

杨娟,郭青霞. 基于水文模型对比建立 SWAT 模型数据库——以黄土丘陵沟壑区岔口流域为例[J]. 江苏农业科学,2020,48(6):251-259.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.06.048

# 基于水文模型对比建立 SWAT 模型数据库 ——以黄土丘陵沟壑区岔口流域为例

杨娟,郭青霞

(山西农业大学资源环境学院,山西晋中 030801)

**摘要:**21 世纪以来,水文模型在国内得到广泛应用,但模型参数众多且数据库建立复杂,基于模型对比分析探究 AnnAGNPS 模型与 SWAT 模型结构算法、输入参数的相似性,在此基础上,选择黄土丘陵沟壑区岔口流域为研究区,以 AnnAGNPS 模型数据库为基础,建立流域 SWAT 模型数据库,并验证其适用性,为高效建库提供依据,实现一定的数据共享性。结果表明:(1)在水文部分,2 个模型模拟径流与蒸发使用相同算法,泥沙侵蚀模拟时,2 个模型采用以 USLE 基础的改进方程,模型气象、土壤和管理等数据库的输入参数大多相同;(2)建立 SWAT 模型空间数据库时,AnnAGNPS 模型的空间数据可直接利用,属性数据库中相同或相似参数可直接继承,其他参数可重置或采取默认值;(3)使用水文模型对比建立的 SWAT 模型数据库模拟,其率定期月径流量相关系数( $R^2$ )=0.67,纳什效率( $NSE$ )=0.61,验证期月径流量  $R^2$ =0.63, $NSE$ =0.59,模型在岔口流域具有较好的适用性。因此,对比分析水文模型并对其数据进行建库利用,能有效提高建库效率,在基于多模型研究岔口流域水土流失奠定基础的同时,也可为其他相关研究提供参考。

**关键词:**SWAT 模型;AnnAGNPS 模型;数据库;岔口流域

**中图分类号:**S157.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)06-0251-09

根据全国第二次遥感调查,黄河流域仍是我国水土流失最严重的地区,水土流失面积高达 46.5 万  $\text{km}^2$ <sup>[1-2]</sup>。党的十八大以来,习近平总书记曾多次考察黄河流域生态保护和他展情况,并将黄河流域

生态保护和高质量发展提升为重大国家战略,他强调要把黄河生态系统作为一个有机整体来谋划,对水土流失严重的黄河中游,要抓好水土保持和污染治理。分布式水文模型是量化和治理水土流失的重要工具,SWAT(soil and water assessment tool)与 AnnAGNPS 模型则是众多模型中应用最为广泛的模型,2 个模型均可预测土地管理措施对流域水、泥沙和养分的贡献及其影响,均与 GIS 接口,使数据可视化且易处理<sup>[3]</sup>。在国内 2 个模型应用广泛,具有较好的实用性和较强的应用潜力,表现在流域水资源

收稿日期:2019-12-04

基金项目:国家自然科学基金(编号:41071345)。

作者简介:杨娟(1994—),女,新疆库尔勒人,硕士研究生,主要从事土地信息技术研究。E-mail:yj3757@126.com

通信作者:郭青霞,教授,主要从事土地利用规划,土地信息技术研究。E-mail:gxq696@163.com。

2009,28(5):1048-1052.

[13]王卫平,薛智勇,朱凤香,等. 不同微生物菌剂处理对鸡粪堆肥发酵的影响[J]. 浙江农业学报,2005,17(5):292-295.

[14]席北斗,刘鸿亮,孟伟,等. 高效复合微生物菌群在垃圾堆肥中的应用[J]. 环境科学,2001,22(5):122-125.

[15]郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. 农业工程学报,2005,21(14):1-4.

[16]张晔. 棉秆作为无土栽培基质的前处理技术及其对黄瓜生长的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2013.

[17]DeLaune P B,Moore P A,Daniel T C,et al. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry litter[J]. Journal of Environmental Quality,2004,33(2):728-734.

[18]Raviv M,Medina S,Krasnovsky A,et al. Organic matter and nitrogen conservation in manure compost for organic agriculture[J]. Compost Science & Utilization,2004,12(1):6-10.

[19]Raviv M,Medina S,Krasnovsky A,et al. Conserving nitrogen during composting[J]. Biocycle,2002,43(9):48-51.

[20]马丽红,黄懿梅,李学章,等. 两种添加剂对牛粪堆肥中氮转化及相关微生物的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(1):76-82.

[21]张蓓. 碳氮比及腐熟菌剂对玉米秸秆发酵的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2012.

[22]Riffaldi R,Levi-Minzi R,Pera A,et al. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses[J]. Waste Management & Research,1996,4(1):387-396.

管理与评价<sup>[4-5]</sup>、水土保持<sup>[6-7]</sup>、面源污染<sup>[8-9]</sup>、管理措施预测<sup>[10-11]</sup>以及气候变化、土地利用变化<sup>[11-13]</sup>的影响等方面,在黄土丘陵沟壑区,赵传普采用 SWAT 模型在延河流域研究土地利用对径流的影响,研究表明相同气象条件下,有效的生态治理措施使流域内径流与基流量减少<sup>[14]</sup>;李娟在泾河流域应用 SWAT 模型研究梯田对河道径流、泥沙的影响,结果表明,梯田能够滞洪补枯,减小河道输沙量<sup>[15]</sup>;闫胜军基于场次降雨利用 AnnAGNPS 模型在岔口流域研究坡改梯工程对径流、泥沙、氮磷负荷量的影响,得出随着坡改梯坡度的降低,其径流量、泥沙量及氮磷负荷量也随之降低<sup>[16]</sup>。2 个模型运行需要大量基础数据,且数据库建立复杂、费时,且基于模型对比,利用 2 个模型异同优势来提高模拟流域水土流失的能力仍有欠缺。本研究以黄土丘陵沟壑区岔口流域为研究区,首先深入对比 2 个模型的结构算法、输入参数和应用等方面。其次在前述工作基础上,以 AnnAGNPS 模型数据库为参考,继承和调整参数,建立岔口流域的 SWAT 模型数据库,并验证其适用性,为高效建库、实现数据共享以及提升黄土丘陵沟壑区相关研究奠定基础。

## 1 研究区概况

岔口小流域属于黄土丘陵沟壑区第二副区,位于山西省临汾市的永和县、隰县与石楼县接壤地带,流域总面积 131.91 km<sup>2</sup>,流域内沟壑纵横,地表起伏较大,平均海拔高度为 1 184 m。研究区属于典型的暖温带半干旱大陆性季风气候区,平均气温 8.6 ℃,多年平均降水量 530.9 mm,年内降水多集中在 7—9 月,约占全年降水量的 62.25%。流域土壤质地以粉沙质壤土为主,结构疏松、孔隙度大,黏粒含量较低,湿陷性较大。由于流域的特殊地理位置、气候和土壤质地,使流域在汛期时易形成历时很短的洪水径流,并且洪水径流内携带大量泥沙和营养物质,导致流域水土流失严重,流域水质也受到一定程度的影响。

## 2 水文模型对比分析

将 SWAT 模型与 AnnAGNPS 模型在结构、算法和输入参数等方面进行对比,探究 2 个模型的相似性,其相似性表现在含义、单位及影响参数因素等方面,为 SWAT 模型接下来在流域的研究提供一定的依据,此外,在流域特征、时间尺度和模拟精度等

方面对 2 个模型的应用进行对比,为初学者在选择适用流域模型时提供参考。

### 2.1 模型结构及算法对比

SWAT 模型是由 701 个方程和 1 013 个中间变量组合而成,主要分为 3 个子模型,分别为水文子模型、泥沙侵蚀子模型与污染负荷子模型,可以准确模拟流域水平衡、泥沙侵蚀输移与污染物迁移等各个过程<sup>[17-18]</sup>。水文子模型考虑了地表径流、壤中流和地下水,模拟步长为日的地表径流采用 SCS 曲线法,Green & Ampt 下渗法模拟日以下步长的地表径流;此外,模型还充分考虑到土壤水的其他路径运动,包括下渗和蒸散发,模型提供 Priestley - Taylor、Penman/Monteith 和 Hargreaves 3 种计算蒸散发方法供用户选择;使用动力蓄水库模型模拟壤中流,模型计算洪峰流量时采用与地表径流量、汇流时间相关的修正推理模型<sup>[19-20]</sup>。泥沙侵蚀与产沙量通过 MUSLE 方程来模拟,MUSLE 方程是以 USLE 为基础的改进方程,不仅能预测长期降雨产沙量,还可预测单次暴雨产沙量,河道泥沙则采用改进的 Bagnold 运移方程演算,模型还可模拟氮、磷化学过程和作物吸收的生物过程<sup>[21-22]</sup>。模型模拟时,首先根据集水面积阈值将流域 DEM 划分为一定数目的子流域,叠加土地利用与土壤图将子流域进一步划分为水文响应单元(hydrologic response unit,HRU),模型是以水文响应单元为基础计算单元,并假定每个 HRU 相互独立。模型首先计算出每个 HRU 的径流、泥沙及污染物负荷,然后将计算结果累加得到该子流域的相关量,最终演算出流域出口的总量<sup>[23]</sup>。SWAT 模型在建模上采用先进的模块化设计思路,每一个环节对应一个子模块,方便模型的扩展和应用,而且对于不同流域、不同研究目的,并非要输入所有子模块的相关参数,要根据研究目的设置符合流域的参数,建立相应数据库。

AnnAGNPS 模型克服了 AGNPS 只能模拟单次降雨的局限性,能够模拟连续时间内流域产流、产沙及污染物负荷。与 SWAT 模型一致,AnnAGNPS 模型可分为水文子模型、泥沙侵蚀子模型和污染负荷子模型,模型参数可分为 8 大类、31 小类,共 500 多个<sup>[24]</sup>。水文模拟过程中,AnnAGNPS 模型采用与 SWAT 模型相同的 SCS 参数法和 Penman 方程计算流域径流与蒸散发,运用 Brooks - Corey 方程和达西定律分别模拟下渗与壤中流,流量峰值计算则采用了 TR55 模型,与 SWAT 模型最大的不同是,

AnnAGNPS 模型并不考虑地下水的影响<sup>[25]</sup>。泥沙模拟部分,模型采用修正的 RUSLE 方程替换原来的 USLE 模型,使泥沙的转化迁移过程更为具体,包括片蚀、沟蚀的计算、侵蚀量向沟道的输移率以及沉积物进入沟道后的迁移量<sup>[26]</sup>。除去生物过程的氮、磷,模型采用 CREAM 计算氮、磷吸附态与溶解态浓度<sup>[27]</sup>。集水单元(Cell)是 AnnAGNPS 模型的基本单元,根据临界源面积(CSA)和最小沟道长度(MSCL)来划分,

而 CSA 和 MSCL 由流域内土地利用类型和地形确定<sup>[28]</sup>,模型认为每个 Cell 对流域出口径流、泥沙及污染负荷的贡献是相互独立的,且由河网连接。模型模拟时,首先计算出每个集水单元的径流、泥沙及污染物负荷、迁移演算,最终累计得到流域出口的总量<sup>[29]</sup>。模型由数据预处理、数据输入编辑、AnnAGNPS 模型和数据输出组成,能够与 ArcView、GIS 的紧密结合。表 1 为模型不同算法比较结果。

表 1 模型结构、算法比较

| 模型          | 水文                        |                   |  |          |           |            |                        |
|-------------|---------------------------|-------------------|--|----------|-----------|------------|------------------------|
|             | 径流                        | 下渗                | 蒸发   | 壤中流      | 地下水       | 洪峰流量       | 河道流量迁移                 |
| SWAT 模型     | SCS 曲线法与 Green & Ampt 下渗法 | 存储演算方法、裂隙流模型结合    | Priestley - Taylor 方法、Penman/Monteith 方法、Hargreaves 方法 | 动力蓄水水库模型 | 浅层含水层蓄水水库 | 推理模型       | 变动存储系数法或 Muskingum 演算法 |
| AnnAGNPS 模型 | SCS 参数法                   | Brooks - Corey 方程 | Penman 方程  | 达西定律     | 不考虑       | TR - 55 模型 | 曼宁公式和河道形状关系            |

| 模型          | 泥沙       |                                 | 污染物负荷                       |
|-------------|----------|---------------------------------|-----------------------------|
|             | 泥沙侵蚀     | 河道迁移                            |                             |
| SWAT 模型     | MUSLE 方程 | 改进的 Bagnold 泥沙运移方程              | EPIC 模型和 QuAl2K 一维稳态水质模型    |
| AnnAGNPS 模型 | RUSLE 方程 | 修正的 Einstein 储存平衡和 Bagnold 指数方程 | 作物生长阶段指数、一级动力学方程和 CREAMS 模式 |

2.2 模型输入参数比较

SWAT 模型与 AnnAGNPS 模型模拟时,需建立空间数据库与属性数据库,2 个模型所需的空间数据一致,包括流域数字高程模型(DEM)、土地利用图与土壤图。因研究目的不同,属性数据库所需的基础数据库也不同,在研究水土流失时,2 个模型属性数据库都要建立气象、土地利用、植物、管理措施和土壤等数据库,因此要获得相关参数。2 个模型气象数据库均包括降水、最高和最低温度、风速、辐射等基础数据,由于 SWAT 模型地表径流的算法不同,在降雨数据制备时,有步长为日和日以下步长 2 种表达方式。此外,AnnAGNPS 模型气象数据还需云覆盖、露点温度等数据,且模型还要输入暴雨类型及年降雨侵蚀力等。SWAT 模型当中土地利用与植被为一个数据库,更多侧重于植被参数,而 AnnAGNPS 模型土地利用与植物数据为 2 个单独数据库。2 个模型作物数据库具有一定相似含义的参数,比如都涉及植物不同生长阶段对于氮、磷的摄取需求和残留物分解等。SWAT 模型作物数据库更注重温度、水分、辐射等对植物的影响数据,包括最适宜温度、最大气孔传导度分数以及辐射利用效率等参数,数据可由实测或参考模型附表获得。相比

之下,AnnAGNPS 模型作物数据库更注重收获前后碳氮比、碳磷比和关于残留物的相关参数,土地利用数据库则描述田块平均年 USLE P 因子、随机糙率、梯田水平距离和坡度等参数。在管理数据库中,2 个模型均阐述了对作物的管理操作类型、时间和瓦沟排水等信息,但 SWAT 模型对城镇相关信息描述更详尽。SWAT 模型管理操作信息有 2 种表达方式,一种是时间表示,另一种是作物成熟时所需的总热单位表示,管理数据库还包含模型重要参数 CN2(径流曲线数),而 AnnAGNPS 模型中的 CN2 为单独数据库,与管理数据库相链接。2 个模型的土壤数据库均包含描述土壤物理性质与化学物质相关的参数,如土壤容重、土壤有效含水量、黏沙比率、土层中有机氮、磷初始浓度等参数,模型的土壤粒级划分与水文性质分组均采用美国农业部的美制标准。

2.3 模型应用比较

由表 2 可知,在大、中、小流域均可使用 SWAT 模型与 AnnAGNPS 模型,一般大、中流域多采用 SWAT 模型,中、小尺度流域多采用 AnnAGNPS 模型,原因在于设计 SWAT 模型时,便针对大尺度复杂流域进行长期模拟,且与 AnnAGNPS 模型数据库

表 2 模型应用比较

| 模型                       | 流域名称   | 流域特征  | 时间尺度       | 模型验证精度  |
|--------------------------|--|---|------------|---|
| SWAT 模型                  | 河套灌区 <sup>[37]</sup>                           | 11 042.45 km <sup>2</sup> ; 年平均降水量 176 mm; 年均引黄量约 50 亿 m <sup>3</sup>   | 年尺度        | 径流: $R^2 = 0.64$ ; $Ens = 0.49$                                       |
|                          | 延河流域 <sup>[6]</sup>                            | 7 725 km <sup>2</sup> ; 年降水量 500 mm   | 月尺度        | 径流: $R^2 = 0.81$ ; $Ens = 0.71$                                       |
|                          | 潮河子流域 <sup>[30]</sup>                          | 6 175 km <sup>2</sup> ; 年均降水量 500 mm; 土壤类型以褐土为主   | 月尺度; 日尺度   | 月尺度: 径流 $R^2 = 0.99$ ; $Ens = 0.98$<br>泥沙 $R^2 = 0.94$ ; $Ens = 0.71$ |
|                          | 小理河流域 <sup>[38]</sup>                          | 807 km <sup>2</sup> ; 汛期多且以暴雨形式出现; 土壤类型为黄土地为主   | 年尺度        | 日尺度: 径流 $R^2 = 0.78$ ; $Ens = 0.6$                                    |
|                          | 岔河小流域 <sup>[31]</sup>                          | 4.087 km <sup>2</sup> ; 年均降水量 1 052.6 mm; 土壤以黄棕壤为主  | 月尺度        | 径流: $R^2 = 0.87$ ; $Ens = 0.84$<br>泥沙: $R^2 = 0.88$ ; $Ens = 0.82$    |
|                          | 紫色土典型流域  | 0.34 km <sup>2</sup> ; 年平均降水量 825.8 mm; 土壤为石灰性钙质紫色土   | 日尺度        | 径流: $R^2 = 0.81$ ; $Ens = 0.76$                                       |
|                          |  |   |            | 泥沙: $R^2 = 0.79$ ; $Ens = 0.68$                                       |
|                          |  |   |            | 有机氮: $R^2 = 0.71$ ; $Ens = 0.65$                                      |
|                          |  |   |            | 有机磷: $R^2 = 0.72$ ; $Ens = 0.69$                                      |
|                          | The Blisanka river basin                       | 374 km <sup>2</sup> ; 多年 5—8 月平均降水量为 510 mm;  | 年尺度        | 径流: 相对误差为 0.029 6   |
|                          |  |   |            | 泥沙: 相对误差为 0.261   |
|                          |  |   |            | TN: 相对误差为 0.261   |
| AnnAGNPS 模型              | The Cheney Lake watershed                      | 2 561 km <sup>2</sup>   | 月尺度        | TP: 相对误差为 0.182   |
|                          |  |   |            | 径流: $R^2 = 0.66$ ; $Ens = -1.5$                                       |
|                          |  |   |            | 泥沙: $R^2 = 0.46$ ; $Ens = -0.6$                                       |
|                          | The Carapelle watershed                        | 506 km <sup>2</sup> ; 多年 3 月平均降水量为 94.9 mm, 9 月降水量为 81.4 mm, 8 月降水量为 6.4 mm                                     | 月尺度        | 径流: $R^2 = 0.62$ ; $Ens = 0.48$                                       |
|                          |  |   |            | 泥沙: $R^2 = 0.72$ ; $Ens = 0.61$                                       |
|                          |  |   |            | 有机磷: $R^2 = 0.6$ ; $Ens = 0.63$                                       |
|                          | 大宁河流域 <sup>[39]</sup><br>岔口小流域 <sup>[40]</sup> | 流域面积 4 181 km <sup>2</sup> ; 年均降水量 1 000 mm 以上; 土壤以黄壤为主<br>126.59 km <sup>2</sup> ; 年平均降水量 510.9 mm; 土壤主要为地带性褐土 | 月尺度<br>日尺度 | 径流: $R^2 = 0.65$ ; $Ens = 0.65$                                       |
|                          |  |   |            | 泥沙: $R^2 = 0.53$ ; $Ens = 0.51$                                       |
|                          |  |   |            | 径流深: $R^2 = 0.90$ ; $Ens = 0.80$                                      |
|                          | 苇子沟小流域 <sup>[32]</sup>                         | 69 km <sup>2</sup> ; 年均降水量 507.7 mm   | 日尺度        | 径流: $R^2 = 0.99$ ; $Ens = 0.99$                                       |
|                          |  |   |            | 泥沙: $R^2 = 0.01$ ; $Ens = -0.31$                                      |
|                          |  |   |            | 径流: 模拟偏差为 -13.94%   |
| The Blisanka river basin | 中田河流域 <sup>[41]</sup><br>紫色土典型流域               | 47.85 km <sup>2</sup> ; 年均降水量为 1 169.3 mm; 土壤以黄沙土为主<br>0.34 km <sup>2</sup> ; 年平均降水量 825.8 mm; 土壤为石灰性钙质紫色土      | 年尺度<br>日尺度 | 总氮负荷: 模拟偏差为 16.16%  |
|                          |  |   |            | 总氮负荷: 模拟偏差为 23.11%  |
|                          |  |   |            | 径流深: 相对误差为 3.03%; $Ens = 0.78$  |
|                          | The Blisanka river basin                       | 374 km <sup>2</sup> ; 多年 5—8 月平均降水量为 510 mm   | 年尺度        | 径流: 相对误差为 -0.075  |
|                          |  |   |            | 泥沙: 相对误差为 0.315   |
|                          |  |   |            | TN: 相对误差为 0.118   |
|                          | The Cheney Lake watershed                      | 2 561 km <sup>2</sup>   | 月尺度        | TP: 相对误差为 0.074   |
|                          |  |   |            | 径流: $R^2 = 0.21$ ; $Ens = -5.67$                                      |
|                          |  |   |            | 泥沙: $R^2 = 0.29$ ; $Ens = -5.71$                                      |
|                          | The Carapelle watershed                        | 506 km <sup>2</sup> ; 多年 3 月平均降水量为 94.9 mm, 9 月降水量为 81.4 mm, 8 月降水量为 6.4 mm                                     | 月尺度        | 径流: $R^2 = 0.5$ ; $Ens = 0.47$  |
|                          |  |   |            | 泥沙: $R^2 = 0.62$ ; $Ens = 0.64$                                       |
|                          |  |   |            | 有机磷: $R^2 = 0.77$ ; $Ens = -2.38$                                     |

相比,制备 SWAT 模型数据库较为方便。在时间尺度上,模型精度结果显示为年尺度 > 月尺度 > 日尺度;泥沙与污染物的运移以径流为基础,模拟误差会依次累加,且影响泥沙、污染物模拟的因素众多,因此,在模拟内容上,其模拟精度通常表现为径流 > 泥沙 > 污染物负荷<sup>[30-32]</sup>。

同一地区采用 SWAT 模型和 AnnAGNPS 模型的研究并不多,高扬等以紫色土典型流域为例模拟流域径流、泥沙与污染物负荷发现,AnnAGNPS 模型和 SWAT 模型对径流模拟最佳,由于流域气候因素的影响,模型对降雨侵蚀因子与土壤侵蚀因子考虑不充分,使得 2 个模型对泥沙模拟效果均不理想,但 AnnAGNPS 模型对污染物模拟效果优于 SWAT 模型<sup>[33]</sup>;Kliment 等对捷克北部 Blšanka river 流域模拟发现,验证期间 AnnAGNPS 模型径流模拟值低于实测值,而 SWAT 模型径流模拟值却高于实测值,泥沙模拟结果显示,2 个模型模拟值均高于实测值,这是由于 Blšanka river 流域地下径流占比较大,导致 2 个模型模拟精度均不理想,但 SWAT 模型的先进模块设计允许用户适当更改,因此在 Blšanka river 流域使用 SWAT 模型更合适<sup>[34]</sup>;Parajuli 等在 Cheney Lake 流域研究流域水质及模型适用性时,在 Red Rock Creek 子流域内率定模型,模型验证在 Goose Creek 内进行,结果显示,2 个模型对径流和泥沙具有良好的模拟效果,但 SWAT 模型对总磷模拟效果优于 AnnAGNPS 模型,可能与流域生物过程相关<sup>[35]</sup>;Abdelwahaba 等在 Carapelle 流域比较 SWAT 模型和 AnnAGNPS 模型模拟效果,研究发现,模型对径流、泥沙的模拟效果相当,但 AnnAGNPS 模型并没有模拟基流量,当一段时间内没有降水时,该模型输出的模拟值可能低于实测值,而 SWAT 模型对径流和蒸散提供了不同选择,模型率定时需具备一定的校准知识<sup>[36]</sup>。表 2 为模型应用比较结果。

根据对比分析,SWAT 模型与 AnnAGNPS 模型具有相同结构,均能连续地按日特征模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀以及次生生态影响;还具有相同或相似算法,模型径流、蒸发采用相同算法,泥沙侵蚀算法都基于通用土壤流失方程(USLE),二者算法相似,河道泥沙迁移也采用相同算法,更进一步,模型也具有相同或相似的输入参数。因此,2 个模型数据库具有可参考性,结合流域实际情况,本研究首次采用以 AnnAGNPS 模型为参考,对 SWAT 模型建库进行详细描述。2 个模型建库所需空间的数

据一致,可直接利用。在气象、土壤和管理措施等属性数据库中,SWAT 模型与 AnnAGNPS 模型具有大量相似性参数,该参数可继承,其他不相似参数可采用默认值或重置。另外,本研究只是对参数共享性进行探讨,具体不同参数的不同模拟特征,还需具体实验模拟验证。

### 3 SWAT 模型数据库建立及模型验证

SWAT 模型空间数据库的建立直接采用 AnnAGNPS 模型空间数据,以 AnnAGNPS 模型属性数据库为参考,SWAT 模型属性数据库继承相似参数,其余参数使用默认值或重置,建立岔口流域 SWAT 模型数据库。

#### 3.1 空间数据库

流域采用 1:1 万,分辨率为 10 m DEM 数据图;流域土地利用现状图以 2013 年 QuickBird 影像为底图对流域实地调查生成;土壤数据由永和县土壤 1:5 万地图矢量化获得。SWAT 模型要求空间数据具有相同投影坐标系,流域空间数据均为 Gauss-Kruger 投影,土地利用和土壤图都转为与 DEM 同样栅格大小的 ESRI Grid 格式,具体如图 1 所示。

#### 3.2 属性数据库

3.2.1 气象数据库 SWAT 模型和 AnnAGNPS 模型的气象数据都以日为基础,并为驱动模型模拟提供水分和能量。SWAT 模型气象数据由气象站获得或天气发生器模拟生成,只有模型指定模拟天气状况或缺少实测数据时,才会使用天气发生器。为了模型模拟精度,实测数据应尽可能从流域内或附近气象站获取。由模型对比分析可知,SWAT 模型气象数据中日降水、日最高和日最低气温、日太阳辐射值、日风速值等可直接继承 AnnAGNPS 模型的数据,AnnAGNPS 模型气象数据通过永和县气象局与岔口小流域内设立的 3 个雨量站实测资料获得。SWAT 模型日相对湿度为永和县气象局 10 年实测数据。由于我国只有少数气象台才能进行逐日太阳辐射的观测,若用邻近站点的辐射观测值代替,往往误差很大,因此,根据曹雯等的经验公式<sup>[42]</sup>计算逐日太阳辐射值。

3.2.2 土地覆盖/植物生长数据库 土地覆盖/植物生长数据库的变化会影响流域的蒸散发性能、土壤入渗能力和植物生长模拟过程,从而对产流产沙等水文过程产生一定的影响,土地覆盖/植物生长

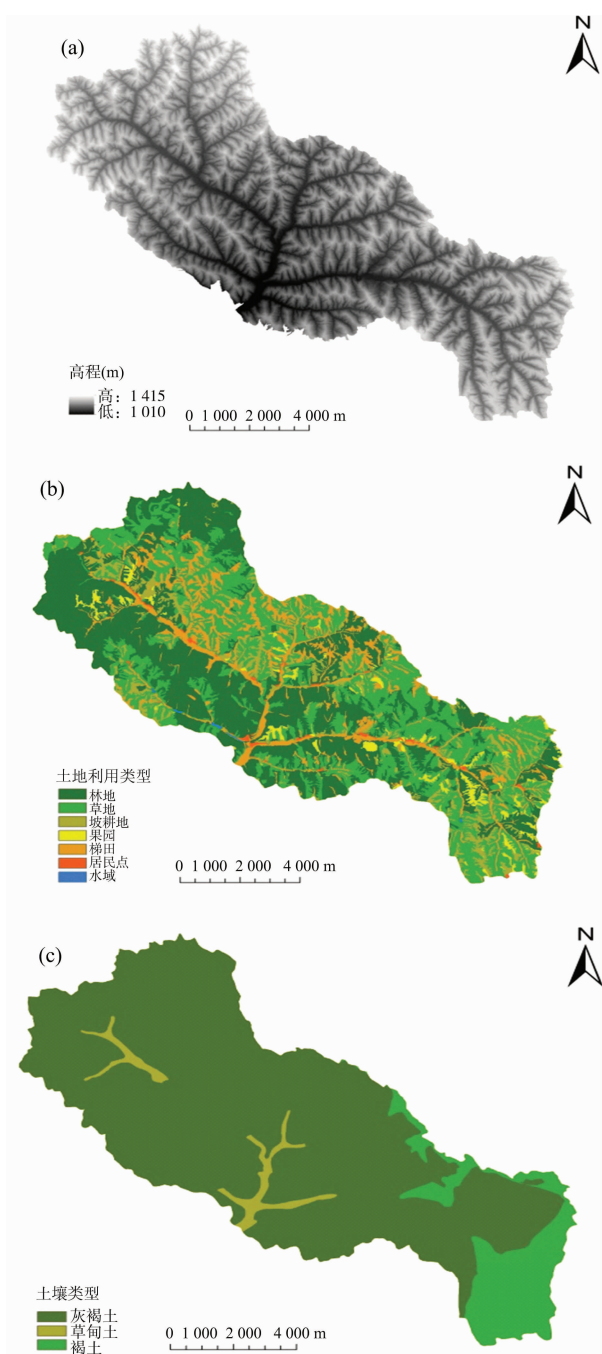


图1 岔口流域DEM(a)、土地利用类型图(b)和土壤类型图(c)

数据库主要涉及植物的生长参数。根据 SWAT 模型的运行要求,将研究区内的梯田、坡耕地、乔木林等主要土地利用类型归类;流域内耕地种植玉米、大豆和马铃薯等作物,其中玉米种植面积约占耕地面积的 87.3%,因此不考虑大豆、马铃薯的影响;种植核桃面积约占果园面积的 59.5%,暂不考虑其他果树的影响。经过对流域土地利用和种植作物归类,最终确定符合流域的覆盖作物类型、代码和相

应生长参数,具体如表 3 所示。

**3.2.3 管理数据库** 不适当的管理操作会导致严重的水土流失,甚至由此引发次生生态环境问题。SWAT 模型根据操作日期或者占潜在热单位的分数方法确定植物的生长状况,岔口流域 SWAT 模型采用操作日期来确定植物的生长状况。经过对岔口流域内每种作物的管理操作的调查,根据土地利用类型、作物类型、操作管理等不同进行归类,发现所有不同操作数达到 93 个,对流域内不同操作数进行适当取舍,最终确定 SWAT 模型作物的管理操作为种植、施肥、收割、耕作、收获和火烧等 7 种操作方式,操作时间如表 4 所示。其中对于森林和草地操作方式及操作日期的确定,发芽期作为生长季开始,植物种子成熟为结束,故流域内林地和草地的操作时间为发芽期和植物种子成熟日期。2 个模型径流量计算采用 SCS 曲线法,径流曲线数(CN)是影响模型产流计算的重要参数。CN 值与土壤质地、土地利用方式和降雨前的土壤湿润状况有关,在具体考虑 CN 取值时,也应考虑不同的覆盖条件、管理措施及地表的粗糙度对径流产生的影响。流域 CN 值根据 AnnAGNPS 模型参数值和研究区实际情况进行设置。

**3.2.4 土壤数据库** SWAT 模型中土壤数据分为物理特征数据和化学特征数据 2 种,物理特征数据控制水和气在土壤剖面中的运动,主要影响 HRU 的水循环,因此,需输入与流域相符合的物理特征数据。化学特征数据指土壤所含有的氮、磷营养物质的初始含量,一般情况下对此数据不必进行更改,只有特殊情况时需针对流域实际情况输入与之相符的化学特征数据<sup>[43]</sup>,而岔口流域无城镇分布、无大型养殖场和工业企业,所以并不考虑流域土壤的化学特征,更注重土壤的物理特征数据。SWAT 模型与 AnnAGNPS 模型的土壤粒级划分都采用美国农业部的美制标准;SWAT 模型的水文性质分组采用美国农业部自然资源保护局 1996 年的划分标准,AnnAGNPS 模型水文性质分组采用美国农业部 1986 年的划分标准,虽然 2 个模型采用的水文性质分组划分标准年份不同,但区别不大。基于 2 个模型基础标准一致,SWAT 模型土壤数据可根据 AnnAGNPS 模型进行建立。黏粒含量、粉粒含量、沙粒含量直接参考 AnnAGNPS 模型的相应参数,有效含水量与饱和渗透系数根据粒径含量和 SPAW 软件获得,湿土的反照率与 USLE - K 因子由经验公式

表 3 流域土地利用现状基本信息统计

| SWAT 模型土地利用类型 | SWAT 模型代码 | 岔口土地利用类型 | 主要作物    | 面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 占总面积比<br>(%) |
|---------------|-----------|----------|---------|--------------------------|--------------|
| 耕地            | AGRR      | 梯田,坝地    | 玉米      | 15.99                    | 12.60        |
|               | AGRL      | 坡耕地      | 玉米      | 9.33                     | 7.35         |
| 果园            | ORCD      | 果园       | 核桃      | 3.77                     | 2.97         |
| 林地            | FRST      | 乔木林,未成林  | 乔木      | 51.14                    | 40.30        |
| 草地            | PAST      | 高密草、低密草  | 高密草、低密草 | 45.66                    | 35.98        |
| 居民点           | URLD      | 居民点      |         | 0.81                     | 0.64         |
| 水域            | WATR      | 水域       |         | 0.19                     | 0.15         |

表 4 流域内主要农事活动时间

| 土地利用类型 | 日期       | 管理措施   |
|--------|----------|--------|
| AGRR   | 4 月 21 日 | 底肥     |
|        | 4 月 23 日 | 旋耕(耕作) |
|        | 5 月 4 日  | 耕种     |
|        | 9 月 2 日  | 收割     |
|        | 11 月 5 日 | 焚烧     |
| FRST   | 3 月 15 日 | 耕种     |
|        | 9 月 20 日 | 收获     |
| PAST   | 3 月 15 日 | 耕种     |
|        | 9 月 15 日 | 收获     |
| ORCD   | 3 月 15 日 | 耕种     |
|        | 10 月 1 日 | 收获     |

获得。流域土壤数据如表 5 所示。

3.3 模型模拟及验证

模型将岔口流域划分为 31 个子流域、546 个 HRU,率定和验证分别采用 2011—2015 年和 2016—2017 年岔口把口站实测月径流数据。本研究利用 SWAT - CUP 对径流较敏感的参数进行率定,最终确定其参数范围,并进行验证(图 2),敏感参数包括径流曲线数(CN2)、土壤有效含水量(SOL - AWC)、平均坡长(SLSUBBSN)、基流消退系数( ALPHA - BF)等。模型用相对误差(Re)、相关系数( $R^2$ )和纳什系数(NSE)来评价模型的模拟精度,一般认为地表径流相对误差在 15% 内, $R^2 > 0.6$ , $NSE > 0.5$  则可接受模型模拟结果。

表 5 流域土壤属性

| 土种名称 | 土种代码 | 土层 | 美国制粒径含量(%) |    |    | 有效含水量 | 饱和渗透系数 | USLE - K |
|------|------|----|------------|----|----|-------|--------|----------|
|      |      |    | 黏粒         | 粉粒 | 沙粒 |       |        |          |
| 褐土   | HT   | 1  | 21         | 57 | 22 | 0.22  | 7.32   | 0.21     |
|      |      | 2  | 22         | 61 | 17 | 0.17  | 4.55   | 0.2      |
|      |      | 3  | 24         | 60 | 16 | 0.23  | 3.1    | 0.24     |
|      |      | 4  | 21         | 57 | 22 | 0.22  | 3.37   | 0.23     |
| 灰褐土  | HHT  | 1  | 19         | 60 | 21 | 0.22  | 9.04   | 0.23     |
|      |      | 2  | 20         | 59 | 21 | 0.22  | 7.16   | 0.22     |
|      |      | 3  | 22         | 58 | 20 | 0.21  | 3.71   | 0.22     |
|      |      | 4  | 20         | 61 | 19 | 0.22  | 3.4    | 0.24     |
| 草甸土  | CDT  | 1  | 16         | 66 | 18 | 0.24  | 9.71   | 0.24     |
|      |      | 2  | 21         | 58 | 21 | 0.19  | 6.77   | 0.21     |
|      |      | 3  | 23         | 58 | 19 | 0.23  | 3.29   | 0.21     |
|      |      | 4  | 23         | 64 | 13 | 0.2   | 2.36   | 0.26     |
|      |      | 5  | 18         | 59 | 23 | 0.19  | 4.8    | 0.19     |

图 2 反映了 SWAT 模型在岔口流域的模拟效果,在率定期间内曲线多数拟合较好,实测与模拟的月径流量变化趋势基本一致,其 Re、 $R^2$  和 NSE 分别为 -1.6%、0.67 和 0.61,但模型在降雨较集中期间,会出现低估径流峰值的情况;与率定期相比,验

证期曲线拟合效果相对较差,但变化趋势相对一致,其 Re、 $R^2$  和 NSE 分别为 14.4%、0.63 和 0.59,模型验证期情况与率定期相同,会低估径流峰值。总体而言,岔口流域率定期与验证期的  $R^2$  和 NSE 均大于 0.5,且月径流量变化趋势相对一致,因此



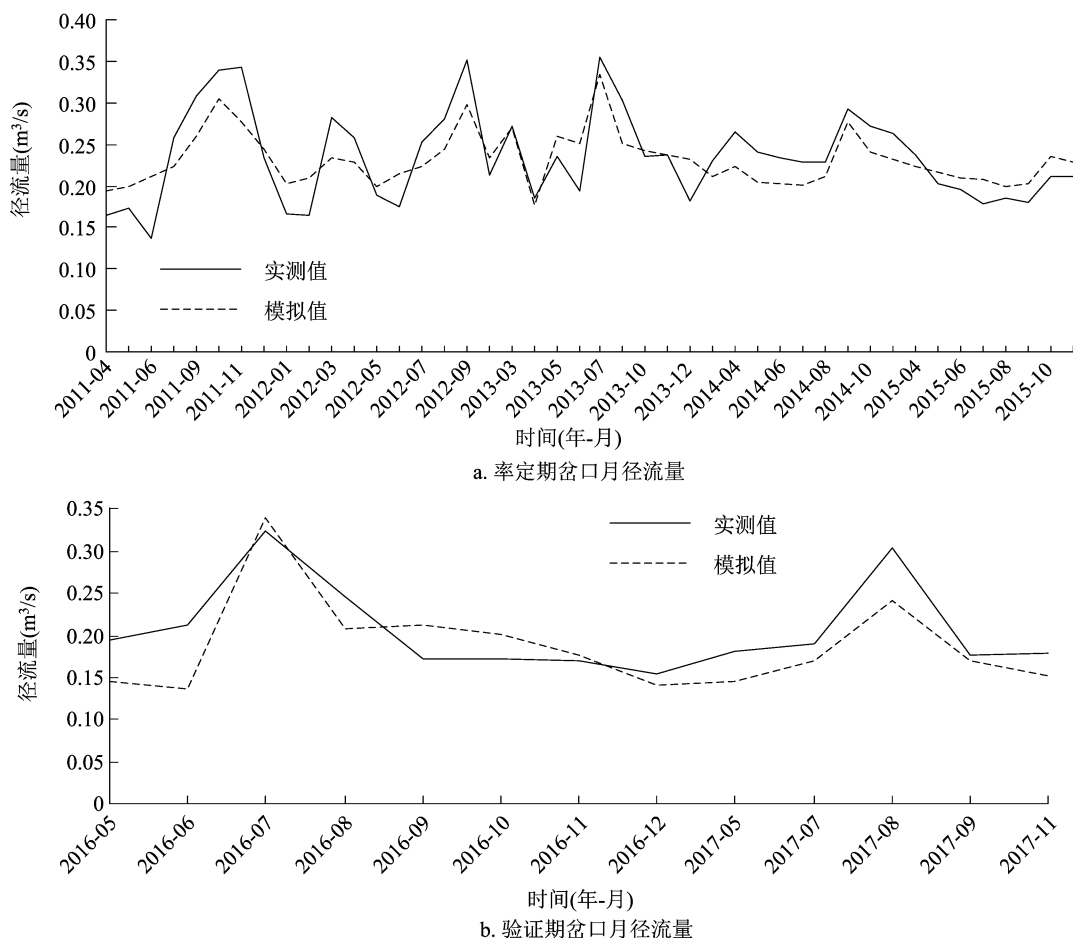


图2 岔口把口站月径流量实测值与模拟值比较

SWAT 模型满足了岔口流域模拟产流运用要求。

#### 4 结论

SWAT 模型与 AnnAGNPS 模型具有相同或相似的结构算法及输入参数。模型均可模拟评估流域水文、泥沙与次生生态影响,其中水文与泥沙具有部分相同或相似算法。模型气象、土壤和管理措施等具有大量相似输入参数,包括降水、土壤基础物理性质参数、CN2 等。

建立 SWAT 模型数据库时,空间数据可直接使用 AnnAGNPS 模型的空间数据;属性数据库包含的大量相似参数也可直接利用,其余参数可取默认值或结合流域、参考附表信息设置。

SWAT 模型模拟月径流量,其率定期和验证期月径流量相关系数( $R^2$ )和纳什效率(NSE)均大于 0.5,符合模拟标准且具有较好的适用性。由此可知,AnnAGNPS 模型数据库可为 SWAT 模型数据库提供参考,大大节省了时间和工作量,有利于减少

不必要的重复研究,实现一定的数据共享,从而获取更加合理、科学、准确的数据,为流域之后的研究奠定基础。

#### 参考文献:

- [1] 刘 通. 国家级水土流失重点防治区生态补偿的若干问题解析[J]. 中国经贸导刊,2011(2):49-51.
- [2] 高健翎,高云飞,岳本江,等. 人民治理黄河 70 年水土保持效益分析[J]. 人民黄河,2016,38(12):20-23.
- [3] 于 峰,史正涛,彭海英. 农业非点源污染研究综述[J]. 环境科学与管理,2008,33(8):54-58,65.
- [4] 谢子波,朱 奎,鲁 帆,等. 基于水循环模拟的潮白河流域蓝水绿水资源变化趋势分析[J]. 水文,2019,39(1):44-49,32.
- [5] 朱 磊,李怀恩,李家科,等. 考虑非点源影响的水源地水库水质预测研究[J]. 水土保持通报,2012,32(3):111-115.
- [6] 龚珥夫,李占斌,李 鹏,等. 基于 SWAT 模型的延河流域径流侵蚀能量空间分布[J]. 农业工程学报,2017,33(13):120-126.
- [7] 田耀武,黄志霖,肖文发,等. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡水库生态屏障区径流与土壤侵蚀的变化[J]. 西北林学院学报,2014,29(6):24-28,51.



- [8] 宋兰兰,郝庆庆,王文海. 基于 SWAT 模型的复新河流域非点源污染研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(4):94-98.
- [9] Wang J L, Chen C L, Ni J P, et al. Assessing effects of “source – sink” landscape on non – point source pollution based on cell units of a small agricultural catchment[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(9):2048-2062.
- [10] 荣 琨,李学平,杨 茜,等. 基于 SWAT 模型的晋江西溪流域绿水管理措施效益成本分析[J]. 水土保持通报,2019,39(1):137-141.
- [11] 白 静. 基于 AnnAGNPS 模型的小流域土地利用最佳管理措施研究[D]. 太原:山西大学,2014.
- [12] 陈 鑫,刘艳丽,刁艳芳,等. 基于 SWAT 模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(4):9-18.
- [13] 钟科元,陈兴伟,陈 莹,等. 地形和土壤/土地利用空间聚合对径流和输沙量影响的 AnnAGNPS 模拟[J]. 农业工程学报,2016,32(8):127-135.
- [14] 赵传普. 基于 SWAT 模型的延河流域土地利用对径流影响模拟研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
- [15] 李 娟. 梯田措施对泾河流域水沙变化的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [16] 闫胜军. 岔口小流域 AnnAGNPS 模型验证和坡改梯生态效益分析[D]. 晋中:山西农业大学,2014.
- [17] 王 莉. 基于 SWAT 模型的气候变化对水资源影响研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [18] Malagó A, Bouraoui F, Vigiai O, et al. Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River Basin with SWAT[J]. The Science of the Total Environment, 2017, 603-604(5):196-218.
- [19] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(1):79-86.
- [20] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1):73-89.
- [21] 康杰伟. SWAT 模型运行结构及文件系统研究[D]. 南京:南京师范大学,2008.
- [22] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型:理论方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [23] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟——以密云水库水源地保护为例[D]. 北京:北京师范大学,2007.
- [24] 邬明伟. 基于 AnnAGNPS 模型的中田河流域非点源污染模拟研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [25] 赵中华. 基于 AnnAGNPS 模型的桃江流域农业非点源污染研究[D]. 南昌:南昌大学,2012.
- [26] 元 潘. 基于 AnnAGNPS 模型的砭砂岩小流域产沙模拟及其机理分析[D]. 西安:西北大学,2016.
- [27] 邹桂红,崔建勇. 基于 AnnAGNPS 模型的农业非点源污染模拟[J]. 农业工程学报,2007,23(12):11-17.
- [28] 贾宁凤. 基于 AnnAGNPS 模型的黄土高原小流域土壤侵蚀和养分流失定量评价[D]. 北京:中国农业大学,2005.
- [29] 赵串串,高端梅,章青青. 基于 AnnAGNPS 模型的罗李村子流域水文模拟与评价[J]. 水土保持研究,2017,24(2):137-141.
- [30] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究,2007,14(6):88-93.
- [31] 张展羽,司 涵,孔莉莉. 基于 SWAT 模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J]. 农业工程学报,2013,29(2):93-100.
- [32] 涂宏志,侯 鹰,陈卫平. 基于 AnnAGNPS 模型的苇子沟流域非点源污染模拟研究[J]. 农业环境科学学报,2017,36(7):1345-1352.
- [33] 高 扬,朱 波,周 培,等. AnnAGNPS 和 SWAT 模型对非点源污染的适用性研究——以中国科学院盐亭紫色土生态试验站为例[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2008,26(6):567-572.
- [34] Kliment Z, Kadlec J, Langhammer J. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi – empirical erosion models[J]. Catena, 2007, 73(3):286-299.
- [35] Parajuli P B, Nelson N O, Frees L D, et al. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA – CEAP agricultural watersheds in South – central Kansas[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(5):748-763.
- [36] Abdelwahab O M, Ricci G F, de Girolamo A M, et al. Modelling soil erosion in a Mediterranean watershed: comparison between SWAT and AnnAGNPS models[J]. Environmental Research, 2018, 166(6):363-376.
- [37] 欧阳威,黄浩波,张 璇,等. 基于 SWAT 模型的平原灌区水量平衡模拟研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(1):17-22.
- [38] 付金霞. 小理河流域径流泥沙对气候和土地利用变化的响应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [39] 花利忠,贺秀斌,颜昌宙,等. 三峡库区大宁河流域径流泥沙的 AnnAGNPS 定量评价[J]. 水土保持通报,2009,29(6):148-152.
- [40] 闫胜军,郭青霞,闫 瑞,等. AnnAGNPS 模型在黄土丘陵沟壑区小流域的适用性评价[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):13-19,25.
- [41] 席 庆. 基于 AnnAGNPS 模型的中田河流域土地利用变化对氮磷营养盐输出影响模拟研究[D]. 南京:南京农业大学,2014.
- [42] 曹 雯,申双和. 我国太阳总辐射计算方法的研究[J]. 大气科学学报,2008,31(4):587-591.
- [43] Arnold J G, Kiniry J R, 邹松兵,等. SWAT 2009 输入输出文件手册[M]. 郑州:黄河水利出版社,2012.