

陈磊, 李爽, 王国波, 等. 基于流域属性和参数敏感性的相似流域识别方法[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1337-1344.

CHEN Lei, LI Shuang, WANG Guo-bo, et al. Identifying similar basins in ungauged catchments based on attribute and parameter sensitivity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1337-1344.

基于流域属性和参数敏感性的相似流域识别方法

陈磊, 李爽, 王国波, 沈珍瑶*

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要:以三峡库区大宁河流域为例,提出了基于流域属性和模型敏感性参数两种相似流域的识别方法。案例研究结果表明,基于参数敏感性法的相似流域识别结果较好,评价标准等级划分精细程度会影响属性法的结果。当评价标准很精细时,两种相似流域识别方法得到的结果趋于一致,表明两种方法均可用于相似流域判定。同时,两种方法各有其适应性,在实际应用时可将两种方法相结合,以便获得更为精确的识别结果。本研究所提出的方法有助于改善农业非点源污染模拟技术,实现农业非点源污染影响的准确量化。

关键词:非点源污染; SWAT 模型; 参数移植法; 相似性评价; 三峡库区

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)07-1337-08 doi:10.11654/jaes.2017-0802

Identifying similar basins in ungauged catchments based on attribute and parameter sensitivity

CHEN Lei, LI Shuang, WANG Guo-bo, SHEN Zhen-yao*

(School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Identifying similar basins in ungauged catchments is a foundation of agricultural non-point source pollution simulation. Using Daning watershed as a case study, two methods were proposed to identify similar basins based on attribute and parameter sensitivity. The results indicated that the method to identify similar basins based on parameter sensitivity performed well. The precise degree of evaluation criteria levels has an impact on the result of attribute method. When the evaluation criterion levels are particularly precise, the identified results of the two methods tend to be consistent. Thus both the two methods could identify similar basins. However, the two methods have different applicability. In practical applications, combining the two methods would obtain more accurate results. The methods proposed in this paper will be of great importance in improving agricultural non-point source pollution simulation techniques and quantifying the impact of non-point source pollution.

Keywords: non-point source pollution; Soil and Water Assessment Tool (SWAT); parameter transfer method; similarity evaluation; Three Gorges reservoir

农业非点源污染导致环境污染事件频发,已成为当前环境治理的关键课题之一,科学有效地控制农业非点源污染是当前农业可持续发展和水环境保护亟待解决的重要问题。模型模拟是进行农业非点源污染评估的主要技术手段,目前广泛用于农业面源污染评

价的机理模型包括 AnnAGNPS、AGNPS、ANSWERS、SWRRB、HSPF 和 SWAT 等^[1]。这些机理模型可以很好地描述农业面源污染发生的过程,并通过构建流域内各要素间的数值关系,量化农业非点源对于河流(湖泊)水环境的影响。如赵倩等^[2]运用 AnnAGNPS 对柴

收稿日期: 2017-06-06

作者简介: 陈磊(1982—),男,河北唐山人,副教授,从事农业面源污染研究工作。E-mail: 13756892980@163.com

* 通信作者: 沈珍瑶 E-mail: z.y.shen@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579011, 51409003)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51579011, 51409003)

河上游流域农业非点源污染负荷进行了估算;Liu等^[3]运用SWAT模型评估了最佳管理措施对农业非点源污染的影响。但由于我国农田-地表水系统监测网络的相对滞后,导致监测数据缺失,这也成为流域农业非点源污染评价亟待解决的关键问题。开展数据缺失下的农业非点源污染模型应用研究,有助于量化农业非点源污染影响、实现农业非点源污染的有效防治。

在监测数据缺失的情况下,利用已有的监测站点率定得到的模型参数在空间上进行移植成为必不可少的技术手段,并被广泛地应用于流域水文研究中,其中相似流域识别是模型参数移植的前提和关键。其主要实现途径是通过寻找与缺资料流域特征最为相似的流域,并将有监测资料流域的相关参数移植到缺资料流域,从而实现缺资料流域的非点源污染预报^[4]。目前基于相似流域的水文模拟方法主要有参数等值线法、水文比拟法、地区经验法以及区域化方法等,其中参数移植法与参数回归法为目前常用的两种区域化方法。参数回归法通过建立有资料流域与缺资料流域特征值之间的多元回归方程,然后由缺资料流域的物理属性推求其他参数^[5-6]。参数移植法主要基于属性相似法和距离相近法^[8-9],寻找与缺资料流域属性特征最为相似的流域,并将参证流域的相关参数移植到缺资料流域^[7]。距离相近法指的是目标流域与其距离最近的参证流域具有相似的水文过程和模型参数。由于降雨条件、地表结构以及土地利用等因素的差异,该方法的参数移植效果不一定令人满意。目前关于相似流域分析的研究更多集中在水文领域,如何基于非点源污染过程进行流域相似性判断,并在此基础上开展缺资料地区的非点源污染评价是目前研究的难点。本文提出了基于流域属性和模型敏感性参数的两种相似流域识别方法,并以三峡库区大宁河流域为例,分析了两种方法的适用性。

1 材料和方法

1.1 相似流域识别的基本理念

基于水文过程的相似流域判定本质上是寻找与缺资料流域相似的有资料的参证流域,在参证流域构建水文模型,并将参证流域的参数移植到缺资料流域,这为基于非点源污染的相似流域判定提供了较好的思路。借鉴水文学研究的最新研究进展,本研究提出了基于流域属性和模型参数敏感性的两种相似流域判定方法。其中属性相似可以定义为有资料和缺资料流域具有相同或相似的驱动力条件、下垫面结构特

征、水流动力特征等流域属性^[10-11]。流域属性法是相似流域判定的重要方法,通过比较影响非点源污染过程的气候、地形、植被等指标的相似性识别相似流域。参数敏感性法主要通过对目标流域和参证流域进行模型参数敏感性分析,明确各个流域的敏感性参数的分布情况,并将敏感性参数分布相似的流域定义为相似流域。在有资料的参证流域构建非点源污染评价模型,并将参证流域获得的模型参数作为与其相似的缺资料流域的参数,从而实现缺资料流域的农业非点源污染预报。

1.2 基于属性的相似流域识别方法

(1) 相似指标体系构建

已有研究表明,流域内影响非点源污染的主要因素包括水文气象要素、下垫面要素、土地利用要素、土壤要素以及人类活动影响要素等。因此流域属性指标也从这5个方面着手^[4,7],基于非点源污染过程的流域相似性评价指标体系如图1所示,共包含了5个一级指标,12个二级指标。

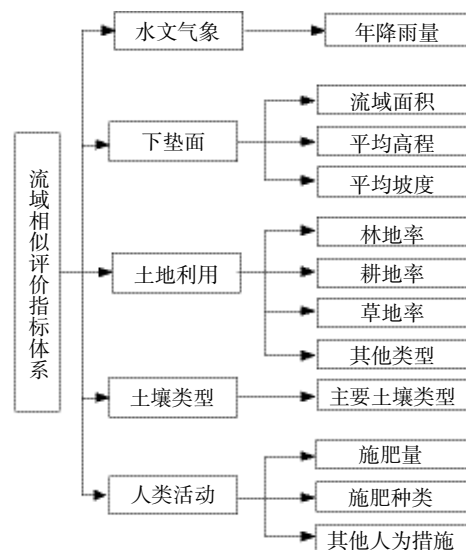


图1 流域相似性评价指标体系

Figure 1 Basin similarity evaluation index system

(2) 相似元计算

在本研究中,将目标流域和参证流域所包含的共有的属性和特征,且在具体数值上存在差异的要素所构成的组合单元称为相似元^[12]。若相似元值为负值表明流域相似性较差。相似元计算公式为:

$$q(u_i) = \frac{y_r - |y_r - y_s|}{y_r} \quad (1)$$

式中: $q(u_i)$ 为相似元值; y_r 为流域A的属性特征值; y_s

为流域 B 的属性特征值。

(3) 相似权重计算

由于流域许多指标之间的相关性可能会造成信息的大量重叠,甚至掩盖其内在规律,因此需要先对选定的评价指标进行相关性检验。由于不同流域指标的相似程度存在显著差异,因此需量化每项指标的权重,以表征不同指标对于流域相似度的影响。本文采用变异系数法评估各项指标的权重,通过每个指标包含的信息计算各个指标的权重,以消除量纲不同的影响。各项指标的变异系数计算如下:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{\bar{x}_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: V_i 是第 i 项相似指标的变异系数; σ_i 是第 i 项指标的标准差; $\bar{x}_i$ 是第 i 项指标的平均值。

各项指标的权重为:

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (3)$$

(4) 相似度计算

相似度是基于流域属性的相似流域判定方法的最终量化指标,具体包含相似要素数量、相似元数值、各个相似元权重系数的函数集合^[13],流域相似度可以表示为:

$$\text{Similar}(A, B) = \frac{n}{k+l-n} \sum_{i=1}^n \beta_i q(u_i) \quad (4)$$

式中:流域 A 由 k 个特征要素构成,流域 B 由 l 个特征要素构成,两流域间相似特征要素的数量为 n ,每个相似元记为 $q(u_i)$,各个相似元的权重系数为 β_i 。

1.3 基于参数敏感性的相似流域识别方法

机理模型是流域水文过程和非点源污染过程的概化,流域过程在模型中通过一定的函数关系式表达。模型参数是流域过程和属性的概化,模型构建过程的核心是确定模型内部函数的相关参数。各流域的气候、地形等属性存在差异,导致不同流域的模型参数也不尽相同。参数敏感性在数值上表现为参数变化对模型模拟结果的影响,其差异反映了流域间的水文过程、污染发生过程的差异,其大小也一定程度上反映了非点源污染产生的主导过程。敏感性分析是分析模型对参数的响应程度,具体操作是在参数最佳估计值附近给定一个微小干扰,并计算参数在这一很小范围内产生波动所导致模型输出的变化率。敏感性分析不受观测资料的限制,对于缺资料地区同样适用,若两个流域的敏感性参数相同且在敏感度排序上具有

一致性,一定程度上说明这两个流域具有相似的非点源污染过程,则可以将具有相同参数敏感性或者参数敏感性排序一致的流域判断为相似流域。

参数敏感性分析方法有傅里叶分析法、摩尔斯分类筛选法(OAT)^[16]、拉丁超立方抽样法(LHS)以及结合两者的 LH-OAT 方法^[17-18]等。本文采用较为常见的 LH-OAT 方法进行参数敏感性分析,具体方法是选定众多参数中的一个变量,进而在该变量阈值范围内随机改变变量值,运行模型得到该变量不同值对应的目标函数值,最终运用基本影响值来判断参数变化对输出值的影响程度,这种方法具有易于编程实现和运行、计算效率高和单个参数敏感性特征明显的特点。同时本文采用传统的摩尔斯平均系数作为敏感性大小的判别指标。

$$SN = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i)/Y_0}{(P_{i+1} - P_i)/100} / n \quad (5)$$

式中: SN 为敏感性判别因子; Y_i 为模型第 i 次运行输出值; Y_{i+1} 为模型第 $i+1$ 次运行输出值; Y_0 为参数调整后计算结果初始值; P_i 为第 i 次模型运算参数值相对于校准后参数值的变化百分率; P_{i+1} 为第 $i+1$ 次模型运算参数值相对于校准后初试参数值的变化百分率; n 为模型运行次数。

基于上述,本研究对相似流域的判定过程为:

(1) 初步构建流域非点源污染模型,通过大量的参数抽样获得不同模型参数组,代入流域非点源污染模型分析模拟,得到参证流域和目标流域各自的敏感性参数;

(2) 若参证流域与研究流域具有相同的敏感性参数且排序一致,则判断两流域为相似流域。相同排序的敏感性参数越多,则说明两个流域相似程度越高。

(3) 如参证流域与研究流域的敏感性参数不同,也可依据 1.2 节的方法进行流域间的相似度判断。

2 案例研究

2.1 研究区介绍

本研究选择位于三峡库区上游的一级支流大宁河流域巫溪段作为研究对象。巫溪段流域总面积为 2422 km² (图 2),地貌以山地为主,丘陵分布少,平均海拔 1197 m,多年平均气温 18.4 ℃,多年平均降水量 1 049.3 mm。土地利用方式主要以森林为主 (占比 65.8%),农田次之 (占比 22.2%),草地面积占比 11.4%。

本研究所需的基础数据包括:流域内部雨量站的

降雨数据,气象数据(温度、湿度、风速、太阳辐射),流域数字高程图、土地利用数据、土壤数据等。主要包含的监测数据有 2000—2008 年月流量监测数据和月总磷监测数据。详细数据来源如表 1 所示。

根据大宁河水系结构和课题组前期研究,将大宁河流域划分成 22 个子流域(图 3)。由于受地理条件、人力财力等限制,只有巫溪水文站(13 号子流域出口)具有水质监测站点,这就给非点源污染的准确评价造成了困难。在对各子流域特征和模型参数敏感性研究的基础上,本研究对 22 个内部流域进行了相似性识别,并对缺资料地区的相似流域识别方法进行了验证。

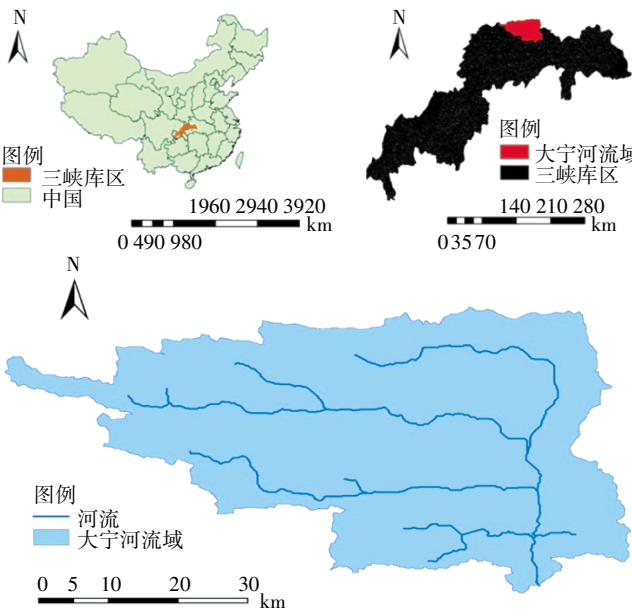


图 2 大宁河流域巫溪段示意图
Figure 2 Location of Daning watershed

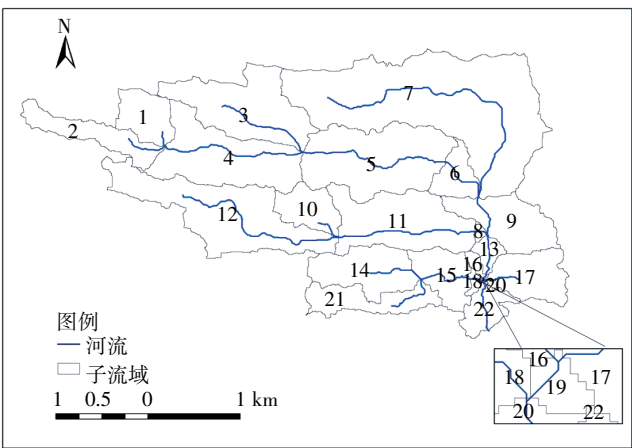


图 3 子流域划分示意图
Figure 3 Diagram for division of sub-basins

2.2 基于属性的相似流域识别

根据前期研究,大宁河流域的降雨空间差异性不大,因此本研究结合大宁河流域地形特征,及指标间的相似度识别结果,最终选择了平均高程、平均坡度、林地百分比和耕地百分比作为流域属性判定方法的具体指标。选取指标的相关性检验结果如表 2 所示。总体来说,各指标之间相关性并不显著。

根据公式(3)计算得到各指标的权重,并且对出现负相似元值的流域组合予以去除。以 1 号流域为例,参证流域的指标权重值如表 3 所示。根据流域概况,初步选择五级相似度评价等级(表 4)。

表 2 指标相关系数矩阵
Table 2 Correlation coefficient matrix of index

指标	平均高程	平均坡度	林地率
平均坡度	0.512	—	—
林地率	0.484	0.552	—
耕地率	-0.469	-0.663	-0.448

表 1 主要数据及来源

Table 1 Source and description of basic data

数据类型	数据	来源
空间数据	DEM(1:25 万)	国家基础地理信息中心
	土地利用图(2000 年,1:10 万)	中国科学院资源环境科学数据中心
	土壤类型图(1:5 万)	巫溪县农业科学委员会
监测数据	流量、水位等水文资料	长江水利委员会水文局
	泥沙、总磷等水质资料	巫溪县环保局
	降雨、气温、风速、日照辐射等气象资料	巫溪县气象局
其他属性数据	密度、水力传导度、土壤可供水量、田间持水量等土壤物理属性	《四川土种志》、野外试验、SPAW
	土壤初始氮磷含量等土壤化学属性	中国土壤数据库
	作物播种、收获日期和施肥等作物管理措施	实地调研

2.3 基于模型参数敏感性的相似流域识别

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是美国农业部(USDA)农业调查局(ARS)开发的流域尺度模型,可用于模拟地表水和地下水水量及水质。本课题组已经应用 SWAT 模型开展了大宁河流域水文、泥沙和农业化学物质模拟,并量化了不同农业管理措施对非点源污染过程的影响。因此本研究拟在课题组已构建模型的基础上,开展模型敏感性分析,并基于各流域的敏感性参数对比进行流域相似性判定。其中,用于模型率定和验证的水文水质观测数据主要从长江水利委员会、巫溪县环境保护局和巫溪水文站获取。模型率定验证过程采用 SWAT-CUP 软件实现,模型评价指标为 Nash-Sutcliffe 系数(NSE)和相关系数(R^2)。SWAT 模型参数率定验证结果见表 5,巫溪水文站月平均径流量和月总磷负荷模拟结果同实测值的相关系数 R^2 均大于 0.79,NSE 均大于 0.74,模拟效果

较好。

通过参数敏感性分析,得到大宁河流域最敏感的 23 个参数(表 6)。在对 22 个流域的敏感性参数分析发现,对多数流域而言,USLE_P、CANMX、CH_K2、SOL_Labp、CH_N2、SOL_Z 等参数对模拟结果的影响均较大,说明 22 个流域受影响较大的参数范围比较一致,但具体到各个流域,其敏感性参数排序差别较大。研究中取前三位敏感性参数排序一致的流域组划为相似流域。识别结果如表 7 所示。

2.4 相似流域识别结果的对比分析

基于流域属性和模型参数敏感性两种方法得到的相似流域判定结果如表 7 所示。可以看出,属性相似法(五级评价标准)与模型参数敏感性法得到的相似流域组(六组相似流域)具有一定的一致性。在参数敏感性方法的结果中,1 号流域、2 号流域、3 号流域、6 号流域、9 号流域、10 号流域、16 号流域和 17 号流域被识别为相似流域,这与属性相似法的结果有所不同。此外,属性相似法将 8 号流域、18 号流域和 19 号流域判定为相似流域,但是参数敏感性法判断 18 号流域、20 号流域与其他流域均不相似。由此看来,两种方法判断出的相似流域结果也具有一定的差异性。

为量化不同相似度评价标准对识别结果的影响,将相似度评价标准进一步细化,如表 4 中所示的六级、七级相似度范围。基于六级和七级相似度的识别结果如表 7 所示。相较于五级评价标准,随着相似度等级的增加,属性相似法得到的相似流域划分结果逐渐精细,且与参数敏感性法划分结果更为接近。说明两种方法

表 3 流域指标权重值

Table 3 Weight of index for basins

子流域	平均高程	平均坡度	林地率	耕地率
1-2	0.804 548	0.865 748	0.451 476	0.480 028
1-3	0.755 505	0.873 239	0.947 12	0.384 179
1-4	0.769 448	0.968 644	0.898 629	0.166 028
1-5	0.719 108	0.950 945	0.802 267	0.493 935
1-6	0.591 045	0.887 755	0.959 515	0.367 975
1-7	0.678 26	0.875 962	0.910 32	0.042 509
1-8	0.392 635	0.919 401	0.695 676	0.768 048
1-9	0.658 77	0.909 696	0.862 334	0.598 514
1-10	0.712 839	0.997 568	0.994 285	0.090 16
1-11	0.640 62	0.927 758	0.780 171	0.722 452
1-12	0.842 292	0.928 915	0.999 487	0.636 823
1-13	0.403 446	0.987 442	0.981 469	0.302 785
1-16	0.439 42	0.676 457	0.772 898	0.158 112
1-20	0.162 87	0.758 791	0.267 076	0.145 948

表 5 SWAT 模型评估结果

Table 5 Evaluation result of SWAT model

模拟时期	数据类型	R^2	NSE
2000.01—2008.12	流量	0.79	0.74
	总磷	0.95	0.93

表 4 相似度评价表

Table 4 Table of similarity evaluation

五级相似度范围	六级相似度范围	七级相似度范围	相似度评价
Similar(A,B)<0.600	Similar(A,B)<0.600	Similar(A,B)<0.600	不相似
$0.600 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.750$	$0.600 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.750$	$0.600 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.700$	一般相似
$0.750 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.800$	$0.750 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.800$	$0.750 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.800$	较相似
$0.800 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.950$	$0.800 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.900$	$0.800 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.850$	基本相似
—	—	$0.850 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.900$	大体相似
—	$0.900 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.950$	$0.900 \leq \text{Similar}(A,B) < 0.950$	非常相似
$0.950 \leq \text{Similar}(A,B) < 1.000$	$0.950 \leq \text{Similar}(A,B) < 1.000$	$0.950 \leq \text{Similar}(A,B) < 1.000$	完全相似

都能有效地进行相似流域判定,但是属性相似法受相似评价等级划分影响较大,具有一定的主观性。

2.5 相似流域验证

本研究将相似流域定义为具有相同或相似的流域非点源污染过程,具体表现为在同样的降雨输入条件下,相似流域应具有类似的水文、非点源污染输出

表6 参数敏感性分析结果
Table 6 Sensitivity analysis of parameters

序号	参数	参数意义	下限	上限
1	Sol_Awc	土层的有效含水量/mm·mm ⁻¹	0	1
2	Sol_K	饱和渗透系数/mm·h ⁻¹	-20	30 000
3	Esco	土壤蒸发补偿因子	0	1
4	Gwqmn	发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值/mm	0	5000
5	Cn2	径流曲线数	-25	19
6	Canmx	最大冠层截留量/mm	0	10
7	Sol_Z	土壤剖面深度/mm	-25	25
8	Ch_K2	主河道冲积物的有效渗透系数/mm·h ⁻¹	0	150
9	Surlag	地表径流滞后系数	0	10
10	Gw_Delay	地下水的延迟/d	1	45
11	Ch_N2	主河道曼宁系数	0	1
12	Epco	植物吸收补偿因子	0	1
13	Revapmn	浅层含水层的水位阈值/mm	0	500
14	Spcon	泥沙输移线性系数	0.000 1	0.05
15	Ch_Cov1	河道侵蚀因子	0	1
16	Ch_Erodmo	河道侵蚀	0	1
17	Usle_P	USLE 方程中的水土保持措施因子	0	1
18	Spexp	泥沙输移指数系数	1	1.5
19	Sol_Orgp	土壤有机磷初始浓度/mg·kg ⁻¹	0	400
20	Pperco	磷的渗流系数/10 m ³ ·Mg ⁻¹	10	18
21	Phoskd	磷的土壤分配系数/m ³ ·Mg ⁻¹	100	200
22	Rchrg_Dp	深层含水层的渗透系数	0	1
23	Sol_solp	土层中可溶性磷的初始浓度/mg·kg ⁻¹	-25	25

表7 相似流域组识别结果
Table 7 Identification results of similar basins group

序号	属性相似方法			敏感性参数相似
	五级标准	六级标准	七级标准	
1	1、2、3、4、5、6、7、9、10、11、12、13、16、17、22	1、2、3、5、6、9、10、13、16、17、22	1、2、3、5、6、9、10、13、16、17、22	1、2、3、6、9、10、16、17
2	14、15、21	4、7、11、12	4、7、11、12	4、5、7、11、12、14
3	8、18、19	14、15、21	14、15、21	8、13、19、22
4	20	8、18、19	8、19	15、21
5	—	20	18	18
6	—	—	20	20

过程线。基于上述的相似流域判定结果,本文借助于SWAT模型,对基于属性相似法(七级标准)和模型敏感性参数法得到的相似流域分别进行了验证。具体操作为对相似流域设置同样的降雨输入序列,通过SWAT模型模拟得到参证流域和目标流域出口的污染物负荷输出序列,并将模型输出序列进行相关性评价(用NSE指标量化)。如输出数据序列相关性较好,则说明两个流域具有较强的相似性,也即本研究提出的方法具有较好的识别效果。鉴于各相似流域组中的模拟结果较多,为节约篇幅,本文只列出部分验证结果(图4)。

由图4可知,各相似流域的非点源污染(总磷)输出结果具有较强的相关性,表明相似流域具有类似的非点源污染过程。基于参数敏感性分析得到的相似流域的吻合度较高,除了个别流域组的NSE较低(如8号流域与22号流域),其余的相似流域的总磷拟合相关性均超过了0.54(NSE值),表明基于参数敏感性分析的相似流域识别结果较好。然而,14号流域-21号流域组为基于属性法识别出的相似流域组,总磷拟合指标为0.89,但却并没有在参数敏感性法中识别出来,这表明敏感性参数法也有一定的误差。总体而言,大多数的相似流域组的拟合指标均大于0.71(总磷模拟),这说明模型参数敏感性具有更好的适用性。

基于属性法识别的相似流域与基于参数敏感性相似得到的结果大体相同。不同的是,属性相似法识别出了1号流域-5号流域、1号流域-13号流域、1号流域-22号流域和14号流域-21号流域等相似流域组。除了上述提到的14号流域-21号流域组的拟合效果较好之外,其余几个相似流域组的总磷拟合结果均小于0.52,拟合效果较差,说明这几组流域相似度较低。证明相对于敏感性参数法,属性相似法误差较大。但总体而言,当相似评价标准足够精细时,属性相似法可以得到较为精确的相似流域组。

3 结论

相似流域识别是数据缺失下的农业非点源污染模拟的前提和基础。本研究提出了基于流域属性和模型敏感性参数两种相似流域的识别方法。案例研究结果中,基于参数敏感性法的相似流域识别结果较好(NSE指标值均大于0.54),属性法除个别组拟合结果较差外,其余的相似流域组的拟合指标也均超过了0.61,表明两种方法均可用于相似流域判定。对比两

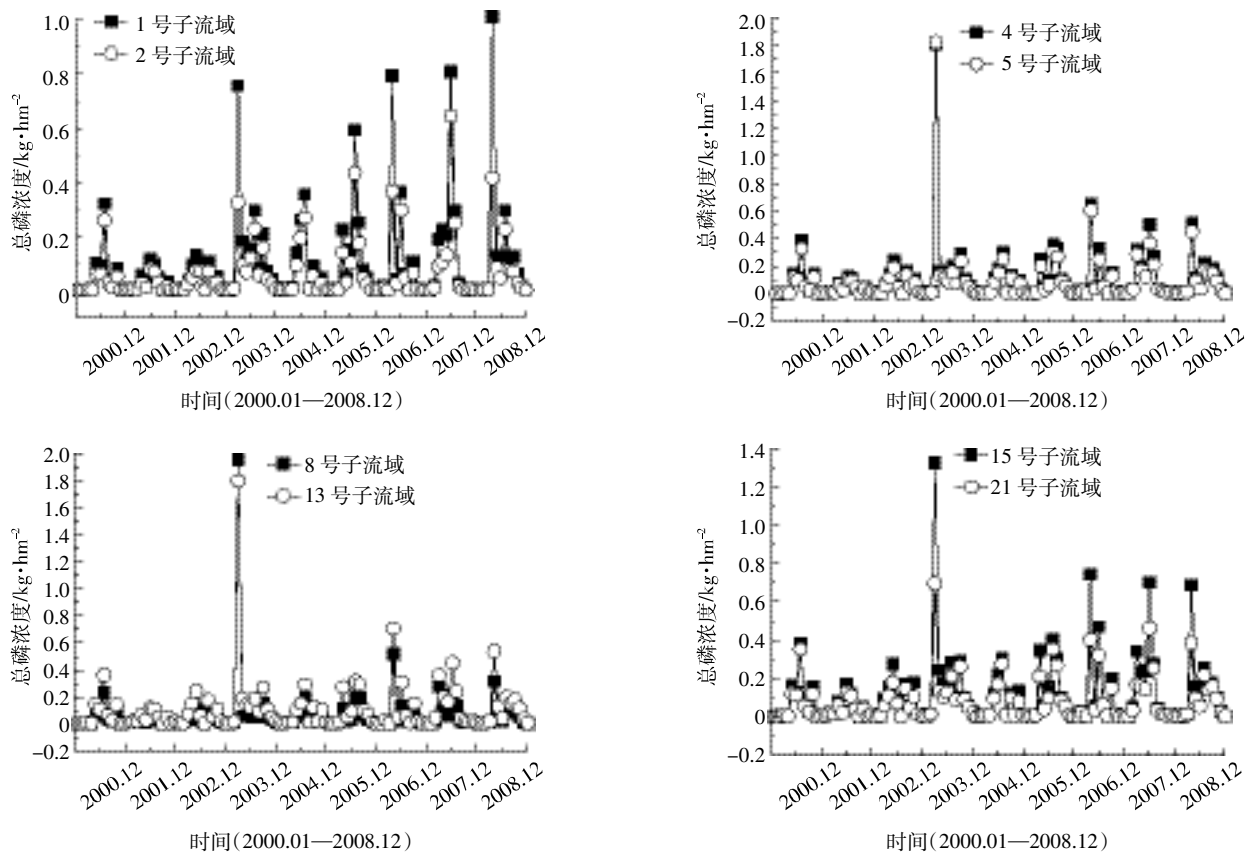


图 4 基于参数敏感性分析的相似流域评估

Figure 4 Evaluation of similar basins based on parameter sensitivity analysis

种方法发现,流域属性法受评价标准等级划分影响较大,当评价标准增多时,两种方法的相似流域识别结果趋于一致。总体而言,两种方法各有其优缺点,在实际应用时可将两种方法相结合,以便获得更为精确的识别结果。

受数据限制,本研究只基于特定的流域水文模型(SWAT 模型)进行了相似流域判断,未来可继续验证本方法对于其他模型的适应性,同时,目前基于水文过程的相似流域识别方法已取得很大进展,建议未来加强对于农业非点源污染过程机理研究,并在此基础上完善影响非点源污染过程的流域属性指标体系和模型敏感性参数。

参考文献:

- [1] 丁晓雯,沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 4025–4032.
DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao. Spatial distribution and pollution source identification of agricultural non-point source pollution in Fu-jiang Watershed[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11): 4025–4032.
- [2] 赵 倩,马 建,问青春,等. 应用 AnnAGNPS 模型模拟柴河上游农业非点源污染[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 344–351.

- ZHAO Qian, MA Jian, WEN Qing-chun, et al. Modeling pollutant load and management alternatives in headwater of Chai River Watershed with AnnAGNPS[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 344–351.
- [3] Liu R, Zhang P, Wang X, et al. Assessment of effects of best management practices on agricultural non-point source pollution in Xiangxi River Watershed[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117(1): 9–18.
- [4] 姚 成,章玉霞,李致家,等. 缺资料地区水文模拟及相似性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 108–113.
YAO Cheng, ZHANG Yu-xia, LI Zhi-jia, et al. Hydrological simulations and similarities in ungauged basins[J]. *Journal of Hohai University*, 2013, 41(2): 108–113.
- [5] 李红霞,张新华,张永强,等. 缺资料流域水文模型参数区域化研究进展[J]. 水文, 2011, 31(3): 13–17.
LI Hong-xia, ZHANG Xin-hua, ZHANG Yong-qiang, et al. Review of hydrological model parameter regionalization for ungauged catchments[J]. *Journal of China Hydrology*, 2011, 31(3): 13–17.
- [6] 李红霞,张永强,敖天其,等. 缺资料地区径流预报方法的比较与研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 11–15.
LI Hong-xia, ZHANG Yong-qiang, AO Tian-qi, et al. Comparison of regionalization approaches for runoff prediction in free of observational data catchments[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2010, 27(2): 11–15.

- [7] Singh R, Archfield S A, Wagener T. Identifying dominant controls on hydrologic parameter transfer from gauged to ungauged catchments: A comparative hydrology approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 985–996.
- [8] 吴碧琼, 黎小东, 敖天其, 等. 基于参数移植法的 SWAT 模型在缺资料地区非点源污染模拟中的应用[J]. 四川大学学报, 2015, 47(增刊 2): 9–16.
- WU Bi-qiong, LI Xiao-dong, AO Tian-qi, et al. Study of SWAT model based on parameter transfer method in data scarce catchment for non-point source pollution simulation[J]. *Journal of Sichuan University*, 2015, 47(Suppl 2): 9–16.
- [9] 于瑞宏, 张宇瑾, 张笑欣, 等. 无测站流域径流预测区域化方法研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(12): 1528–1539.
- YU Rui-hong, ZHANG Yu-jin, ZHANG Xiao-xin, et al. Review of regionalization methods on streamflow prediction in ungauged basins[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(12): 1528–1539.
- [10] 孙 伟. 基于 SWAT 模型石羊河流域径流模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- SUN Wei. Runoff simulation of the Shiyang River basin using SWAT model[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011.
- [11] 叶金印, 李致家, 吴勇拓. 一种用于缺资料地区山洪预警方法研究与应用[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 15–19.
- YE Jin-yin, LI Zhi-jia, WU Yong-tuo. Study and application of flash flood warning method for ungauged basins[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(3): 15–19.
- [12] Hughes D A. Conceptual catchment model parameter transfer studies using monthly data from the southern Cape coastal lakes region[J]. *Water SA*, 1985, 11(3): 149–156.
- [13] 赵文举, 孙 伟, 李宗礼, 等. 石羊河流域无观测资料地区径流模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(3): 70–75.
- ZHAO Wen-ju, SUN Wei, LI Zong-li, et al. Runoff simulation in ungauged area of Shiyang River basin[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2014, 40(3): 70–75.
- [14] 王慧亮, 孙志琢, 李叙勇, 等. 非点源污染负荷模型的比较与选择[J]. 环境科学与技术, 2013, 5(5): 176–182.
- WANG Hui-liang, SUN Zhi-zhuo, LI Xu-yong, et al. Comparison and selection among nonpoint pollution models[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 5(5): 176–182.
- [15] 胡文慧, 李光永, 郭亚洁, 等. 汾河灌区农业面源污染经验统计模型的构建与验证[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 207–215.
- HU Wen-hui, LI Guang-yong, GUO Ya-jie, et al. Construction and verification of an empirical model for agricultural nonpoint source pollution in the Fenhe irrigation district[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(2): 207–215.
- [16] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 降雨的空间不均性对模拟产流量和产沙量不确定的影响[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 446–453.
- HAO Fang-hua, CHEN Li-qun, LIU Chang-ming, et al. Model output uncertainty due to spatial variability of rainfall[J]. *Progress in Geography*, 2003, 22(5): 446–453.
- [17] Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2): 413–430.
- [18] 徐会军, 陈洋波, 李昼阳, 等. 基于 LH-OAT 分布式水文模型参数敏感性分析[J]. 人民长江, 2012, 43(7): 19–23.
- XU Hui-jun, CHEN Yang-bo, LI Zhou-yang, et al. Analysis on parameter sensitivity of distributed hydrological model based on LH-OAT method[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(7): 19–23.