

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.

TU Hong-zhi, HOU Ying, CHEN Wei-ping. Simulation of non-point source pollution in Weizigou watershed with AnnAGNPS model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1345–1352.

# 基于 AnnAGNPS 模型的苇子沟流域非点源污染模拟研究

涂宏志<sup>1,2</sup>, 侯 鹰<sup>1</sup>, 陈卫平<sup>1\*</sup>

(1.中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘 要:**采用连续分布式水文模型 AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-Point Source Model), 耦合 GIS 技术, 对饮马河下游苇子沟流域 2009—2015 年非点源污染进行了定量模拟, 同时用同步水质监测数据检验了该模型在苇子沟流域的适用性。结果表明, 该模型对径流、总氮模拟效果较好, 对总磷模拟效果较差。在日尺度上, 模型对小型降雨事件径流量模拟值偏低, 而对暴雨事件模拟值偏高; 月尺度上, 总氮、总磷的年内变化与降雨量的年内变化一致, 5—8 月雨季的非点源污染负荷占全年的 80% 以上; 年尺度上, 2009—2015 年总氮、总磷污染负荷平均值分别为 22 295.28 kg 和 7 085.00 kg, 且年际变化趋势一致。降雨量与总氮负荷的 Spearman 相关系数为 0.93, 与总磷负荷的相关系数为 0.92, 且均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 说明年降雨量的变化直接影响流域全年总氮、总磷污染负荷的变化。总氮和总磷负荷的空间分布具有很高的相似性, 总体上总氮、总磷单位面积负荷量在流域西北部区域较低, 而在流域中下游区域较高。

**关键词:** AnnAGNPS; 非点源污染; 苇子沟流域; 总氮; 总磷; 不确定性

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)07-1345-08 doi:10.11654/jaes.2016-1562

## Simulation of non-point source pollution in Weizigou watershed with AnnAGNPS model

TU Hong-zhi<sup>1,2</sup>, HOU Ying<sup>1</sup>, CHEN Wei-ping<sup>1\*</sup>

(1.State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In this study, the AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-Point Source) model was used to simulate NPS loads from the Weizigou watershed from 2009 to 2015. Water quality monitoring data were used to evaluate the performance and suitability of AnnAGNPS. The results showed that the predictions of the runoff and total nitrogen(TN) load for the Weizigou watershed by AnnAGNPS were reasonable, while the prediction of total phosphorus(TP) showed relatively large uncertainties. The model generally underestimated runoff caused by low rainfalls, while overestimated runoff resulting from heavy rainfalls. The changes of TN and TP loads over months had similar trends with the change of rainfall. More than 80% of the annual NPS load occurred in rainy-season from May to August. Annual average TN and TP load from the Weizigou watershed from 2009 to 2015 were 22 295.28 kg and 7 085.00 kg, respectively, and they had the similar changing trend over years. The Spearman correlation coefficients were 0.93 and 0.92 for the correlations between TN and rainfall and between TP and rainfall, respectively ( $P < 0.01$ ). The modeling results on the annual scale showed that the change of total pollutant load was strongly influenced by the change of rainfall in the Weizigou watershed. TN and TP loadings had similar spatial distribution characteristics in the study area. The loadings of TN and TP were generally higher in the downstream areas than in the north-western areas of the Weizigou watershed.

**Keywords:** AnnAGNPS; non-point source pollution; Weizigou watershed; total nitrogen; total phosphorus; uncertainty

收稿日期: 2016-12-06

作者简介: 涂宏志(1992—), 男, 湖北潜江人, 硕士研究生, 从事流域非点源污染研究。E-mail: hztu\_st@rcees.ac.cn

\* 通信作者: 陈卫平 E-mail: wpchen@rcees.ac.cn

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-011-005, 2015ZX07206-006-02); 中国科学院科技服务网络计划(KFJ-EW-ZY-004)

Project supported: The National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2014ZX07201-011-005, 2015ZX07206-006-02); Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences(KFJ-EW-ZY-004)

自 20 世纪 60 年代以来,随着对点源污染治理的日益加强,非点源尤其是农业非点源逐步成为水体恶化的主要污染源<sup>[1]</sup>。由于非点源污染具有随机性、复杂性、分散性、滞后性和难监测的特点,对其治理存在很大困难<sup>[2]</sup>。

随着技术的发展和研究的深入,应用机理模型对非点源污染进行模拟已成为非点源污染研究的常用方法<sup>[3]</sup>。目前,常用的非点源污染模型有 ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)<sup>[4]</sup>、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)<sup>[5]</sup>和 AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-point Source Pollution Model)<sup>[6]</sup>等。耦合地理信息系统 (GIS)与非点源污染机理模型,可以模拟非点源污染形成过程、识别关键源区、分析污染负荷时空分布,相关结果可为制定非点源管理方案提供参考,成为非点源污染研究的重要手段<sup>[7]</sup>。AnnAGNPS 模型作为连续、分布式机理模型,能够连续模拟指定时间段内每天及累积的径流、泥沙、氮磷等营养物的形成及迁移转化过程,在流域农业非点源污染研究中得到广泛应用。Suttles 等<sup>[8]</sup>应用 AnnAGNPS 模型模拟估算了南乔治亚岛上游流域的泥沙量和非点源污染负荷;Polyakov 等<sup>[9]</sup>利用该模型对夏威夷 Kauai 岛流域径流量和泥沙侵蚀进行了模拟研究。该模型在美国的 Neal Smith 国家野生动物避难所<sup>[10]</sup>、澳大利亚的 Currency Creek 流

域<sup>[11]</sup>、西班牙 Olive Orchard 小流域<sup>[12]</sup>、哥伦比亚的 Cauca 流域<sup>[13]</sup>也得到了应用。国内学者则在三峡库区<sup>[14]</sup>、丹江口库区<sup>[15]</sup>、太湖流域<sup>[16-17]</sup>、辽河源头小流域<sup>[18]</sup>、黑河流域<sup>[19]</sup>、胶东半岛大沽河流域<sup>[20]</sup>等地应用 AnnAGNPS 进行了研究。东北平原是我国粮食主产区之一,农业面源污染严重,污染的特征、机制和影响因素等问题亟待深入研究。然而,目前还没有 AnnAGNPS 在东北平原应用情况的报道。

本研究采用 AnnAGNPS 模型对苇子沟流域的农业非点源污染负荷进行了模拟,通过实地监测数据对模拟结果进行了校准,在此基础上,分析了苇子沟流域农业非点源污染负荷的时空变化特征。研究结果将对 AnnAGNPS 模型在我国东北平原小流域的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于饮马河下游,属长春市农安县境内的支流苇子沟小流域(图 1),上起源头高家店镇高家店村,下至万金塔乡苇子沟村,全长约 15 km,地理范围为 44°43'~44°37'N,125°26'~125°14'E,流域面积 69 km<sup>2</sup>。苇子沟小流域年平均气温 4.7℃,无霜期 145 d,年均降水量 507.7 mm,多集中在 6—8 月,四季分明,属中温带大陆性气候。该地区位于松辽平原,地

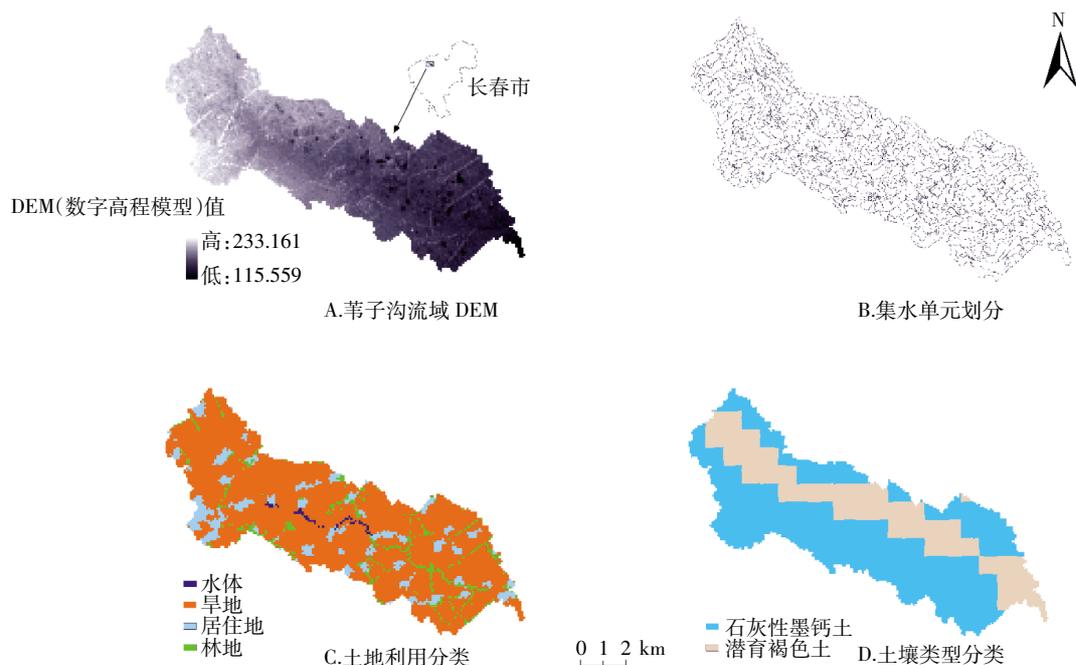


图 1 苇子沟流域示意图

Figure 1 Geographic location of Weizigou watershed

势平坦,一般海拔 250~270 m,土地利用方式以旱作耕地为主,主要种植玉米,兼少量西瓜和葡萄。

苇子沟流经区域包括高家店、德胜唐、九德号、万金塔、苇子沟等 14 个行政村,经调查统计,该区域 2015 年人口为 14 490 人。

## 1.2 试验设计与方法

采用实地地表径流监测方法,在苇子沟流域出口处利用 ICSO-6712 便携式自动水质采样器同步监测每场次降雨过程的地表径流量和氮磷输出浓度。样品的采集频率为降雨前采集一次水样,在降雨开始后的前 2 h 内每 30 min 采集水样,此后每 1 h 采集水样,直至出口径流量基本恢复正常。每次采样 1000 mL,采集的水样 24 h 内送到实验室检测总氮、总磷。所有水质指标均按照标准方法<sup>[21]</sup>进行测定。采样器每 5 min 自动记录流速、水位。场次降雨径流的污染负荷( $L$ )计算公式<sup>[22]</sup>为:

$$L = \sum_{j=1}^n \frac{C_j + C_{j+1}}{2} \times \frac{q_j + q_{j+1}}{2} \times \Delta t$$

式中: $C_j$  和  $C_{j+1}$  为某场降雨径流中第  $j$  次和第  $j+1$  次监测的污染物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $q_j$  和  $q_{j+1}$  为某场降雨径流中第  $j$  次和第  $j+1$  次监测的径流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta t$  为相邻两次采样间隔时间,  $\text{s}$ ;  $n$  为某场降雨径流过程中的采样次数。

## 1.3 AnnAGNPS 模型介绍

AnnAGNPS 模型由美国农业部自然资源保护局和农业保护局于 20 世纪 90 年代在 AGNPS 模型的基础上研发,是用于模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷等营养物流失的连续分布式参数模型<sup>[23]</sup>。AnnAGNPS 模型由数据输入和编辑模块、年污染物负荷计算模块、数据输出和显示模块 3 部分组成。

AnnAGNPS 作为分布式物理模型包括水文子模型、土壤侵蚀子模型和污染物迁移子模型三个子模型<sup>[24]</sup>。地表径流量的计算依据美国土壤保持局提出的 SCS 曲线法(Soil Conservation Service Curve Number)。峰值径流量用 Smith 和 Willam 得出的经验相关方程计算;在土壤侵蚀子模型中,通过修正的通用土壤流失方程(RUSLE)计算各集水单元泥沙侵蚀量,由水文几何通用土壤流失方程(HUSLE)计算各集水单元的侵蚀物向沟道的输移率。污染物迁移子模型则采用 CREAM 模型和饲养场模型模拟计算溶解态和吸附态的氮磷等污染物质的迁移转化过程。

## 1.4 模型数据库构建

### 1.4.1 地形数据

采用经资源三号卫星图像遥感解译生成的数字高程模型(DEM)为数据源,并利用地形参数模块(TOPAGNPS)自动划分集水单元(Cell)和排水沟道(Reach),生成集水单元文件(AnnAGNPS\_cell.csv)和沟道参数文件(AnnAGNPS\_reach.csv)。集水单元数据包括排水面积、高程、地面坡度、方位、LS 因子等,沟道数据包括沟道长度、高程、坡度等。集水单元的划分和沟道网络的提取通过临界源面积(CSA)和最小沟道长度(MSCL)来确定。钟科元等<sup>[25]</sup>的研究表明合理的集水单元划分影响模型模拟的精度。本研究根据苇子沟流域的实际地表状况,将 CSA 和 MSCL 分别取  $8 \text{ hm}^2$  和  $130 \text{ m}$ ,并依据此数值确定了 740 个集水单元和 300 个排水沟道数据(图 1)。

### 1.4.2 气象数据

模型所需的气象参数包括日均降雨量、日最高和最低气温、露点温度、日辐射值和风速。气象数据采用中国气象数据网中国地面气候资料日值数据集和中国辐射日值数据集,采用农安气象站 2009—2015 年的逐日气象数据(降水、日最高气温、日最低气温、日均气温、风速、日照时数、相对湿度),其中日辐射值的计算方法参考童成立等<sup>[26]</sup>的研究。采用 Wischmeier 经验法<sup>[27]</sup>计算降雨侵蚀力因子( $R$ ),十年一遇降雨侵蚀因子( $EI_{10}$ )的计算则采用 Renard 等<sup>[28]</sup>的方法。露点温度根据日均气温和相对湿度计算<sup>[29]</sup>,公式如下:

$$t_d = U(A + Bt) + Ct - 19.2$$

式中: $A=0.198 0$ ,  $B=0.001 7$ ,  $C=0.840 0$ , 均为系数;  $t_d$  为露点温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t$  为日均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U$  为相对湿度, %。

### 1.4.3 土壤数据

模型需要的土壤数据分为空间数据和属性数据两类。空间数据采用世界土壤数据库中的中国土壤数据集,数据分辨率为 1:100 万。流域内土壤类型为石灰性黑钙土和潜育褐色土(图 1)。用 GPS 定位采集 18 个土壤样品,分析各类型土壤的 pH 值、总氮、总磷和有机碳含量。土壤有机氮、无机氮以及有机磷、无机磷的含量分别按照总氮的 96%、4%和总磷的 15%、85%的比例计算<sup>[30]</sup>。根据对数正态分布方法<sup>[8]</sup>将土壤粒径的 FAO90 制转换为美国制标准。利用土壤水分特性软件 SPAW(Soil Plant Atmosphere Water)确定各类型土壤的容重、田间持水量、萎蔫系数、饱和导水率和饱和度。

### 1.4.4 土地利用数据

模型所需土地利用数据采用中国生态系统评估数据库提供的全国土地利用图(分辨率为  $90 \text{ m} \times 90$

m)。研究区主要土地利用类型为旱地,占 82.61%,居住地占 10.96%,林地占 5.51%,其他占 0.92%(图 1)。

#### 1.4.5 作物及管理数据

流域主要种植玉米,少数村民种植西瓜和葡萄,考虑玉米种植规模,将作物概括为玉米。通过实地调查获得了农作物的种植、施肥、杀虫、收割等相关措施的操作时间和操作方式,以及肥料的养分含量等属性信息。作物参数主要参考模型自带的作物参数数据库(Crop.xls)和美国农业手册 703 号。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模型校准

根据国内外对 AnnAGNPS 模型参数敏感性的研究结果<sup>[31-32]</sup>,在水文模块校准时参考田耀武等<sup>[33]</sup>的方法反复调试径流曲线数 CN 值,使径流量模拟值与实测值最大程度地接近。氮、磷输出量主要受土壤可侵蚀因子 K、水土保持因子 P、作物管理因子 C、化肥施用量、土壤中氮、磷本底值和河道曼宁系数的影响,调整上述敏感因子,使得总氮、总磷模拟值最大限度接近其实测值。表 1 为 2016 年 6—7 月的两次降雨事件模拟实验结果,其模拟偏差计算公式如下:

$$D_v = \frac{V - V'}{V'} \times 100\%$$

式中: $D_v$  为模拟偏差( $D_v$  值越趋向于 0,则拟合度越好); $V$  为模型模拟值; $V'$  为实测值。

由表 1 可知,AnnAGNPS 对小型降雨的模拟结果偏低,与 Lenzi 等<sup>[34]</sup>、邹桂红等<sup>[35]</sup>的研究结论一致。可能原因为研究区为平原,平均坡度较低,且土地利用类型主要为旱田,土壤含砂量大,土壤渗透性较大,所以小降雨事件时产生的地表径流值偏低。两场降雨事件的径流模拟结果与实测结果拟合度一般,可能与流域类型为平原有关。两场降雨事件总氮的模拟偏差分别为 16.16%、15.48%,平均模拟偏差为 15.82%,表明模型对总氮模拟效果较好,能较真实反映流域内总氮的变化情况。总磷的模拟结果较差,其中 7 月 25 日场次降雨事件总磷模拟结果与实测结果偏差达到 53.74%。已有研究表明,日尺度的污染负荷模拟精度

低于月、年尺度<sup>[35-36]</sup>。此外,部分研究中,场次降雨事件总磷偏差大,如在黄金良等<sup>[37]</sup>应用 AnnAGNPS 模型对九龙江小流域的氮磷负荷模拟中,有三次降雨事件总磷负荷的模拟偏差分别达到了 111.04%、-80.19%和 -76.36%;朱乾德等<sup>[38]</sup>的研究中有两次降雨事件总磷负荷的模拟偏差分别达到 40.09%和 39.09%。因此,对于本研究而言,需要更多降雨事件的监测数据来验证总磷模拟的可靠性。总体而言,AnnAGNPS 模型对总氮负荷的模拟精度高于对总磷负荷的模拟精度,与 Novotny 等<sup>[39]</sup>对众多非点源污染的模型评估结果一致。可能原因在于,模型对磷元素的模拟只考虑了吸附态磷和溶解态磷,实际上磷在自然界中的循环属于沉积型循环,部分磷进入水体后会沉积在底泥中,而模型忽略了沉积部分的磷,故对磷的模拟值通常大于实测值。

### 2.2 模拟结果分析

#### 2.2.1 氮磷污染负荷年内分布特点

本研究应用校准后的模型模拟了苇子沟流域 2013—2014 年的总氮、总磷负荷(图 2 和图 3)。从年际变化来看,2013 年总氮和总磷的年内变化与降雨量的年内变化一致。由图 2 可见:总氮和总磷负荷的月流失量随月降雨量的变化而变化,呈现较强的正相关性。2013 年总氮负荷量为 26 377.63 kg,总磷负荷量为 8 907.70 kg,总氮、总磷月产生强度与月降雨量 Spearman 相关系数分别是 0.85( $P=0.000\ 40$ )、0.84( $P=0.000\ 40$ )。5—8 月的降雨量分别为 43.5、91.3、173.0、105.3 mm,占年总量(562.1 mm)的 73.49%,对应期间的总氮负荷量分别为 1 204.81、2 412.00、14 691.72、4 231.46 kg,占年总量的 85.45%;总磷负荷量分别为 382.95、967.00、4 880.93、1 401.80 kg,占年总量的 85.69%。由图 3 可知,2014 年 Spearman 相关系数分别是 0.71( $P=0.009\ 8$ )、0.69( $P=0.009\ 8$ ),5—8 月的降雨量分别为 92.7、73.6、52.2、43.9 mm,占年总量(331.9 mm)的 79.06%;对应期间的总氮负荷量分别为 730.15、255.06、965.70、126.52 kg,占年总量的 84.24%;总磷负荷量分别为 241.89、83.40、312.00、39.26 kg,占年总量的 84.46%。这说明降雨是苇子沟流域非点源污染的

表 1 苇子沟流域径流及氮磷污染负荷模拟值与实测值对照

Table 1 Comparison of the simulated and measured runoff and nitrogen and phosphorous loading of the Weizigou watershed

降雨事件	降雨量/mm	径流量			总氮负荷			总磷负荷		
		模拟值/m <sup>3</sup>	实测值/m <sup>3</sup>	模拟偏差/%	模拟值/kg	实测值/kg	模拟偏差/%	模拟值/kg	实测值/kg	模拟偏差/%
6 月 11 日	14.8	4 047.04	4 702.81	-13.94	17.68	15.22	16.16	5.38	4.37	23.11
7 月 25 日	25.8	9 248.86	7 597.40	21.74	32.01	27.72	15.48	11.50	7.48	53.74

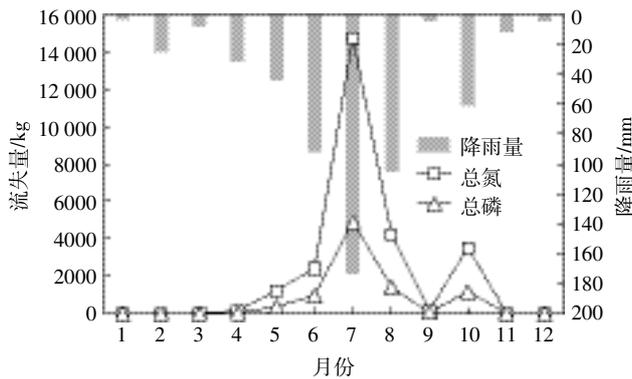


图2 2013年各月苇子沟流域非点源污染负荷及降雨量

Figure 2 The non-point source pollution load and rainfall of the Weizigou watershed in 2013

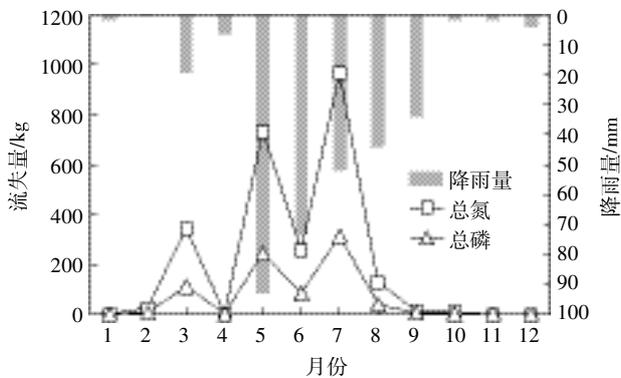


图3 2014年各月苇子沟流域非点源污染负荷及降雨量

Figure 3 The non-point source pollution load and rainfall of the Weizigou watershed in 2014

主要驱动力。2014年7月降雨量较5、6月低,总氮、总磷负荷却高于5、6月,可能是因为7月场次降雨事件降雨量更大导致。

### 2.2.2 氮、磷污染负荷的年际分布特点

根据模型输出文件得到苇子沟流域2009—2015年年际污染负荷情况(图4)。结果表明,该地区多年平均降雨量为482.2 mm,年降雨量最大和最小年份分别是2010和2014年,降雨量分别为675.2 mm和331.9 mm。总氮、总磷污染负荷年际变化趋势一致,2010年总氮、总磷负荷量分别为79 015.29、25 018.02 kg;2014年则分别为2 466.16、801.01 kg。总氮、总磷多年平均负荷量分别为22 295.28、7 085.00 kg。总氮、总磷负荷随该地区降雨的年际变化而变化,主要原因一是降雨是氮磷流失的主要驱动因素,二是模型对不同年份进行模拟时只考虑气象数据随时间的变化,不考虑其他信息,如地形、土地利用方式、土壤等因素随时间的变化情况<sup>[40]</sup>。经SPSS软件进行相关性检验,年

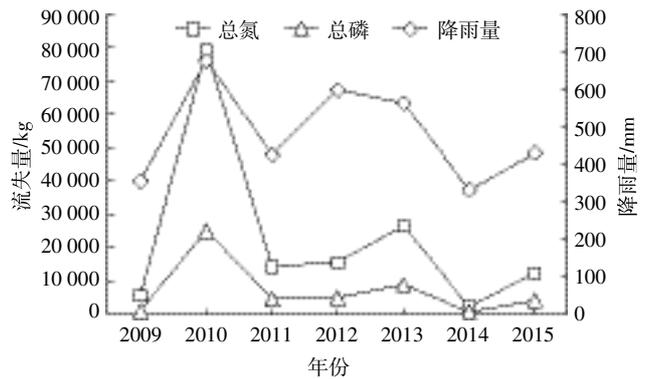


图4 苇子沟流域污染负荷及降雨量年际变化

Figure 4 The non-point source pollution load and rainfall of the Weizigou watershed from 2009 to 2015

降雨量与总氮负荷的 Spearman 相关系数为0.93( $P=0.0025$ ),与总磷负荷的相关系数为0.92( $P=0.0025$ ),均已达到极显著水平,表明流域氮磷污染负荷变化与年降雨量变化的紧密关系。

### 2.2.3 氮、磷污染负荷的空间分布特征

利用 ArcGIS 将模型输出的氮磷负荷数据库文件和集水单元图 AnnAGNPS\_SubWta.asc 耦合,输出苇子沟流域2009—2015年总氮、总磷单位面积年均负荷量空间分布图(图5)。结果表明,苇子沟流域总氮、总磷污染负荷在空间上呈现较强的区域性分布,总氮、总磷年均负荷量低(总氮 $0\sim 3.00\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,总磷 $0\sim 1.20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )的集水单元主要分布在流域西北部,而总氮、总磷年均负荷量高(总氮 $5.00\sim 13.06\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,总磷 $2.00\sim 5.52\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )的集水单元主要分布在流域中下游。对比研究区河网图和土地利用图发现,总氮、总磷的流失主要集中在坡耕地和河道两侧等坡度较大区域,表明地形是影响总氮、总磷流失的重要因素。

总氮、总磷负荷在空间分布上有一定相似性,磷流失多的区域氮流失量往往也大,磷流失少的区域氮流失量通常也比较小。这与边金云等<sup>[32]</sup>和李开明等<sup>[41]</sup>的研究结果一致,可能原因是苇子沟流域营养物以颗粒态为主要赋存形式,而颗粒态营养物质往往附着在泥沙上,随着泥沙的迁移而迁移。

### 2.3 模拟的不确定性

本研究中 AnnAGNPS 模型模拟还存在一定的不确定性,主要表现为:

(1) AnnAGNPS 假设每年肥料施用和农事管理措施不变,而实际中苇子沟流域农业为农户分散经营模式,耕作施肥方式不一,模型的假设不完全符合研

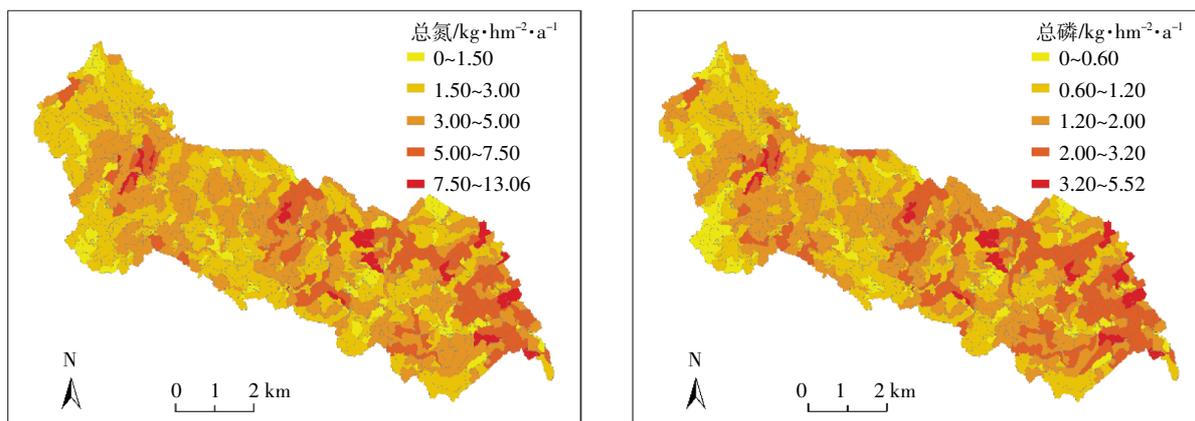


图5 2009—2015年苇子沟流域氮磷污染负荷的空间分布

Figure 5 Spatial distribution of TN and TP loading in Weizigou watershed during 2009—2015

究区域的实际情况。已有研究表明,肥料施用量以及肥料中氮磷比例等参数会影响模型的输出结果<sup>[42]</sup>。

(2)因野外监测和采样的条件限制,供模型校验的实测数据有限,使得模型的校验,特别是对总磷负荷模拟的校验不太理想。

(3)降雨与径流、氮磷流失负荷的非线性关系,以及土地利用模式和管理措施的快速变化导致了量化研究非点源污染的复杂性。

(4)对各年污染负荷进行模拟时均使用了2010年的土地利用图,而现实中研究区域土地利用会随时间发生变化。通过对比2000年和2010年全国土地利用图发现,苇子沟流域土地利用在这10年间变化极小,而且研究区域为东北农村区域,受城市化影响很小。因此,本研究假设该区域2009—2015年土地利用相比2010年保持不变。

### 3 结论

(1)AnnAGNPS模型对总氮污染负荷量的模拟精度较高,能较好地反映该流域的总氮污染负荷实际情况,而对总磷污染负荷的模拟不确定性较大。

(2)对2013、2014年污染负荷模拟结果表明,总氮、总磷流失趋势一致,且主要集中在5—8月,与降雨量呈较强的正相关关系。2009—2015年苇子沟流域总氮、总磷负荷年际变化分析表明,在年际尺度上,降雨总量是影响全年流域污染负荷量的重要因素。

(3)总氮、总磷在空间分布上具有一定的相似性。流域西北部总氮、总磷单位面积负荷量总体较低,而流域中下游的总氮、总磷单位面积负荷量总体较高。旱地是氮磷输出的最主要来源。

(4)模型对苇子沟流域非点源污染输出模拟具有

不确定性,包括模型自身设计的局限性、输入参数的不确定性、模型的适用性以及校验数据有限。

(5)总体而言,AnnAGNPS模型在苇子沟流域具有一定的适用性。本研究能够为AnnAGNPS模型在东北平原区小流域的应用提供参考。为了增加模型模拟的可靠性,需要更多的实测数据对模型进行进一步校准与验证。

### 参考文献:

- [1] 丁晓雯,李薇,陈庆伟. 农业非点源污染模型研究现状与发展趋势[J]. 现代农业科技, 2008(14): 261-262.  
DING Xiao-wen, LI Wei, CHEN Qing-wei. Current situation and development tendency of researches of non-point source pollution model in agriculture[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2008(14): 261-262.
- [2] 陈利顶,傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 98-100.  
CHEN Li-ding, FU Bo-jie. Farm ecosystem management and control of non-point source pollution[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(2): 98-100.
- [3] 朱瑶,梁志伟,李伟,等. 流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 3012-3018.  
ZHU Yao, LIANG Zhi-wei, LI Wei, et al. Watershed water environment pollution models and their applications: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 3012-3018.
- [4] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4): 938-944.
- [5] 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.
- [6] Yuan Y, Locke M A, Bingner R L. Annualized Agricultural Non-Point Source model application for Mississippi Delta Beasley Lake watershed conservation practices assessment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(6): 542-551.

- [7] 边金云,王飞儿,杨佳,等.基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究[J].环境科学,2012,33(8):2659-2666.  
BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, et al. Simulation of nitrogen and phosphorus loss in Siling Reservoir watershed with AnnAGNPS[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(8):2659-2666.
- [8] Suttles J B, Vellidis G, Bosch D D, et al. Watershed-scale simulation of sediment and nutrient loads in georgia coastal plain streams using the annualized AGNPS model[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(5):1325-1335.
- [9] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(11):1617-1627.
- [10] Li H, Cruse R M, Bingner R L, et al. Evaluating ephemeral gully erosion impact on *Zea mays* L. yield and economics using AnnAGNPS[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155:157-165.
- [11] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, 18(8):801-808.
- [12] Taguas E V, Yuan Y, Bingner R L, et al. Modeling the contribution of ephemeral gully erosion under different soil managements: A case study in an olive orchard microcatchment using the AnnAGNPS model[J]. *Catena*, 2012, 98:1-16.
- [13] Villamizar M L, Brown C D. Modelling triazines in the valley of the River Cauca, Colombia, using the annualized agricultural non-point source pollution model[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177:24-36.
- [14] Hua L Z, He X B, Yuan Y P, et al. Assessment of runoff and sediment yields using the AnnAGNPS model in a Three-Gorge watershed of China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2012, 9(5):1887-1907.
- [15] 王静,丁树文,蔡崇法,等. AnnAGNPS 模型在丹江库区黑沟河流域的模拟应用与检验[J].土壤通报,2009,40(4):907-912.  
WANG Jing, DING Shu-wen, CAI Chong-fa, et al. Applying and testing AnnAGNPS for pollutant loads of Heigou watershed in Danjiang reservoir[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4):907-912.
- [16] Zhu Q D, Sun J H, Hua G F, et al. Runoff characteristics and non-point source pollution analysis in the Taihu Lake Basin: A case study of the town of Xueyan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(19):15029-15036.
- [17] Li Z F, Luo C, Xi Q, et al. Assessment of the AnnAGNPS model in simulating runoff and nutrients in a typical small watershed in the Taihu Lake basin, China[J]. *Catena*, 2015, 133(20):349-361.
- [18] 齐琳,林剑,马继力,等. AnnAGNPS 模型应用于辽河源小流域的主要参数确定方法[J].环境科学学报,2012,32(4):865-870.  
QI Lin, LIN Jian, MA Ji-li, et al. Methods for determining the main parameters of AnnAGNPS model applied to the watershed of the source areas of the Liaohe River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4):865-870.
- [19] Li J K, Li H E, Li Y J. Evaluation of AnnAGNPS and its applications in a semi-arid and semi-humid watershed in Northwest China[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2012, 49(1/2):62-88.
- [20] 王晓利,姜德娟,张华.基于 AnnAGNPS 模型的胶东半岛大沽河流域非点源污染模拟研究[J].农业环境科学学报,2014,33(7):1379-1387.  
WANG Xiao-li, JIANG De-juan, ZHANG Hua. Simulation of non-point source pollution in Dagu watershed, Jiaodong Peninsula based on AnnAGNPS model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1379-1387.
- [21] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].四版.北京:中国环境科学出版社,2002:701-705.  
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701-705.
- [22] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等.2次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J].环境科学,2007,28(10):2287-2293.  
LI Li-qing, YIN Cheng-qing, KONG Ling-li, et al. Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(10):2287-2293.
- [23] Yuan Y, Bingner R L, Rebich R A. Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi Delta MSEA watersheds[J]. *Transactions of the ASAE*, 2001, 44(5):1183-1190.
- [24] Bingner R L, Theurer F D. AnnAGNPS technical processes[R]. Washington DC: US Department of Agriculture, 2005. [https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/AGNPS/PLModel/Document/Tech\\_Doc.PDF](https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/60600505/AGNPS/PLModel/Document/Tech_Doc.PDF).
- [25] 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.  
ZHONG Ke-yuan, CHEN Xing-wei, CHEN Ying, et al. Simulation of effects of topography and soil/land use spatial aggregation on sediment yield and runoff using AnnAGNPS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8):127-135.
- [26] 童成立,张文菊,汤阳,等.逐日太阳辐射的模拟计算[J].中国农业气象,2005,26(3):165-169.  
TONG Cheng-li, ZHANG Wen-ju, TANG Yang, et al. Estimation of daily solar radiation in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(3):165-169.
- [27] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.  
WANG Wan-zhong, JIAO Ju-ying, HE Xiao-pin, et al. Study on rainfall erosivity in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(4):5-18.
- [28] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. Washington DC: US Department of Agriculture, 1997:703.
- [29] Hyland R W, Wexler A. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H<sub>2</sub>O from 173.15 K to 473.15 K[J]. *ASHRAE Transactions*, 1983, 89(5):500-519.
- [30] 李家科,李怀恩,李亚娇,等.基于 AnnAGNPS 模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J].水土保持学报,2008,22(6):81-88.  
LI Jia-ke, LI Huai-en, LI Ya-jiao, et al. Simulation on non-point

- source pollution in Heihe River watershed of Shaanxi based on AnnAGNPS model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 81-88.
- [31] 高龙华. 基于模型敏感性分析的非点源污染控制管理研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(5): 31-34.  
GAO Long-hua. Research of control management of non-point source pollution based on model sensitivity analysis[J]. *Water Resources and Power*, 2008, 26(5): 31-34.
- [32] 边金云. AnnAGNPS 模型在四岭水库小流域非点源控制中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 43-49.  
BIAN Jin-yun. The application of AnnAGNPS model in non-point source pollution control in Siling Reservoir watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 43-49.
- [33] 田耀武, 王宁, 刘晶. 伏牛山区陶湾流域径流泥沙模拟误差分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 56-62.  
TIAN Yao-wu, WANG Ning, LIU Jing. Analysis of simulation error of runoff and sediment for Taowan in Funiushan Mountain area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 56-62.
- [34] Lenzi M A, Luzio M D. Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Alpone watershed using AGNPS integrated with a geographic information system[J]. *European Journal of Agronomy*, 1997, 6(1): 1-14.
- [35] 邹桂红, 崔建勇, 孙林. 农业非点源污染模型 AnnAGNPS 适用性检验[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2): 371-378.  
ZOU Gui-hong, CUI Jian-yong, SUN Lin. Evaluation of simulation of AnnAGNPS model[J]. *Quaternary Science*, 2008, 28(2): 371-378.
- [36] Mostaghimi S, Park S W, Cooke R A, et al. Assessment of management alternatives on a small agricultural watershed[J]. *Water Research*, 1997, 31(8): 1867-1878.
- [37] 黄金良, 洪华生, 杜鹏飞, 等. AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验[J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1135-1142.  
HUANG Jin-liang, HONG Hua-sheng, DU Peng-fei, et al. Testing AnnAGNPS for water quality modelling in the typical sub-watersheds in Jiulong River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(8): 1135-1142.
- [38] 朱乾德, 孙金华, 颜志俊, 等. 太湖平原水网区非点源污染模型的适用性研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 39-44.  
ZHU Qian-de, SUN Jin-hua, YAN Zhi-jun, et al. Research on applicability of non-point source pollution model of water network plain of Taihu Lake[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(10): 39-44.
- [39] Novotny V, Olem H. Water quality: Prevention, identification, and management of diffuse pollution[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [40] 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.
- [41] 李开明, 任秀文, 黄国如, 等. 基于 AnnAGNPS 模型泗合水流域非点源污染模拟研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 54-59.  
LI Kai-ming, REN Xiu-wen, HUANG Guo-ru, et al. Simulation of non-point source pollution in Sihe watershed with AnnAGNPS[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(S1): 54-59.
- [42] 席庆, 李兆富, 罗川. 基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1773-1780.  
XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan. Sensitivity analysis of AnnAGNPS model's hydrology and water quality parameters based on the perturbation analysis method[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 1773-1780.