

基于SWAT模型的土地利用变化对产水服务的影响研究

——以东武仕水库流域为例

任 帅¹, 孙建伟², 吕正虎³, 刘芮廷⁴, 刘光辉⁴, 赵 娴⁴

¹河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

²邯郸市水利局节约用水促进中心, 河北 邯郸

³河北省邢台水文勘测研究中心, 河北 邢台

⁴河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2023年10月20日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2023年12月28日

摘 要

水是重要资源, 为生态系统提供服务, 产水服务便是其中之一。产水服务对维持供水安全和保护环境有重要作用, 而土地利用又驱动产水服务发生变化, 因此开展土地利用变化对产水服务影响的研究具有重要意义。通过探究产水服务与土地利用变化的关系, 找出合理的土地利用方式提高产水服务能力, 以平衡生态与社会发展。故本文以东武仕水库流域为研究区, 基于气象、水文、土地利用和土壤等数据构建SWAT模型, 分析了2010、2015、2020三期土地利用对产水服务的影响。结果表明: 随着研究区耕地、林地和草地面积减小, 建设用地、湿地、水域和其他用地面积增加, 产水服务呈上升状态。流域上游的产水服务能力高于下游和中游, 但流域中游的产水量增加程度大于上游和下游。研究结果能为东武仕水库流域水源供给和土地资源合理规划提供科学依据。

关键词

SWAT模型, 土地利用, 产水服务, 东武仕水库

The Impact of Land Use Change on Water Production Service Based on SWAT Model

—A Case Study of Dongwushi Reservoir Basin

Shuai Ren¹, Jianwei Sun², Zhenghu Lyu³, Ruiting Liu⁴, Guanghui Liu⁴, Xian Zhao⁴

¹School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Handan Water Conservation Promotion Center, Handan Water Conservancy Bureau, Handan Hebei

文章引用: 任帅, 孙建伟, 吕正虎, 刘芮廷, 刘光辉, 赵娴. 基于SWAT模型的土地利用变化对产水服务的影响研究[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(12): 1353-1359. DOI: 10.12677/ag.2023.1312130

³Hydrological Survey Research Center, Xingtai Hebei⁴School of Earth Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan HebeiReceived: Oct. 20th, 2023; accepted: Dec. 21st, 2023; published: Dec. 28th, 2023

Abstract

Water is an important resource that provides services for ecosystems, and water production services are one of them. Water production services play an important role in maintaining water supply security and protecting the environment, and land use changes drive water production services. Therefore, it is of great significance to carry out research on the impact of land use change on water production services. By exploring the relationship between water production service and land use change, we can find out reasonable land use methods to improve water production service capacity, so as to balance ecological and social development. Therefore, this paper takes the Dongwushi Reservoir Basin as the research area, constructs the SWAT model based on the data of meteorology, hydrology, land use and soil, and analyzes the impact of land use on water production services in 2010, 2015 and 2020. The results showed that with the decrease of cultivated land, forest land and grassland area in the study area, the area of construction land, wetland, water area and other land increased, and the water production service increased. The water production service capacity of the upper reaches of the basin is higher than that of the lower and middle reaches, but the increase of water production in the middle reaches of the basin is greater than that of the upper and lower reaches. The research results can provide a scientific basis for the rational planning of water supply and land resources in the Dongwushi reservoir basin.

Keywords

SWAT Model, Land Use, Water Yield Service, Dongwushi Reservoir

Copyright © 2023 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

水是人类社会不可或缺的资源，也时刻为生态系统提供着各种各样的服务。土地利用的变化是人类活动对生态系统最直接的影响因素，连接着社会生产发展与自然生态环境。产水服务影响社会发展，而土地利用又是产水服务变化的驱动力，因此开展土地利用变化对产水服务的影响研究有重要意义。

1997年，“生态系统服务”被首次定义，是指生态系统及其过程所产生的环境条件及效用，能够维护人类生存及社会发展[1]。随着与生态系统服务相关的研究逐渐增多，产水服务被学者们根据其研究需要划分出来[2]，由产水量进行表示，对其进行评估有利于保护水资源的数量和质量，维持生态环境的长久与稳定。当前对产水服务进行评估的主要方法为模型法，其中应用最为广泛的是 InVEST 模型，少量的研究中采用了 SWAT 模型。李军涵将潘阳湖流域作为研究区，采用 InVEST 模型对流域的土地利用变化和产水量等进行了分析，探究了生态系统服务的空间变化及其与自然社会因素的关系[3]。杜佳衡等以大理州永平县为研究对象，基于 InVEST 模型探究水生态系统的健康情况，模拟了 3 个时期的产水，并分析了其空间变化规律[4]。张思颖等以龙溪河流域为研究对象，利用 InVEST 模型对流域的产水服务时

空变化进行研究,并分析了不同土地利用类型对产水服务的影响,结果表明耕地对产水服务贡献最大[5]。高秉丽基于 InVEST 模型评估了 1980~2020 年黄河流域产水服务,结果表明不同的土地利用类型其产水能力不同,建设用地产水能力最强,水域最弱[6]。李屹峰等以密云水库为研究区,采用 InVEST 模型对产水量进行了研究,结果表明,森林的扩张削弱了水源供给服务[7]。

与 InVEST 模型相比,SWAT 模型模拟精度高,能综合地形地貌、植被土壤、气象水文等要素进行水文过程的模拟,更加接近自然状况。Notter 等以非洲坦桑尼亚潘加尼为研究区,基于 SWAT 模型研究了产水服务,结果表明区域总体的供水量较低,但空间变化较大[8]。冯娟以泮河中上游流域为研究区,应用 SWAT 模型对产水服务进行了定量评估,分析了产水服务时空变化及其影响因素,结果表明产水能力呈现强后弱的趋势,且越靠近秦岭主脊越强,气候是影响时空分布的主导因素[9]。郑雨轩以东江流域为研究区,通过 SWAT 模型定量评估了流域生态系统产水量,探究其时空变化特征,结果表明产水量年际变化较大,且呈西高东低的空间分布特征[10]。

东武仕水库流域担负着邯郸市部分地区的生产生活用水的重要任务,随着社会经济的发展和城市化的推进,人类活动影响了生态系统。而土地利用变化作为人类活动对生态系统直接影响因素,驱动着产水服务发生改变。通过分析东武仕水库流域土地利用变化对产水服务的影响,来探究有利于产水服务的土地利用方式,进而建立合理的土地利用制度,对生态环境保护和水资源管理具有重要意义。

2. 数据及方法

2.1. 研究区概况

研究区位于邯郸市境内,介于东经 114°01'至 114°21',北纬 36°20'至 36°34'之间,流域控制面积 350 km²,位置分布如图 1 所示。

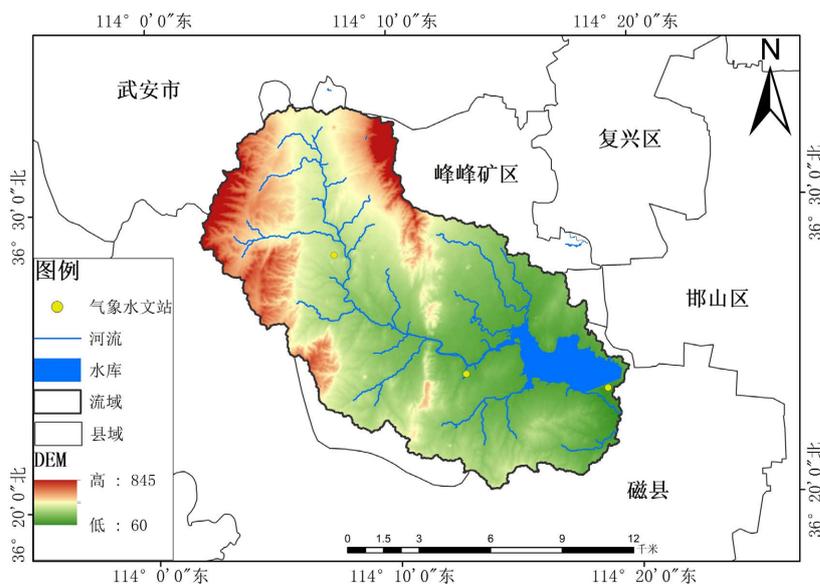


Figure 1. Geographical location map of Dongwushi reservoir basin
图 1. 东武仕水库流域地理位置图

流域地处太行山与华北平原过度地带,西侧是山间盆地,东侧为倾斜平原,地势西高东低。流域内植被分布广泛,主要有针叶林、阔叶林、灌丛、草甸以及水生植被等,且土壤以褐土为主,分为褐土性土及石灰性褐土两个亚类[11][12]。流域属北温带半干旱半湿润的大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季

炎热多雨,年内气温变化较大,平均气温 13.4℃,降雨时空分布不均,年均降雨量 550 mm,多集中于 7、8、9 三个月,占年降雨量的 70%,旱涝灾害交替发生[13][14]。

2.2. 数据获取

本研究用于量化产水服务的数据主要包括 DEM、土地利用、土壤、气象水文等。DEM 数据采用空间分辨率为 12.5 m 的邯郸市遥感影像;土地利用数据选择 2010、2015 和 2020 共 3 期遥感影像,空间分辨率为 30 m,并基于东武仕水库流域的实际地表覆被进行土地利用重分类;土壤数据采用世界土壤数据库的 1:100 万南京土壤所第二次全国调查数据;气象数据为峰峰气象站 2010~2020 年逐日观测数据,包括风速、气温、相对湿度、降水及日照,以及王看雨量站和东武仕雨量站的 2010~2020 年逐日降水数据;水文数据采用东武仕水文站的 2010~2020 逐月径流数据。

2.3. 研究方法

2.3.1. SWAT 模型

20 世纪 90 年代,SWAT 模型由美国农业部农业研究中心研发,经过多个版本的改进,现已成为一款成熟的分布式水文模型,由产汇流子模型、土壤侵蚀子模型、污染负荷子模型 3 部分构成。本文主要使用产汇流子模型进行流域产水量的探究,其基于水量平衡方程计算土壤含水量,公式为:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - Pe_i - QR_i) \quad (1)$$

式中: SW_t 为研究时间末的土壤含水量(mm); SW_0 为初始研究时间的土壤含水量(mm); R_i 为第 i 天的降水量(mm); Q_i 为第 i 天的地表径流量(mm); ET_i 为第 i 天的蒸散发量(mm); Pe_i 为第 i 天存储在土壤剖面底层的渗透量和测流量(mm); QR_i 为第 i 天的地下水回量(mm)。

模型由水文循环的陆地阶段和演算阶段两部分组成,陆地阶段即产流和坡面汇流,演算阶段即为河道汇流[15]。在陆地阶段中,流域内的径流、蒸散发等水文要素因土地利用、土壤和坡度的差异而变化,通过水文响应单元的划分来反映。每个水文响应单元单独计算径流量,计算中需考虑气象水文和地表覆被的影响,然后汇总演算得到总径流量。SWAT 模型计算径流有两种方法,本文选用 SCS 曲线法,如式(2)。蒸散发过程包括裸地、水面蒸发和植物蒸腾,在计算土壤水分蒸发时,潜在蒸发采用潜在蒸散发和叶面积指数进行计算,实际蒸发的依据土壤厚度与含水量的关系进行计算,植物蒸腾通过潜在蒸散发和叶面积指数的关系进行计算[16]。本研究计算潜在蒸散发选用 Penman-Monteith 公式法,如式(3)。

$$Q_s = \frac{(R - I_a)^2}{R - I_a + S} \quad (2)$$

式中: Q_s 为地表径流量(mm); R 为降水量(mm); I_a 为产流前的初损量(mm); S 为滞留参数,通常受土壤、土地利用因素的影响而产生时空差异。

$$ET_0 = \frac{0.408 \times k(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{k + r(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中: ET_0 为参考蒸散量(mm); R_n 为作物表面净辐射(MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量(MJ/(m²·d)); T 为 2 m 高处的日平均气温(℃); U_2 为 2 m 高处的风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); k 为饱和水汽压曲线的斜率(kPa/℃); r 为湿度计常数。

演算阶段主要考虑水在河道中的转移,包括主河道和水库汇流两个部分。主河道演算的模拟过程基于曼宁公式计算流量和流速,基于水文响应单元计算汇流时间和水分损失。如果流域内有水库,在计算

出库径流时,模型提供了三种方法:输入实测出流数据;小水库或无观测数据水库需要规定一个出流量;大水库需要月调控目标。

2.3.2. 数理统计法

模型率定主要是通过调整模型输入参数值,使得模型模拟结果与实测结果拟合的精度不断提高,已达到最佳的模拟状态。SWAT 模型经率定及验证后,需通过统计学方法对模型的适用性进行评价,常用的评价指标包括相关系数 R^2 (式 4)和纳什系数 E_{NS} (式 5)。 R^2 和 E_{NS} 越趋向于 1,拟合程度越高,反之则拟合效果越差,一般认为当 $R^2 > 0.6$ 且 $E_{NS} > 0.5$ 时模型模拟结果可信的[17][18],计算公式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (4)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \quad (5)$$

式中: Q_m 为实测数据值; \bar{Q}_m 为实测数据平均值; Q_s 为模拟数据值; \bar{Q}_s 为模拟数据平均值; n 为数据的数量。

3. 结果与分析

3.1. 土地利用变化

东武仕水库流域的土地利用类型包括耕地、林地、草地、湿地、水域、建设用地和其他用地,其中耕地分布最为广泛,其次为建设用地和草地,其余土地类型分布较少。3 期土地利用数据反映出 2010~2020 年间,建设用地、其他用地、湿地和水域的范围不断扩张,面积分别增加了 5.38、0.55、0.54 和 0.05 km^2 ;林地、草地和耕地的范围不断缩减,面积分别减少了 0.06、2.79 和 3.73 km^2 。东武仕水库流域土地利用面积变化如图 2。

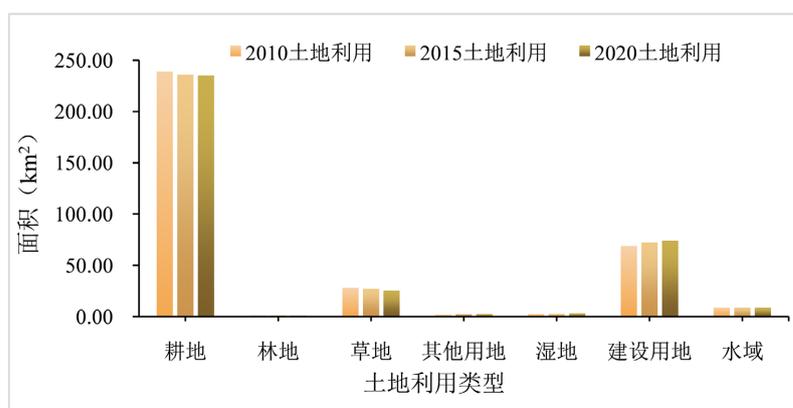


Figure 2. Changes of land use area in Dongwushi reservoir watershed
图 2. 东武仕水库流域土地利用面积变化

3.2. SWAT 模型建立

由于土地类型不合理的转换会对生态系统造成破坏,需要构建模型来研究土地利用变化对产水服务的影响。首先对 DEM 数据进行填洼,以便进行流域河网的提取。然后对土地利用数据和土壤数据进行属性整理和重分类,以便构建与模型的索引关系,其中土壤的理化性质由 HWSD 土壤数据集、SPAW 软

件和数学计算得到。再然后对气象数据进行整理，构建与模型的索引关系。SWAT 模型将研究区划分为 18 个子流域，并以 2010 年为预热期，2011~2015 年为率定期，2016~2020 年为验证期。运用 SWAT-CUP 进行敏感性的分析、率定及验证，并采用相关系数和纳什系数来判断模拟值和实测值的拟合程度。通过多次校正，其中率定期 R^2 和 E_{NS} 分别为 0.88 和 0.83，验证期分别为 0.85 和 0.81，虽然模拟中出现部分峰值拟合度较低的现象，但总体满足了评价要求，适用于东武仕水库流域水文过程的模拟。

3.3. 产水服务变化

产水量由子流域输出文件中的 WYLD 进行表示，即时间步长内离开子流域汇入河段的净水量。模型读取 2010、2015、2020 土地利用，得出相应的年均产水量，如表 1 所示。研究结果显示，随着东武仕水库流域土地利用的变化，产水服务呈现出上升态势。

Table 1. The average annual water yield of each land use

表 1. 各土地利用的年均产水量

土地利用	2010	2015	2020
产水量(mm)	2262	2266	2271

由 3 期土地利用得出的各子流域年均产水量进行空间分布图的绘制，如图 3 所示。3 期土地利用下各子流域年均产水量的取值范围均在 110~150 mm 之间。其中 1 号子流域和 4 号子流域年均产水量最高，为 149 mm；2、3、5、6 号子流域年均产水量也较高，流域中部子流域的年均产水量相对较低，个别子流域略有变化，但流域整体变化不大，空间上体现出流域上游的产水服务要好于下游和中游。但可以看出流域的中游产水量变化较大，这是因为流域中部的土地利用变化较为强烈，地表现状发生改变，不透水表面增加，从而影响了水文循环的过程，如降水下渗减少，导致产水量增加。

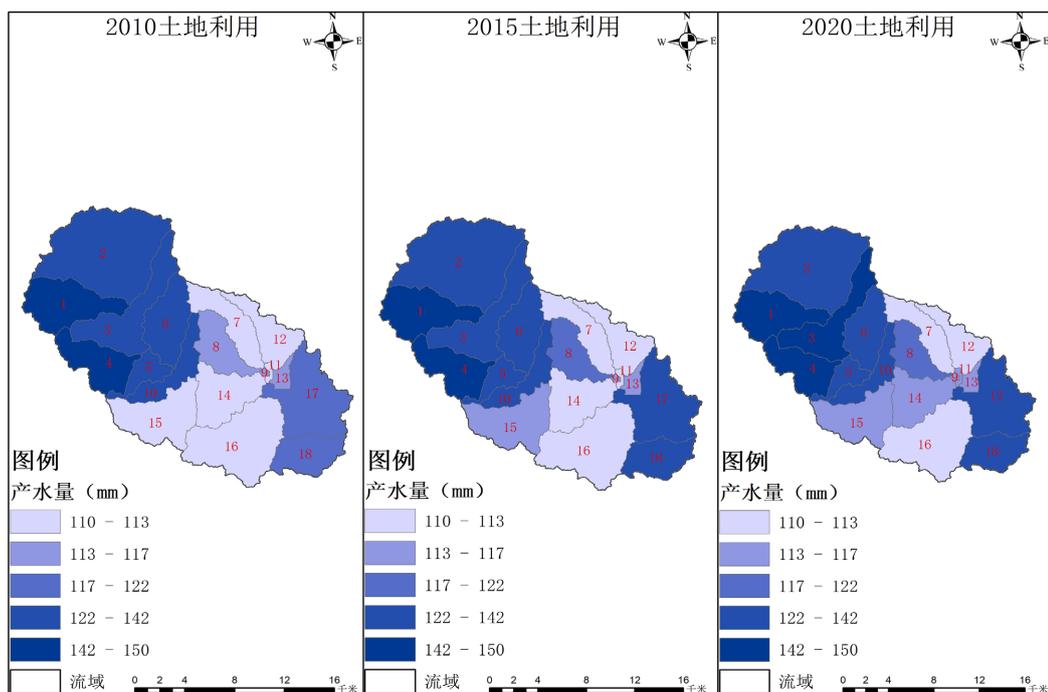


Figure 3. Spatial distribution of water production service in Dongwushi Reservoir Basin

图 3. 东武仕水库流域产水服务空间分布

4. 结论

本文基于 SWAT 模型分析了东武仕水库流域土地利用变化对产水服务的影响, 结果表明: 东武仕水库流域 2001~2020 年土地利用变化为: 建设用地、其他用地、湿地和水域的面积分别增加了 5.38、0.55、0.54 和 0.05 km²; 林地、草地和耕地的面积分别减少了 0.06、2.79 和 3.73 km²。随着土地利用的变化, 东武仕水库流域年均产水量逐渐增加, 产水服务表现为上升趋势。且流域上游产水服务能力较强, 流域中游产水量增加较多。研究结果证明基于气象水文、土地利用和土壤等数据构建的 SWAT 模型适用于产水服务的研究, 且今后的研究可将 SWAT 模型应用到其他生态系统服务之中。

参考文献

- [1] Daily, G.C. (2013) Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems (1997). In: *The Future of Nature*. Yale University Press, New Haven, 454-464. <https://doi.org/10.2307/j.ctt5vm5bn.49>
- [2] 杨旭. 气候和土地利用变化背景下中国西北干旱区产水和水质净化服务评估[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [3] 李军涵. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖流域水源涵养的空间格局研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [4] 杜佳衡, 王锦. 基于 InVEST 模型的大理州永平县水生态系统服务功能时空变化分析[J]. 西部林业科学, 2021, 50(6): 91-102.
- [5] 张思颖, 陈荣蓉, 程先. 重庆龙溪河流域水生态系统服务时空演变及对土地利用变化响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 173-183.
- [6] 高秉丽. 土地利用和气候变化对黄河流域产水服务时空变化的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [7] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736. <https://doi.org/10.5846/stxb201205280787>
- [8] Notter, B., Hurni, H., Wiesmann, U. and Abbaspour, K.C. (2012) Modelling Water Provision as an Ecosystem Service in a Large East African River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, **16**, 69-86. <https://doi.org/10.5194/hess-16-69-2012>
- [9] 冯娟. 基于 InVEST 模型和 SWAT 模型的秦岭北麓水源涵养时空格局分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2021.
- [10] 郑雨轩. 东江流域生态系统产水服务时空变化研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [11] 常亚楠. 峰峰矿区中心城区绿地系统生态规划研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北工程大学, 2016.
- [12] 聂成良. 邯郸市峰峰矿区水资源综合利用研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北工程大学, 2010.
- [13] 王玲. 滏阳河邯郸段水环境容量研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2014.
- [14] 牛灵安. 邯郸市土地利用系统演化及其预测分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [15] 崔素芳. 变化环境下大沽河流域地表水-地下水联合模拟与预测[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [16] 金鑫. 基于 SWAT 模型的土地利用/覆被变化对流域水文过程的影响研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [17] Me, W., Abell, J.M. and Hamilton, D.P. (2015) Effects of Hydrologic Conditions on SWAT Model Performance and Parameter Sensitivity for a Small, Mixed Land Use Catchment in New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**, 4127-4147. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4127-2015>
- [18] Krishnan, N., Raj, C., Chaubey, I., et al. (2018) Parameter Estimation of SWAT and Quantification of Consequent Confidence Bands of Model Simulations. *Environmental Earth Sciences*, **77**, Article Number 470. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7619-8>