水灌溉覆盖率、水土保持率, 长期规划年的社会经济指标根据基准年与短期规划年的结果同比提高, 最终确定规划水平年的节水目标, 该目标符合内蒙古自治区实际情况, 同《水安全保障规划》《节水型社会建设》等相印证, 规划年节水目标见表 3。

表 2 现状年(2023)研究区农业节水潜力指标取值

Tab.2 The value of agricultural water-saving potential index in the study area in the current year (2023)

指标	缩写	取值	单位
农业用水量	Q	78.65	亿 m^3
灌溉水有效利用系数	η	0.517	--
渠系水有效利用系数	η_q	0.602	--
有效灌溉面积	A_0	1 532.88	千 hm^2
高效节水灌溉面积	A_j	533.72	千 hm^2
高标准农田面积	A_m	617.44	千 hm^2
粮经比	α	1.54	--
节水奖励与精准补贴	K	4 423.13	万元
地膜使用量	G_n	7.486	万 t
地膜覆盖面积	G_s	1 464.23	千 hm^2
非常规水利用	e	3.73	亿 m^3
鱼塘用水量	W_f	2.38	亿 m^3
实际降水量	P_0	312	mm
耕地面积	A_c	3 523.78	千 hm^2
造林面积	A_t	344.90	千 hm^2
水土流失面积	A_w	45 484.63	千 hm^2
水土保持率	φ	38.37	%
草场面积	A_g	50 224.42	千 hm^2
牲畜数量	W_a	4 330.56	万头
农药使用量	W_p	0.578	万 t
化肥使用量	W_c	88.12	万 t

表 3 研究区规划水平年节水目标

Tab.3 The water saving goals of target year in study area

年份	农田灌溉水有效利用系数	高效节水灌溉覆盖率/%	水土保持率/%
2023 (现状水平年)	0.574	58.94	52.37
2035 (短期规划年)	0.631	70.73	57.61
2050 (长期规划年)	0.694	85.57	63.37

3.2 结果与分析

研究区 2023 年农业节水潜力为 22.04 亿 m^3 , 其

中巴彦淖尔市节水潜力最大, 受地区面积限制, 乌海市节水潜力最小, 仅为 0.16 亿 m^3 。现状水平年内

的农业节水潜力呈逐年递增趋势，其中巴彦淖尔市节水潜力的增幅较为明显，由 2014 年的 2.4 亿 m^3 增长到 2023 年的 8.6 亿 m^3 ，而其他市（盟）增长较为缓慢。一方面由于巴彦淖尔市拥有河套灌区这一特大型灌区，使得其农业种植面积和灌溉面积远高

于其他地区，灌区内工程配套及节水改造条件良好；另一方面是受干旱区自然环境影响，阿拉善盟、锡林郭勒盟等地荒漠化和水土流失问题短时间内不能得到改善，地区较为缺水干旱，因此水资源节约的潜力值较小（图 5）。

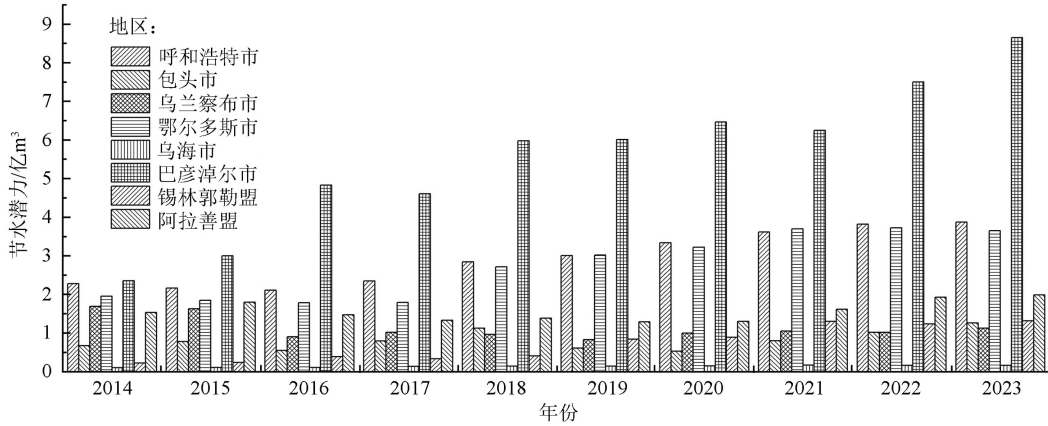


图 5 2014—2023 年各市（盟）节水潜力

Fig.5 The 2014—2023 water-saving potential of each city

单位面积节水潜力可以更直观地反映区域节水效果的差异，通过各地区总节水潜力与土地面积的比值求得不同地区不同年份的单位节水潜力结果见图 6。从时间尺度来看，随着灌区续建配套与节水改造逐步进行，研究区的节水能力不断提高；特别是呼和浩特市与巴彦淖尔市，两市的单位面积节水潜力在 10 a 内增长了 100~150 m^3/hm^2 ，而位于干旱地区的阿拉善盟和锡林郭勒盟的单位节水潜力变化不大；最终结果与研究区多年降水变化情况密切相关，总体呈“丰水年增大、枯水年减小”的趋势。

从空间尺度来看，研究区的区域节水效果分布不均，受阿拉善盟的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和锡林郭勒盟的浑善达克沙地影响，部分地区水资源短缺较为严重，农业用水成为社会发展的制约因素；研究区单位节水潜力的峰值集中在中部及黄河沿岸地区，但灌区“重建轻管”现象依然存在，高效节水灌溉占比偏小，工程效益降低。因此，加强基础设施建设和用水制度管理，解决空间水资源分布不均和用水矛盾，十分必要和紧迫。

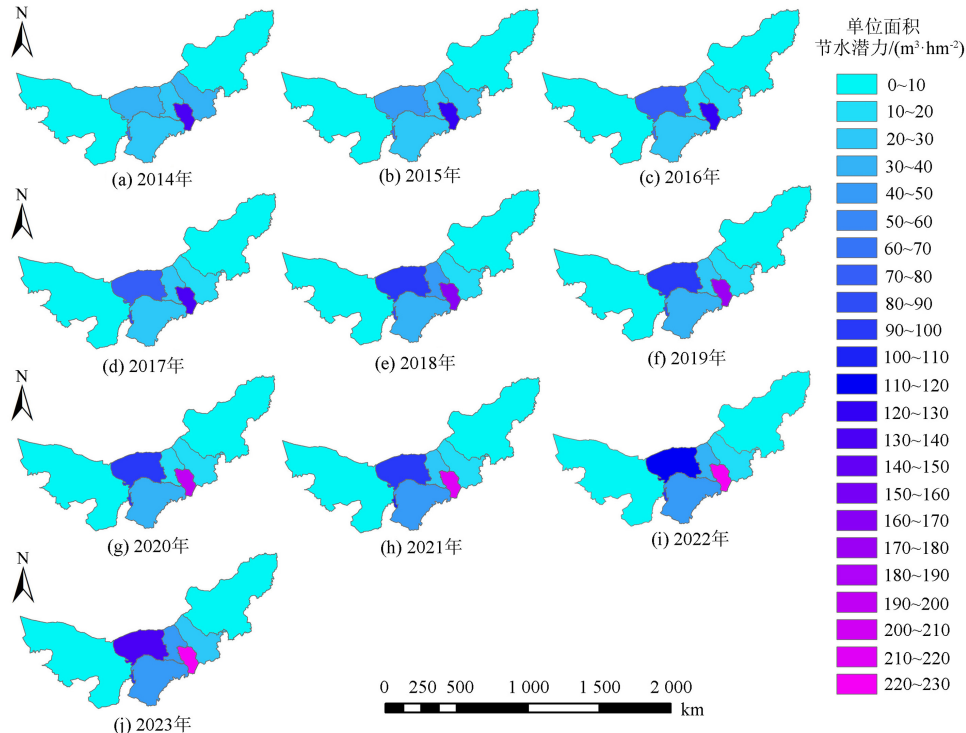


图 6 单位面积节水潜力的时空变化

Fig.6 Spatiotemporal variation of water saving potential per unit area

研究区 2035 年和 2050 年农业节水潜力预测值分别为 25.18 亿 m^3 和 29.58 亿 m^3 , 节水潜力较为可观, 分别达到现状年内蒙古用水总量的 13.8% 和 16.4% (表 4)。对于不同地级市 (盟) 来说, 巴彦淖尔市的节水潜力最大, 在 2035 年和 2050 年的农业节水潜力分别达到 10.03 亿 m^3 和 12.19 亿 m^3 , 分别占研究区总节水潜力的 39.83% 和 41.21%, 属于内蒙古农业重点节水地区; 农业节水潜力大小其次为呼和浩特市和鄂尔多斯市, 多年平均节水潜力分别为 2.94 亿 m^3 和 2.74 亿 m^3 ; 节水潜力最小的地级市 (盟) 为乌海市, 在 2035 年和 2050 年的潜力值分别为 0.18 亿 m^3 和 0.21 亿 m^3 。

在节水潜力构成中, 工程节水占比最高, 其次为管理节水, 技术节水占比最小, 三者多年平均占比分别为 52.83%、30.26% 和 16.91%, 研究区 2035

年和 2050 年的节水潜力组成如图 7 所示。工程节水潜力占比呈现逐年增高的趋势, 占比最高的锡林郭勒盟在 2035—2050 年由 66.10% 增长到 72.44%, 有效灌溉面积最大的巴彦淖尔市的工程节水潜力占比由 2035 年的 49.70% 提高到 2050 年的 55.13%。一方面是由于近年来渠道防渗工程投入不断增加, 灌区内渠系水利用系数提高, 避免了大量的输水损失; 另一方面是由于高效灌溉工程普及率不断提高, 喷灌、微灌等一系列高效节水设施得到广泛应用。

表 4 研究区规划水平年节水潜力

Tab.4 The water-saving potential of target year in study area

年份	节水潜力/亿 m^3
基准年 (2014 年)	10.836
现状年 (2023 年)	22.043
短期规划年 (2035 年)	25.181
长期规划年 (2050 年)	29.580

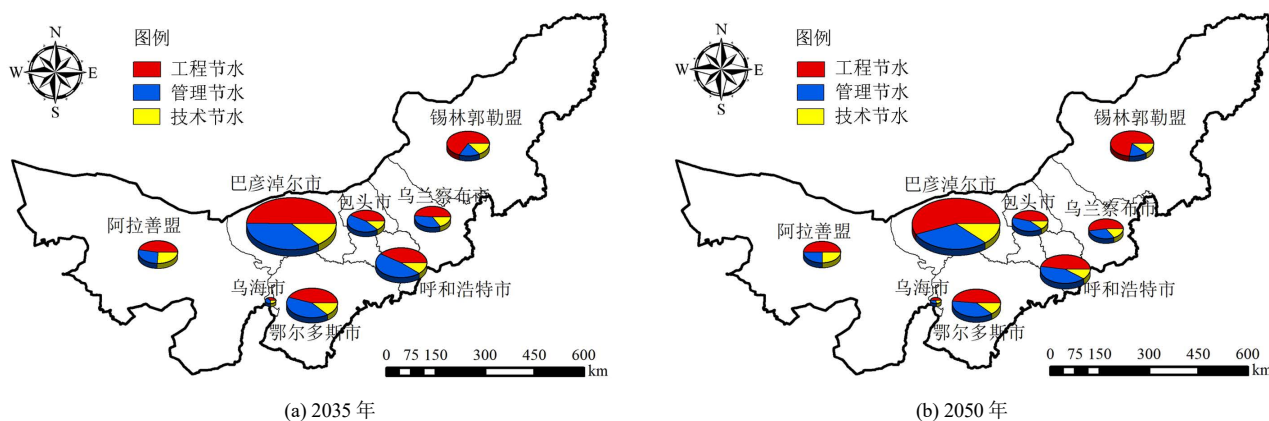


图 7 节水潜力组成

Fig.7 Composition of water-saving potential

4 讨论

农业节水潜力的概念和内涵尚未达成统一, 本文采用被研究者所广泛接受的定义, 即节水潜力是采取可能的科技、社会 and 工程措施, 在保持地区生态稳定和可持续发展的前提下, 与现状用水水平相比的最大节水能力。采用的农业节水潜力估算公式是以水量平衡为基础推导简化而得, 计算中所采用的参数, 诸如农业水价综合改革节水量、覆盖措施节水量等均是通过对各类节水灌溉技术措施的实施来实现的, 是对各类节水技术措施实施效果的综合估算。在影响因素考虑方面, 节水潜力计算过程包含工程、管理和技术 3 种类型, 结果受降水量、盐渍化、荒漠化、面源污染等外部条件影响, 使计算结果更加综合全面。本研究考虑了农业灌溉中的非常规水资源利用, 其中微咸水广泛分布于西北、华北等盐渍地区或沿海地区, 开发利用潜力巨大, 而再生水是将污水处理后达到特定水质标准的使用水源, 目前国内外学者开发出了再生水灌溉“4R”模式^[21],

可以满足所有作物或园林植物的灌溉水质要求。内蒙古地区鱼塘改造节水增效显著, 实现生态治水和经济效益“双赢”, 考虑渔民通过配套节水设备、改进养殖技术而节约的水量。在灌溉退水方面, 有学者研究得出, 一般水稻种植或采用漫灌方法的灌区, 其灌溉回归水量约占引水量的 50%, 但由于西北地区特殊干旱条件, 水稻种植比例较小, 因此本次节水潜力中不考虑回归水利用。

模型运用不同方法进行真实性检验, 与 2014 年贾冬梅等^[22]研究得到的鄂尔多斯市节水潜力基本一致。在节水潜力组成中, 工程节水量占总节水潜力的 50%~70%, 其次为管理措施节水, 技术节水量最小, 这与丁志宏等^[23]研究结论较为接近。随着小流域综合治理、侵蚀沟治理、坡耕地综合治理等国家水土保持重点工程建设, 内蒙古地区的植被覆盖增加, 水环境得到改善, 节水潜力总体较为可观。研究结果显示, 受水资源总量制约和气候变化影响, 干旱地区与半干旱地区之间农业节水潜力相差 150~200 m^3/hm^2 , 同一地区在不同年份的节水潜力

相差 10~100 m³/hm², 干旱地区的工程措施和管理措施比较薄弱, 而半干旱地区虽然供水保障得到提高, 但水资源利用效率持续偏低, 探索农业节水增效是内蒙古地区亟待解决的问题。因此, 干旱地区应推广滴灌技术、水肥一体化灌溉设备应用, 加强节水技术研究; 半干旱地区可以通过提升管理水平、优化种植结构和灌溉制度等方式提高黄河水、地下水和非常规水综合利用效率, 达到“保墒压盐”的效果。农业节水潜力受许多因素相互交织影响, 致使节水潜力具备动态、复杂、敏感和耦合等诸多特征, 本次模拟得到工程节水、管理节水和节水技术等 3 方面的潜力值及次序应伴随基础数据的监测和收集、数值模拟和分析、规划标准的拟定和实施等科研与实践的演化而进行深入的动态论证。

5 结论

1) 经积分误差测试, 模型通过步长检验和真实性检验, 计算值与模拟值的平均误差在±10%之间, 说明模型满足要求, 可对干旱区农业节水潜力进行预测分析。

2) 研究区 2023 年农业节水潜力为 22.04 亿 m³, 其中巴彦淖尔市节水潜力最大, 为 8.65 亿 m³, 乌海市节水潜力最小, 仅为 0.16 亿 m³, 短期和长期规划年节水潜力的预测值分别为 25.18 亿 m³ 和 29.58 亿 m³。

3) 在节水潜力组成中, 工程节水占比最高, 呈现逐年增长趋势, 工程、管理和技术节水的平均占比分别为 52.83%、30.26% 和 16.91%。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 翟家齐, 赵勇, 刘宽, 等. 干旱区灌溉绿洲农业节水潜力形成机制与评估方法[J]. 水利学报, 2023, 54(12): 1 440-1 451.
ZHAI Jiaqi, ZHAO Yong, LIU Kuan, et al. Formation mechanism and evaluation method of agriculture water-saving potential in irrigated oasis in arid regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(12): 1 440-1 451.
- [2] 裴源生, 张金萍, 赵勇. 宁夏灌区节水潜力的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 239-243, 249.
PEI Yuansheng, ZHANG Jinping, ZHAO Yong. Water saving potential in irrigation area of Ningxia Autonomous Region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 239-243, 249.
- [3] 雷波, 刘钰, 许迪. 灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 10-14.
LEI Bo, LIU Yu, XU Di. Estimating theory and method of irrigation water-saving potential based on irrigation district scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 10-14.
- [4] 崔远来, 龚孟梨, 刘路广. 基于回归水重复利用的灌溉水利用效率指标及节水潜力计算方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 1-5.
CUI Yuanlai, GONG Mengli, LIU Luguang. Irrigation water use efficiency index and calculation method of water-saving potential with considering reuse of return flow[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2014, 35(2): 1-5.
- [5] 王军涛, 李根东, 宋常吉, 等. 黄河灌区高效节水灌溉发展对策与建议[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 111-114.
WANG Juntao, LI Gendong, SONG Changji, et al. Development countermeasures and suggestions for highly-efficient water-saving irrigation of the Yellow River irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S2): 111-114.
- [6] 赵晶, 段晶晶, 王涛, 等. 用分布式水循环模型与机器学习预测内蒙古河套灌区节水潜力[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 89-98.
ZHAO Jing, DUAN Jingjing, WANG Tao, et al. Prediction of water-saving potential in Inner Mongolia Loop using distributed water cycle model and machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(16): 89-98.
- [7] 李佳伟, 水淼, 左其亭, 等. 区域节水潜力计算方法及河南省节水潜力评估[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 141-146.
LI Jiawei, SHUI Miao, ZUO Qiting, et al. A proposed method to evaluate water saving potential at regional scale and its application in Henan Province[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 141-146.
- [8] 吴迪, 崔远来, 黄文波, 等. 基于改进 SWAT 模型的多水源灌区节水潜力尺度效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 82-90.
WU Di, CUI Yuanlai, HUANG Wenbo, et al. Scale effect of water-saving potential in multi-source irrigation systems based on modified SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(12): 82-90.
- [9] 朱正全, 冯绍元, 王娟, 等. 内蒙古河套灌区农业灌溉资源型节水潜力分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 77-80.
ZHU Zhengquan, FENG Shaoyuan, WANG Juan, et al. Analysis and estimation on resource-based water-saving potential of agricultural irrigation in Hetao irrigation district of Inner Mongolia[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 77-80.
- [10] UMAIR M, HUSSAIN T, JIANG H B, et al. Water-saving potential of subsurface drip irrigation for winter wheat[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2 978.
- [11] KARIMOV A, MOLDEN D, KHAMZINA T, et al. A water accounting procedure to determine the water savings potential of the Fergana Valley[J]. Agricultural Water Management, 2012, 108: 61-72.
- [12] BOSER A, CAYLOR K, LARSEN A, et al. Field-scale crop water consumption estimates reveal potential water savings in California agriculture[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 2 366.
- [13] 徐睿智, 魏占民, 夏玉红, 等. 激光精细平地对畦田灌水质量的影响及节水效果分析[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 6-9.
XU Ruizhi, WEI Zhanmin, XIA Yuhong, et al. Effects of laser precision land leveling on border irrigation and its water saving performance[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 6-9.
- [14] 蒲小芳, 吴迪, 项华伟, 等. 考虑回归水重复利用的多水源灌区灌溉用水量分析[J]. 中国农村水利水电, 2024(4): 158-164.
PU Xiaofang, WU Di, XIANG Huawei, et al. Analysis of irrigation water consumption in multi-source irrigation systems considering reuse of return flow[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(4): 158-164.
- [15] 宋喜山, 曹红霞, 何子建, 等. Aquacrop 模型在北疆棉花生育期灌溉洗盐制度优化中的适用性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 111-122.
SONG Xishan, CAO Hongxia, HE Zijian, et al. Applicability of the Aquacrop model in optimization of irrigation and salt leaching schedule during the reproductive period of cotton in Northern Xinjiang of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(20): 111-122.
- [16] 吴梅, 张金珠, 王振华, 等. 加气滴灌和可降解膜覆盖对玉米生长发育

- 及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(9): 1 425-1 438.
- WU Mei, ZHANG Jinzhu, WANG Zhenhua, et al. Effects of aerated drip irrigation and degradable film mulching on growth and water use of maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(9): 1 425-1 438.
- [17] DÍAZ-REZA J R, MOUSAVI S H, SÁNCHEZ-RAMÍREZ C, et al. Achieving social sustainability through lean manufacturing practices: Insights from structural equation model and system dynamics[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 448: 141 453.
- [18] 黄晶, 孔亚丽, 徐青山, 等. 盐渍土壤特征及改良措施研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(1): 18-23.
- HUANG Jing, KONG Yali, XU Qingshan, et al. Progresses for characteristics and amelioration measures of saline soil[J]. Soils, 2022, 54(1): 18-23.
- [19] CONTRERAS E, AGUILAR C, POLO M J. Accounting for the annual variability when assessing non-point source pollution potential in Mediterranean regulated watersheds[J]. Science of the Total Environment, 2023, 902: 167 261.
- [20] 徐凯, 沈建强, 刘敏昊, 等. 基于 C-D 生产函数的灌区节水贡献率研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(7): 234-240, 254.
- XU Kai, SHEN Jianqiang, LIU Minhao, et al. Study on water saving contribution rate of irrigation area based on C-D production function[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(7): 234-240, 254.
- [21] 刘春成. 微咸水与再生水组合灌溉对土壤-作物系统的影响及调控机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- LIU Chuncheng. Effect and regulation mechanism of combined irrigation using brackish-reclaimed water on soil-crop system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022.
- [22] 贾冬梅, 魏洪涛, 肖素君. 鄂尔多斯市农业节水研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(9): 64-65, 69.
- JIA Dongmei, WEI Hongtao, XIAO Sujun. Study on water-saving of agriculture in Ordos[J]. Yellow River, 2014, 36(9): 64-65, 69.
- [23] 丁志宏, 徐向广, 付晓亮. 基于分区的海河流域农业节水潜力评估[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 47-51.
- DING Zhihong, XU Xiangguang, FU Xiaoliang. The evaluation of agricultural water-saving potentials in the Haihe River Basin based on the agricultural water-saving zones[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 47-51.

Calculating agricultural water-saving potential in arid areas using system dynamic model

XU Kai^{1,2}, YUE Yaoxian³, LEI Bo¹, YANG Kaijing^{1*}, XU Lirong²,
JIN Hanlin³, BAI Minghao¹, LIU Huibo¹, GUO Yu⁴

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. School of Water Conservancy and Environment, University of Ji'nan, Ji'nan 250022, China;

3. Sichuan Dujiangyan Water Conservancy Development, Chengdu 611800, China;

4. School of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: **【Objective】** Agriculture is the main water consumer in many countries and regions, and improving agricultural water use efficiency is critical to sustainable development in these regions. A prerequisite for this is to understand the potential for water saving in the agricultural sector. This paper presents a method to evaluate agricultural water-saving potential in arid regions. **【Method】** The method considered the influence of desertification, soil erosion, and other environmental factors on water conservation. A total of 30 key factors, including agricultural water consumption, irrigated land area, irrigation water use efficiency, grain-to-economy ratio, and soil and water conservation rate, were considered in the evaluation. Using the Vensim PLE software, a system dynamic flow diagram model was developed to calculate agricultural water-saving potential. The model was applied to Inner Mongolia (excluding Dongsimeng City) to evaluate its agricultural water-saving potential at regional scales, in both the short term (up to 2035) and the long term (up to 2050). **【Result】** ① Agricultural water-saving potential in Inner Mongolia was estimated to be 2.518 billion m³ in the short term (up to 2035) and 2.958 billion m³ in the long term (up to 2050). Among all areas in the province, Bayannur had the highest water-saving potential, while Wuhai had the least. ② Engineering water-saving projects contributed the most to the water-saving potential (approximately 52.83%), while technical water-saving measures contributed the least (approximately 16.91%). The contribution of engineering water-saving projects to water savings is expected to increase over time. **【Conclusion】** Our results demonstrate that the system dynamic model can be used to estimate agricultural water-saving potential. The results obtained using this model are reliable and provide valuable technical support for formulating agricultural water-saving policies in arid regions.

Key words: system dynamics; agricultural water-saving potential; arid zone; Vensim model

责任编辑: 韩洋