

# 基于SWAP模型与长序列统计的邯郸市永年区 农田耗水规律研究

刘冬冬

河北省邯郸水文水资源勘测研究中心, 河北 邯郸

收稿日期: 2026年4月6日; 录用日期: 2026年5月8日; 发布日期: 2026年5月15日

## 摘要

为揭示华北平原典型井灌区农田水循环要素的演变规律及互馈机制,本研究以邯郸市永年区为研究对象,利用SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant)模型重建了1965~2022年长达58年的农田水分运移过程。在此基础上,结合变异系数(CV)、Mann-Kendall检验和Spearman相关分析,定量解析了降雨(P)、灌溉(I)与耗水量(ET)的时空演变特征,量化了灌溉对降雨的补偿强度及高耗水模式的驱动力。本研究可为海河流域地下水超采治理及农业水资源刚性约束制度的建立提供长序列数据支撑,为区域水资源优化配置和农业种植结构调整提供更为严谨的科学依据。

## 关键词

SWAP模型, 邯郸市永年区, 农田耗水, 变异系数, 相关性分析

# A Study on Water Consumption Patterns in Farmland in Yongnian District, Handan City Based on the SWAP Model and Long-Series Statistics

Dongdong Liu

Handan Hydrological and Water Resources Survey and Research Center, Hebei Province, Handan Hebei

Received: April 6, 2026; accepted: May 8, 2026; published: May 15, 2026

## Abstract

To elucidate the evolution patterns and feedback mechanisms of key components in the agricultural

water cycle of a typical well-irrigated area on the North China Plain, this study focused on Yongnian District, Handan City, and utilized the SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) model to reconstruct the agricultural water transport processes over a 58-year period from 1965 to 2022. Based on this, combined with the Coefficient of Variation (CV), Mann-Kendall test, and Spearman correlation analysis, this study quantitatively analyzed the spatiotemporal evolution characteristics of Precipitation (P), Irrigation (I), and Evapotranspiration (ET), and quantified the compensatory intensity of irrigation on precipitation as well as the driving forces behind high-water-consumption patterns. This study provides long-series data support for addressing groundwater over-abstraction in the Hai River Basin and establishing a rigid constraint system for agricultural water resources, offering a more rigorous scientific basis for the optimal allocation of regional water resources and the adjustment of agricultural cropping patterns.

## Keywords

SWAP Model, Yongnian District, Handan City, Agricultural Water Consumption, Coefficient of Variation, Correlation Analysis

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

华北平原是我国冬小麦-夏玉米轮作的主产区,其粮食稳产对于保障国家粮食安全具有重要意义。然而,该地区水资源先天禀赋不足,农业生产长期处于“以水换粮”的状态,导致地下水持续超采,形成了世界上面积最大的地下水漏斗区。邯郸市永年区作为华北平原典型的井灌区,其农田水分供需矛盾尤为突出。

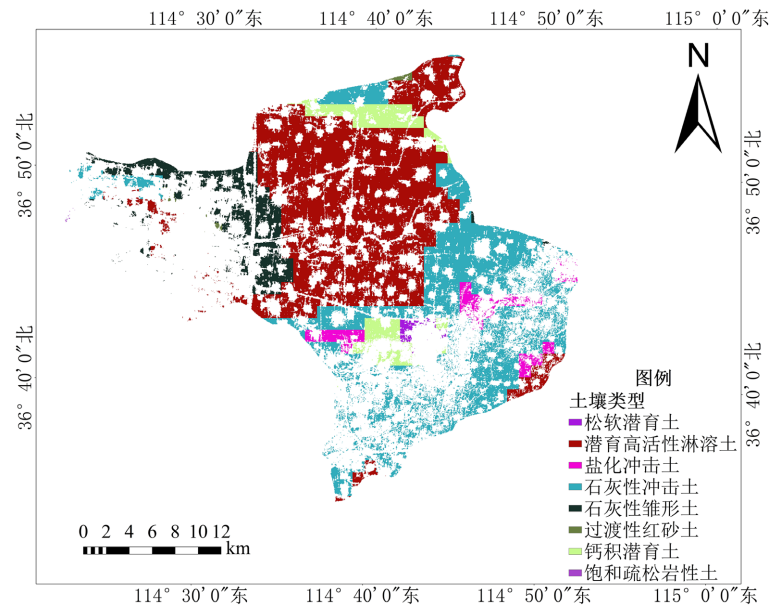
在长达半个多世纪的农业生产实践中,由于气候变化的干扰和人为灌溉活动的强力介入,农田水循环过程变得极为复杂。准确把握长周期的农田耗水(Evapotranspiration, ET)规律,特别是厘清降雨波动与人为灌溉调节对最终耗水量的定量影响,是制定区域节水战略的科学基础。然而,现有的田间试验往往局限于短周期的观测,难以捕捉几十年来极端气象事件频发背景下的水文要素演变全貌;且鲜有研究从统计学角度(如变异性、相关性)深入剖析“降雨-灌溉-耗水”三者之间的互馈机制。

鉴于此,本研究引入基于物理机制的SWAP模型,利用邯郸市永年区1965~2022年的气象与土壤数据,对近58年的农田水分循环过程进行模拟重构。本研究不仅关注各水文要素的趋势变化,更侧重于通过统计分析手段,对比降雨输入的随机性与作物耗水的稳定性,量化灌溉对降雨亏缺的补偿程度。研究结果旨在揭示该地区在气候波动背景下农田耗水的“刚性”特征,以期为区域水资源优化配置和农业种植结构调整提供更为严谨的科学依据。

## 2. 材料与amp;方法

### 2.1. 研究区概况

研究区位于河北省邯郸市永年区,属温带半湿润大陆性季风气候。该地区四季分明,雨热同期,多年平均降水量约为500~600 mm,且降水年内分配不均,主要集中在7~9月。永年区主要农作物为冬小麦和夏玉米,本文根据世界土壤类型分布图,采用ArcGIS对永年区作物种植分布图进行重采样使其处于同一分辨率,提取出永年区种植区域的土壤类型,永年区土壤类型见图1。

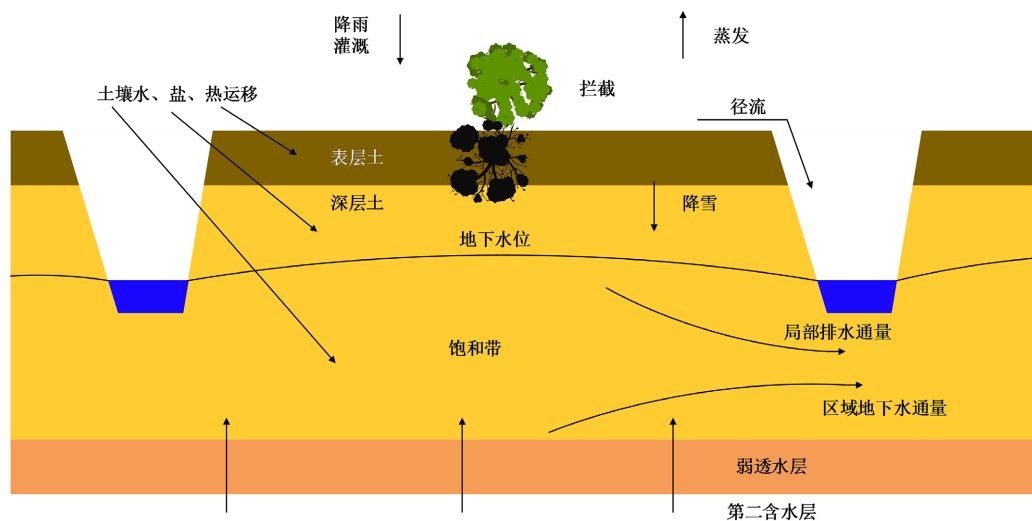


数据来源：世界和谐土壤数据库(Harmonized World Soil Database) (HWSD),  
<https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>.

**Figure 1.** Soil type map of Yongnian District  
**图 1.** 永年区土壤类型图

## 2.2. SWAP 模型原理

由荷兰瓦赫宁根大学所研发，用于田间尺度模拟的SWAP模型，可对土壤水分动态性、溶质迁移行为等进行模拟，同时整合作物生长模拟功能。构成该模型的七大模块——气象参数模块化处理单元、作物生长计算组件、土壤特性模拟器、侧向排水数值模块、底部边界条件设定器、热流动力学计算单元及溶质迁移仿真系统。由此可见，该模型能够完整再现农田水文循环全过程。SWAP 模拟水文过程如图 2 所示。



**Figure 2.** Diagram of hydrological process simulation in the SWAP model  
**图 2.** SWAP 模型的水文过程模拟图

SWAP 模型[1]是近年来发展迅速的农业水文模型，在农业水利和土壤科学等领域得到了广泛应用。

它主要用于模拟土壤水盐迁移[2]-[6]、地下水位变化[7]-[9]、农业排水[10][11]、作物生长和水分生产力,以及区域尺度的 SWAP 模型模拟[12]。SWAP 模型利用 Richards 方程描述土壤水分在非饱和带的垂直一维运动,结合根系吸水函数和作物生长模块,模拟土壤水分的入渗、蒸发、蒸腾及深层渗漏过程。模型的控制方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S_a(h) \quad (2.1)$$

式中,  $\theta$  是体积含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $t$  是时间, d;  $K$  是导水度,  $\text{cm}/\text{d}$ ;  $h$  是压力水头,  $\text{cm}$ ;  $z$  是向上为正的位置水头,  $\text{cm}$ ;  $S_a(h)$  是根系吸水速率,  $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$ 。

## 2.3. 数据来源与统计方法

### 2.3.1. 数据来源

模型输入数据包括气象数据(日降雨量、最高/最低气温、日照时数、风速等)、土壤水力参数及作物生长数据。

气象数据来源于永年气象站 1964~2022 年的实测数据,包括平均温度、最低温度、最高温度、相对湿度、风速、日照时数、降雨量等日尺度数据。根据永年区的土壤类型计算获得相应的土壤水力参数。通过 SWAP 模型运行,输出了 1965~2022 年逐日的降雨量、灌溉量和总耗水量。

本次模拟土层深度为 100 cm,并将土壤以 30 cm 为界分为上下两层。根据各个土层的土壤机械组成(沙子百分比、粉砂百分比、粘土百分比和土壤容重等)用 Rosetta 软件生成各土层土壤水力特性参数。

作物生长数据采用作物从出苗到成熟的线性函数表示。

灌溉采用固定灌溉制度,灌溉制度参考河北省《农业用水定额 第 1 部分:种植业》(DB 13/T 5449.1-2021)和当地灌溉习惯共同制定。永年区冬小麦生育期内灌水 4 次,次灌溉水量  $70 \text{ m}^3/\text{亩}$ ,即亩均次灌溉水量 104.9 mm;夏玉米生育期内灌水 1 次,次灌溉水量  $70 \text{ m}^3/\text{亩}$ ,即亩均次灌溉水量 104.9 mm。

### 2.3.2. 统计方法

#### (1) 变异系数

为定量分析数据的波动性,本研究采用变异系数[13] (Coefficient of Variation, CV)来衡量各水文要素的年际离散程度,公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.2)$$

式中,  $\sigma$  为标准差,  $\mu$  为平均值。

#### (2) Spearman 相关系数

Spearman 相关系数[14][15]用  $\rho$  表示,它是衡量两个变量依赖性的非参数指标。该方法是利用单调方程评价两个统计变量的相关性,对数据分布没有要求,可以更好地探索降水与温度的相关性。

其计算公式为[16]-[19]:

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2.3)$$

两个变量的相关性是由  $\rho$  值( $\rho \in [-1, 1]$ )决定。其分级标准见 Spearman 相关程度分级表(表 1)。

#### (3) Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法[20]是一种应用广泛的非参数统计检验方法,其特点是数据样本不需要服从某

些特定的分布，也不受少数异常值的干扰，定量化程度较高。常用来预测如气温、降水、径流、水质等水文气象时间序列资料的长期变化趋势。

**Table 1.** Spearman's correlation coefficient classification table  
**表 1.** Spearman 相关程度分级表

相关系数的值	相关程度
$ \rho  = 0$	完全不相关
$0.01 \leq  \rho  \leq 0.19$	微弱相关
$0.20 \leq  \rho  \leq 0.39$	低度相关
$0.40 \leq  \rho  \leq 0.59$	中度相关
$0.60 \leq  \rho  \leq 0.79$	显著相关
$0.80 \leq  \rho  \leq 0.99$	高度相关
$ \rho  = 1$	完全相关

在 Mann-Kendall 检验中，假设  $H_0$  为时间序列数据  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ，是  $n$  个独立的、随机变量同分布的样本；备择假设  $H_1$  是双边检验，对于所有的  $k, j \leq n$ ，且  $k \neq j$ ， $X_k$  和  $X_j$  的分布是不相同的，检验的统计量  $S$  被定义为：

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{Sgn}(X_i - X_j) \quad (2.4)$$

其中， $\text{Sgn}()$  为符号函数：

$$\text{Sgn}(X_i - X_j) = \begin{cases} 1 & X_i - X_j > 0 \\ 0 & X_i - X_j = 0 \\ -1 & X_i - X_j < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

$S$  为正态分布，其均值为 0，方差为：

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2.6)$$

M-K 统计量公式  $S > 0$ ， $S = 0$ ， $S < 0$  时  $Z$  分别为：

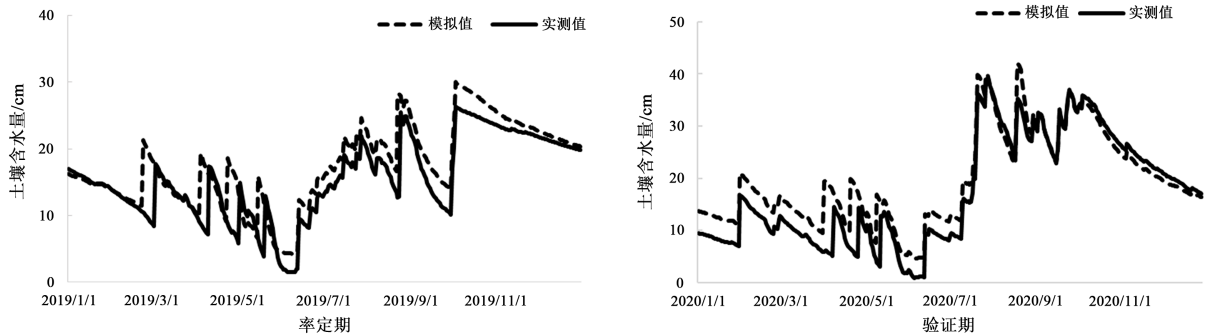
$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

#### 2.4. 模型率定与验证

河北工程大学人工降雨径流 - 节水灌溉实验基地坐落于邯郸市永年区，基地布设了 29 根土壤水分监测设备，利用 2019 年全年实际土壤含水量数据对模型进行率定，通过调整模型中作物参数至模拟值与实测值接近；用 2020 年全年实际土壤含水量数据进行验证。采用相关系数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)对模型进行精

度评定。通过将模拟值与实测值进行精度评定，其指标均满足精度要求，说明模拟值和实测值之间具有较好的一致性，2019~2020 年率定期和验证期土壤含水量模拟值与实测值对比见图 3，结果见表 2。

SWAP 模型能够精细地模拟非饱和带土壤水分的垂直入渗、蒸发、根系吸水以及深层渗漏过程，是制定区域水资源管理政策的得力工具。但是 SWAP 本质上是一个一维模型，它假设水分和溶质只在垂直方向上运动。这意味着它无法处理侧向水流，如果研究区位于坡地、地形起伏大，或者存在明显的侧向壤中流，SWAP 的模拟结果将严重失真。同时模型需要大量、高精度的输入数据，在很多缺乏长期观测站的地区，由于无法获取这些数据，模型根本无法运转。



**Figure 3.** Comparison of simulated and measured soil moisture content values during the regular and validation periods  
**图 3.** 率定期和验证期土壤含水量模拟值与实测值对比图

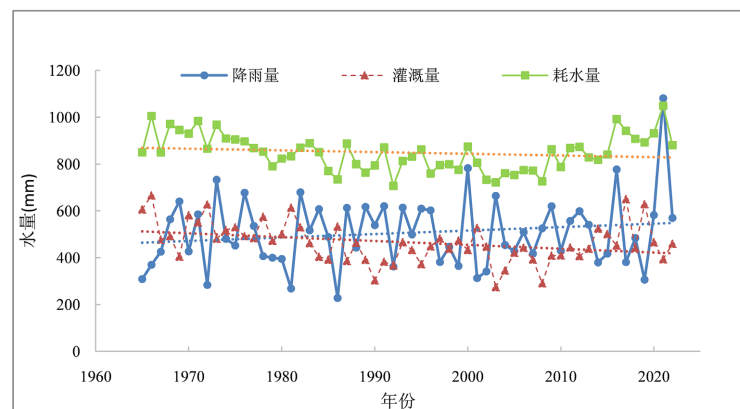
**Table 2.** Model regular and validation results

**表 2.** 模型率定和验证结果

率定		验证	
RMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>	RMSE (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	R <sup>2</sup>
0.020	0.901	0.019	0.856

### 3. 结果与分析

根据 SWAP 模型输出的逐日降雨量、灌溉量和耗水量数据，按照年份进行统计，得到 1965~2022 年不同年份数据，不同年份的降雨量、灌溉量、耗水量趋势图见图 4。



**Figure 4.** Trend maps in long-series rainfall, irrigation, and water consumption in Yongnian District

**图 4.** 永年区长序列降雨量、灌溉量、耗水量趋势图

从降雨量、灌溉量和总耗水量的长序列变化趋势图中可以看出,降雨量波动最为剧烈,极差非常大;可以明显观察到灌溉量与降雨量呈现“此消彼长”的反向关系;农田总耗水量变化相对平稳,但在2021年有明显峰值。

### 3.1. 统计学特征分析

对邯郸市永年区1965~2022年共58年的降雨数据进行分析,永年区降雨量年际震荡显著,表现出极强的不稳定性。降雨量在不同年代间交替出现丰、枯周期。多年平均降雨量约为506.1 mm,变异系数CV为0.296,其值在三个变量中最高的,说明降雨是该系统中最不稳定的输入因子,是农业生产风险的主要来源。

对邯郸市永年区1965~2022年共58年的灌溉量数据进行分析,多年平均灌溉量约为465.5 mm,变异系数CV为0.183,波动性居中,体现了人为调控对降雨波动的响应。

对邯郸市永年区1965~2022年共58年的耗水量数据进行分析,多年平均耗水量约为848.6 mm,变异系数CV为0.091,其值在三个变量中最低,说明无论降雨丰枯,作物通过“降雨+灌溉”的互补模式,使得最终的耗水量维持在一个相对稳定的水平。

通过对比分析发现,降雨量与灌溉量呈现出明显的互补关系。多年平均降雨量远低于多年平均总耗水量,平均每年存在约342.5 mm的水分亏缺,这部分亏缺长期以来主要通过抽取地下水进行灌溉填补。

### 3.2. 相关性分析

通过Spearman相关系数矩阵分析,降雨与灌溉相关性系数 $\rho$ 为-0.47,呈现显著的中度负相关。数据证明了当降雨减少时,灌溉量显著增加,反之亦然。这种负相关性是该地区维持稳产的关键机制;降雨与耗水相关性系数 $\rho$ 为0.44,呈现中度正相关。说明在丰水年,水分供应充足,作物蒸散发更旺盛,耗水总量会相应提升;灌溉与耗水相关性系数 $\rho$ 为0.41,同样呈现中度正相关。这表明灌溉不仅补充了水分亏缺,同时也支撑了较高的作物蒸散发水平。

对1965~2022年水文要素的统计分析表明,系统各要素的稳定性差异显著。降雨量的变异系数(CV)最高,达0.296,显示出极强的年际不稳定性;而总耗水量(ET)的变异系数仅为0.091,表明在该地区“雨养+灌溉”的双重供水模式下,农田耗水系统具有很强的自我调节能力,长期维持在850 mm左右的高位水平。

相关性分析进一步揭示了“降雨-灌溉”的互补机制。降雨量与灌溉量呈显著负相关( $\rho=-0.47$ ),定量证实了灌溉对自然降水波动的补偿作用。值得注意的是,降雨量和灌溉量均与总耗水量呈正相关(分别为 $\rho=0.44$ 和 $\rho=0.41$ ),这意味着无论是自然降水的丰沛还是人为灌溉的增加,最终都转化为作物蒸散发的动力,导致该地区长期处于高耗水状态。

### 3.3. 趋势性和显著性分析

为进一步探究1965~2022年各水文要素的长期演变趋势,本研究采用Mann-Kendall非参数检验法对数据进行了趋势性和显著性检验。降雨量的M-K检验Z统计量为0.63。这表明在过去的58年间,永年区降雨量虽然呈现微弱的上升势头,但在统计学上并未达到显著水平,整体呈现出在巨大波动中维持动态平衡的状态;灌溉量的变化最为剧烈,其Z统计量达到了-2.68,结果证实了近60年来该地区的农田灌溉量呈现出显著的下降趋势;总耗水量的Z统计量为-1.49,表现为不显著的下降趋势。

尽管人为灌溉量已极显著减少,但总耗水量的M-K检验显示其并未发生统计学上的显著下降,表明该地区的农田总耗水量整体上依然表现出极强的“刚性”抗变能力,尚未发生根本性的趋势逆转。

## 4. 结论

本研究基于 SWAP 模型与长序列统计分析, 得出以下结论: 永年区降雨资源年际变化剧烈, 无法为高产农业提供稳定的水分保障。灌溉水通过与降雨的负相关互补机制, 有效地维持了作物的高耗水需求。农田总耗水量表现出高位且稳定的刚性特征。

鉴于该地区降雨量小于耗水量的长期赤字状态及耗水的刚性特征, 单纯依靠传统节水技术难以根本扭转地下水超采局面。建议在推广高效节水灌溉的同时, 通过调整种植结构(如适度压减冬小麦种植面积)、推广休耕轮作制度, 从源头上降低农田系统的“刚性”耗水总量, 以实现区域水资源的可持续利用。

## 参考文献

- [1] Kroes, J.G. and van Dam, J.C. (2003) Reference Manual SWAP Version 3.03. Alterra-Report 773, Alterra, Green World Research.
- [2] 郭帅帅, 马韬, 陈凯文, 等. 不同排水再利用措施对土壤水盐运移的影响[J]. 节水灌溉, 2024(7): 53-61.
- [3] Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D.K., Parihar, S.S. and Sahoo, R.N. (2015) Simulation of Salt Dynamics in the Root Zone and Yield of Wheat Crop under Irrigated Saline Regimes Using SWAP Model. *Agricultural Water Management*, **148**, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.014>
- [4] Utset, A. and Borroto, M. (2001) A Modeling-GIS Approach for Assessing Irrigation Effects on Soil Salinisation under Global Warming Conditions. *Agricultural Water Management*, **50**, 53-63. [https://doi.org/10.1016/s0378-3774\(01\)00090-7](https://doi.org/10.1016/s0378-3774(01)00090-7)
- [5] Crescimanno, G. and Garofalo, P. (2005) Application and Evaluation of the SWAP Model for Simulating Water and Solute Transport in a Cracking Clay Soil. *Soil Science Society of America Journal*, **69**, 1943-1954. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0051>
- [6] Singh, R., van Dam, J.C. and Feddes, R.A. (2006) Water Productivity Analysis of Irrigated Crops in Sirsa District, India. *Agricultural Water Management*, **82**, 253-278. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.027>
- [7] Rezaverdinejad, V., Rezaei, H., Ababaei, B., Ahmadi, H. and Behmanesh, J. (2012) Application of SWAP Agro-Hydrological Model to Predict Crop Yield, Soil Water and Solute Transport under Shallow Groundwater Condition. *Proceedings of the 8th International Soil Science Congress on "Land Degradation and Challenges in Sustainable Soil Management"*, Çeşme-Izmir, 15-17 May 2012, 260-266.
- [8] Qureshi, A.S., Ahmad, W. and Ahmad, A.A. (2013) Optimum Groundwater Table Depth and Irrigation Schedules for Controlling Soil Salinity in Central Iraq. *Irrigation and Drainage*, **62**, 414-424. <https://doi.org/10.1002/ird.1746>
- [9] Huo, Z., Feng, S., Dai, X., Zheng, Y. and Wang, Y. (2012) Simulation of Hydrology Following Various Volumes of Irrigation to Soil with Different Depths to the Water Table. *Soil Use and Management*, **28**, 229-239. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00393.x>
- [10] Verma, A.K., Gupta, S.K. and Isaac, R.K. (2014) Application of Soil-Water-Atmosphere-Plant Model to Assess Performance of Subsurface Drainage System under Semi-Arid Monsoon Climate. *Irrigation and Drainage*, **63**, 93-101. <https://doi.org/10.1002/ird.1783>
- [11] Samipour, F., Rabie, M., Mohammadi, K., et al. (2010) Evaluation of Two Drainage Models in South-West Iran. *9th International Drainage Symposium Held Jointly with CIGR and CSBE/SCGAB Proceedings*, Quebec City, 13-16 June 2010, 1-11.
- [12] 李赛驹, 金建新, 丁一民, 等. 基于 SWAP-IES 作物同化模型的宁夏玉米产量模拟[J]. 节水灌溉, 2024(12): 47-54.
- [13] 王笑影, 周玉科, 温日红, 等. 东北区域冬季气候变异及植被响应时空格局研究[J]. 遥感技术与应用, 2025, 40(6): 1587-1597.
- [14] 屠其璞. 气象应用概率统计学[M]. 北京: 气象出版社, 1984: 222-229.
- [15] Myers, J.J. and Well, A.D. (2003) Research Design and Statistical Analysis. Lawrence Erlbaum.
- [16] Maritz, J.S. (1981) Distribution-Free Statistical Methods. Chapman & Hall.
- [17] 谢文华. Spearman 相关系数的变量筛选方法[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [18] 王钦德, 冯锁江. 关于 Spearman 系数计算公式的论证及应用[J]. 山西农业大学学报, 1993(1): 30-33+89.
- [19] 田甜. 基于 Spearman 秩相关系数法分析水磨河水质变化趋势[J]. 节能与环保, 2019(9): 52-53.
- [20] Abdul Aziz, O.I. and Burn, D.H. (2006) Trends and Variability in the Hydrological Regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of Hydrology*, **319**, 282-294. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.039>