

滁州花山水文实验流域径流与氮素耦合模拟研究

王建群, 王洋, 郭昆, 刘松平

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用 SWAT 模型方法对滁州花山水文实验流域进行了径流与氮素耦合模拟,探讨了流域土地利用对氮素输移的影响。构建了花山水文实验流域 SWAT 模型,采用 2008 年 1 月~2013 年 12 月的降雨、径流等数据对径流模型进行率定和验证,以 2012 年 5 月~2013 年 12 月的氮浓度监测数据对氮负荷模型进行验证。利用所建立的模型对现状土地利用情形和土地利用变化情景假设下进行了径流与氮素耦合模拟,计算了现状和不同土地利用情景假设下流域的径流深和氮负荷。结果表明:汛期的氮流失量占全年氮流失的比重较大,每年的汛期是控制氮流失的关键时期;旱地的氮流失潜力较水田大,林地的增加对氮负荷具有一定的消减作用;控制氮肥的使用,加强水土保持能力,可以有效减少流域氮负荷。

关键词:水文实验流域;氮输移;SWAT 模型;土地利用

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)01-0040-05

实验小流域是研究水文、水资源、水环境的理想对象,是探索变化环境下水文、水资源及水环境系统演变规律,寻找水资源可持续利用方法的重要手段。实验小流域水文研究也一直是“国际水文计划(International Hydrological Programme, IHP)”的组成部分^[1]。各国都在积极进行实验小流域的建设研究工作,如德国的“Sukferta”小流域、波兰的“ZagoDonka”小流域、中国的青沟径流实验站、滁州水文实验站、五道沟实验站等,在水循环、泥沙运动,特别是水环境研究中起到了重要的作用^[2]。滁州水文实验基地的 1 号实验流域始建于 1978 年,滁州水文实验基地也于 1981 年建立。基于在滁州基地花山水文实验流域在水文循环、流域产汇流机理、土壤水分运动、同位素实验观测技术等方面开展的研究取得了一批重要的基础研究成果,发表了一系列高质量的学术论文,在国内外产生了较大的影响^[1-3]。氮素作为最重要的营养盐之一,其流失可造成水体富营养化^[4-5]。土地利用类型、结构等的组合对非点源污染的发生有重要影响,不合理的土地利用是水土流失、营养物及农药流失发生的主要原因,也是导致非点源污染的主要原因^[6-8]。为了探讨土地利用对氮素迁移规律的影响,本文以滁州花山水文实验流域作为研究平

台,采用 SWAT 模型方法构建花山水文实验流域径流与氮素耦合模拟模型,分析计算氮负荷在年内不同月份的分布情况,研究现状条件土地利用条件下不同土地利用类型非点源污染负荷量的时空变化,并利用情景假设方法分析土地利用/覆盖变化对非点源污染的贡献率。以水文实验流域为平台,定量地分析土地利用结构对氮素输移时空变化的影响,对于采取合理的土地管理方式、减少流域氮负荷、控制非点源污染具有重要意义。

1 流域概况

滁州花山水文实验流域位于安徽省东部城市滁州市域内,实验流域范围在东经 118°8'7"~118°16'51"、北纬 32°13'15"~32°18'55"之间,距滁州市主城区 10km 处,流域出口胡庄断面集水面积 82.1km²。流域内河系呈标准的扇形,胡庄测流断面以上有三条支流和一条小沟汇入,分别为东源、中源、西源和竹园沟,流域水系见图 1。

研究区域为丘陵地区,地形复杂,主要以乡村景观为主,农田、塘坝、林地等交错分布。本项研究实地调查和遥感资料调查结果表明,研究区域土地利用/覆

收稿日期:2014-08-06

基金项目:水利部公益性行业科研专项经费项目(201201026)

作者简介:王建群(1960-),男,江苏句容人,教授,主要从事水资源系统分析与规划和管理研究。E-mail:wangjq@hhu.edu.cn



图1 花山水文实验流域水系图

Fig.1 The river system of the Huashan hydrological experimental watershed

被面积分别为林地 67.68%,水田 14.45%,旱地 7.93%,裸地 4.85%,水体 3.76%,建筑用地 1.33%;根据项目组实地走访调查,研究区域涉及属滁州市南谯区施集镇的丰山、花山、龙蟠、荣誉、杨家饭店、河东等 6 个行政村,有 3 533 户、12 196 人,其中常住人口 9 944 人;流域内牛 27 头、养猪 1 150 头、羊 3 600 只、土鸡 76 420 只、肉鸡 197 800 只、鸭 118 500 只。研究区域农作物主要有水稻、小麦、油菜、棉花、玉米、花生等;经济以种养殖业为主,畜禽养殖业是农民收入的重要来源。花山水文实验流域内无工业,氮的主要来源有农业化肥、人畜粪便、大气氮沉降、生物固氮、种子等。根据项目组实地走访调查、氮沉降监测实验等资料,对花山实验流域生态系统氮的输入进行统计分析知,流域氮输入合计为 933 996 kg N/a,其中化肥氮占 51.5%、大气沉降占 22.6%、生物固氮占 14.2%、有机肥氮占 11.4%、种子氮占 0.4%。流域氮的输入量从大到小排序为化肥氮、大气沉降、生物固氮、人畜粪便、种子,并且化肥输入远远高于其它途径氮的输入。

2 模型构建

SWAT 模型是美国农业部农业研究局开发的分布式流域水文模型,目前已经被越来越多地用于流域水环境非点源污染模拟,以及分析和评价污染控制管理措施对水环境的影响。SWAT 模型主要包含水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型等。它可以对径流与氮素进行耦合模拟,模拟不同形态氮的迁移转化过程,包括地表径流流失、入渗淋失、化肥输入等物理过程,及有机氮矿化、反硝化等化学过程以及作物

吸收等生物过程^[9]。本文采用 SWAT 模型方法对花山水文实验流域进行径流与氮素耦合模拟研究。

DEM 数据是 SWAT 模型进行水系提取、子流域划分和水文过程模拟的基础,由于研究区域面积较小,对 DEM 数据的精度要求较高。本文直接从覆盖研究区域的资源三号卫星^[10-11]前后视影像中提取了 DEM 数据,其空间分辨率达到 4m,见图 2。从资源三号卫星融合影像中解译得到流域 DLG 水系图,对 DLG 水系与 DEM 进行叠置分析,确保 SWAT 模型提取水系和划分子流域的准确性,见图 1。基于资源三号卫星遥感影像进行土地利用信息的提取,将区域土地利用类型划分为常绿林、落叶林、水田、旱地、水体、裸地以、居民点及道路桥梁等建筑用地,并运用混淆矩阵对土地利用图进行了精度评价,总体精度为 92.04%,Kappa 系数为 0.9030,在 SWAT 模型运行时重分类为旱地、水田、林地、裸地、水体和居民地,见图 3。土壤图是对图片格式的滁州市 1:20 万土壤类型图^[12]进行数字化得到的,主要划分为潴育型水稻土、黄棕壤、棕色石灰土和中性粗骨土。

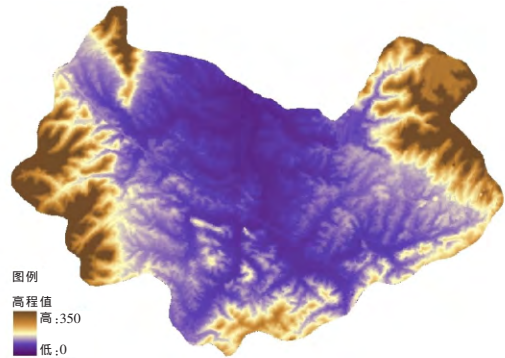


图2 花山水文实验流域 DEM

Fig.2 DEM of the Huashan hydrological experimental watershed

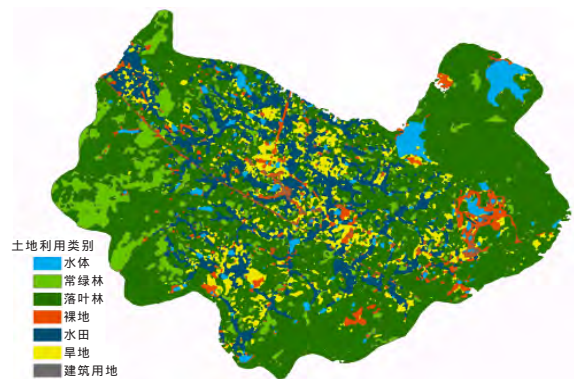


图3 花山水文实验流域土地利用图

Fig.3 Land use of the Huashan hydrological experimental watershed

研究中用到的土壤数据分为物理属性数据和化学属性数据两大类。其中土壤的物理属性是必须的,而化学属性是可选的。根据我国土壤分类系统,参考中国土壤数据库^[12],确定土层厚度等参数值。SWAT模型用到的土壤颗粒分析标准是美国制,本文转换采用三次样条插值的方法将其土壤粒径国际制转化为美国制。土壤湿密度、饱和水力传导系数等参数根据土壤的性质采用 SPAW 软件计算,一些难以获取的参数值采用模型的默认值。土壤化学属性数据包括土壤中硝态氮、有机氮的起始浓度等,取实测值为参数初值。

根据设定的子流域面积阈值和子流域出水口与进水口的位置,进行子流域的划分,河道上游地区最小的汇水面积就是河道的阈值面积^[13],最终将花山水文实验流域划分为 82 个子流域。然后,再在每个子流域划中按照不同的土地利用方式与土壤类型组合,将子流域划分为 540 个水文响应单元(HRU)。

在确定模型结构和输入参数后,需对参数进行率定和验证。本研究采用 2008~2013 年实测水文气象资料(由项目组单位安徽省滁州水文局提供)以月为时段长对流域出口胡庄断面月径流过程模拟模型进行率定和验证,2008~2011 年的实测资料对模型进行率定、2012~2013 年的实测资料对模型进行验证。选用相关系数(R^2)以及 Nash—Sutcliffe 模拟效率系数(Ens)为指标来评价模型的适用性。率定期 R^2 和 Ens 分别为 0.95 和 0.89,实测流量与模拟流量的对比如图 4 所示;验证期 R^2 和 Ens 分别为 0.96 和 0.90,实测流量与模拟流量的对比如图 5 所示。根据模拟值和实测值流量过程线拟合情况,模拟效果较为理想。

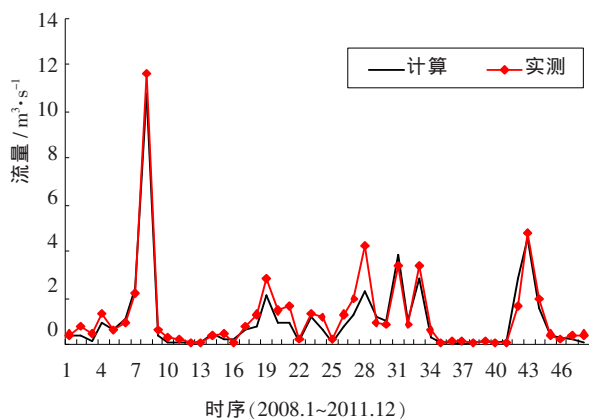


图4 率定期胡庄断面月平均流量过程线(2008.1~2011.12)

Fig.4 Discharge hydrograph of the monthly average flow in calibration period at the Huzhuang station

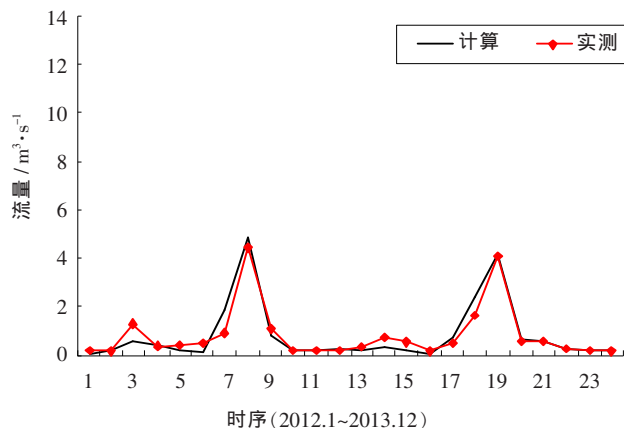


图5 验证期胡庄断面月平均流量过程线(2012.1~2013.12)

Fig.5 Discharge hydrograph of the monthly average flow in validation period at the Huzhuang station

采用 2012 年 5 月~2013 年 12 月胡庄断面氨氮和硝氮实测数据(来源于项目组对花山水文实验流域开展的观测实验)来校验氮负荷模拟模型,通过综合调整氮负荷系数、生物降解系数和生物混合效率来拟合流域的实际氮负荷情况。图 6 是 2012 年 5 月~2013 年 12 月胡庄断面实测与计算氨氮月负荷过程线, R^2 和 Ens 分别为 0.94 和 0.88。图 7 是 2012 年 5 月~2013 年 12 月胡庄断面实测与计算硝氮月负荷过程线, R^2 和 Ens 分别为 0.90 和 0.86。根据模拟值和实测值合情况,模型对氨氮和硝的模拟结果较理想。

3 现状土地利用下径流与氮素耦合模拟分析

用 2008~2012 年降雨数据的统计分析发现,流域内平均降雨量在 950.9~1 210.6mm 之间,年际间降雨

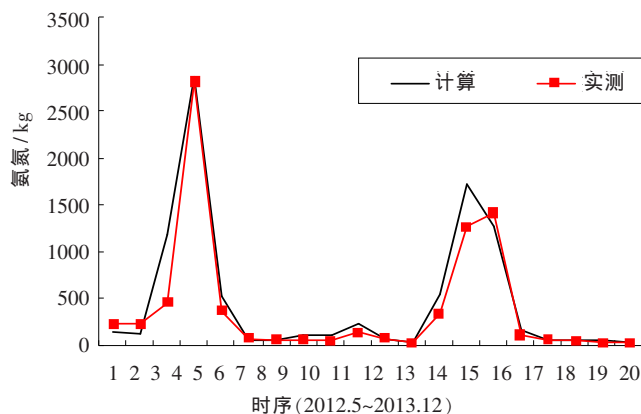


图6 胡庄断面氨氮月负荷过程线(2012.5~2013.12)

Fig.6 The monthly load hydrograph of the ammoniacal nitrogen at the Huzhuang station

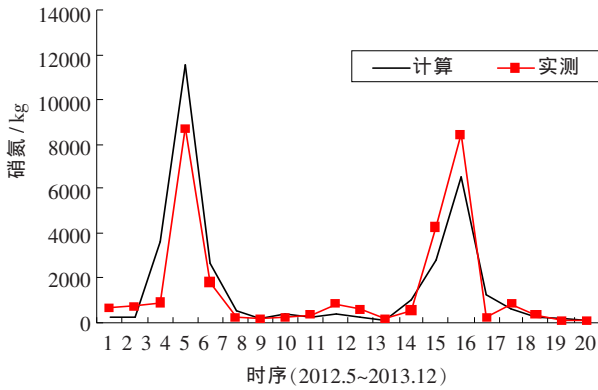


图7 胡庄断面硝氮月负荷过程线(2012.5~2013.12)

Fig.7 The monthly load hydrograph of the nitrate nitrogen at the Huzhuang station

差别不大,但大部分降雨集中在汛期(5~9月),占全年降雨的69.27%左右。根据SWAT模型的月模拟结果,对花山流域全年和汛期的径流和总氮TN输出情况进行统计分析(见表1)。

表1 花山流域径流现状土地利用径流与氮素耦合模拟结果
Table1 Runoff and nitrogen coupling simulation results under the present land use situation in the Huashan hydrological experimental watershed

年份	径流 / 10 ⁶ m ³	总氮 / kg	5~9月径流		5~9月总氮	
			径流 / 10 ⁶ m ³	百分比 / %	总氮 / kg	百分比 / %
2008	51.79	71 047	37.81	73.01	63 231	89.00
2009	29.91	36 534	18.25	61.02	29 957	82.00
2010	47.36	62 830	29.36	61.99	50 730	80.74
2011	27.66	31 146	22.13	80.01	27 408	88.00
2012	26.26	31 872	16.81	64.01	27 300	85.66
2013	25.48	31 195	14.78	58.01	25 891	83.00
平均	34.74	44 104	23.19	66.75	37 419	84.84

由表1分析可以看出,汛期多年平均径流占全年径流的66.75%,汛期的氮流失量占84.84%,个别年份达到89%,每年汛期氮流失严重。降雨径流是氮素迁移的主要动力,土壤侵蚀也一般发生在降雨和地表径流产生期间,吸附性氮随泥沙流出流域。因此,汛期的氮流失量占全年氮流失的比重较大,每年的汛期是控制氮流失的关键时期。

4 土地利用变化对氮素输移的影响

采用情景设计方法定量分析特定的土地利用变化对流域氮素输移的影响程度。土地利用情景假设见表2。即

现状:现状土地利用/覆被。

情景1:旱地和水田全部转换为森林覆被。这是理想土地覆被情景。

情景2:全部水田转化为旱地。主要探讨水田对氮素的调蓄作用。

情景3:全部旱地转化为裸地。研究区域为农业区,大量劳动力外出务工,造成旱地全部荒废成为裸地。

表2 不同土地利用情景组合设计

Table2 The different land use scenarios design

土地利用类型	现状	情景1	情景2	情景3
林地/%	67.68	90.06	67.68	67.68
水田/%	14.45	0	0	14.45
旱地/%	7.93	0	22.38	0
裸地/%	4.85	4.85	4.85	12.78
建筑用地/%	1.33	1.33	1.33	1.33
水域/%	3.76	3.76	3.76	3.76

在以上土地利用情景假设和2008~2013年气象条件下,分别模拟了花山水文实验流域2008~2013年6年的径流深以及流域出口断面氮负荷,模拟结果见表3和表4。

表3 不同土地利用情景假设下实验流域径流深模拟结果

Table3 The runoff simulation results under the different land use scenarios in the Huashan hydrological experimental watershed

年份	现状/mm	情景1/mm	情景2/mm	情景3/mm
2008	630.8	626.4	631.4	637.6
2009	364.3	360.5	365.1	370.6
2010	576.8	573.0	578	583.3
2011	336.9	334.7	337.2	343.9
2012	319.9	315.4	321.29	325.8
2013	310.4	305.9	311.79	316.2
平均	423.2	419.3	424.1	429.6

表4 不同土地利用情景假设实验流域下氮负荷模拟结果

Table4 The nitrogen load simulation results under the different land use scenarios in the Huashan hydrological experimental watershed

年份	现状/kg	情景1/kg	情景2/kg	情景3/kg
2008	71 047	47 720	80 632	63 486
2009	36 534	26 141	43 189	35 899
2010	62 830	52 528	70 645	59 291
2011	31 146	22 169	43 284	28 714
2012	31 872	21 885	43 797	28 456
2013	31 195	22 143	42 866	28 436
平均	44 104	32 097	54 068	40 714

由表3、表4可以得出:

(1)多年平均径流深从大到小依次排序为情景3>情景2>现状>情景1。由此可见,相对于现状,情景1的森林覆盖率增大,导致蒸发量变大,加之林地涵养水分并吸收水分,进一步增加水量的损失,导致径流量减小;相对于现状,情景2水田全部转换为旱地后,径流增大,这是由于在灌溉季节及强降雨条件下,水田具有一定的蓄水能力,蒸发量大于旱地,导致水田全部转换为旱地后年径流量增加;相对于现状,情景3旱地全部变为裸地后,径流明显增大,这是由于裸地无植被覆盖和吸收消耗水,土壤持水能力弱,与旱地相比其蒸发量小。

(2)氮负荷从大到小依次排序为情景2>现状>情景3>情景1。从氮源的角度来看,林地及裸地的氮素输入量小,农田的输入量大,因此随着裸地和林地面积扩大、农田面积的减少,直接减少了流域氮素的输入,进而导致氮负荷减小。从氮迁移的驱动因子来看,降雨径流为主要驱动力之一,林地年产流能力弱,裸地年产流能力强。因此,情景1下森林覆盖率增加,导致氮负荷较现状明显减小,而情景3下,裸地面积增加,氮素输入量减小,但是年产流能力增加,导致氮负荷略小于现状。情景2下,氮负荷量大于现状,实地调查表明研究区域单位面积水田和旱地的氮素输入(主要是施肥)量差别不大,因而年氮负荷的主要影响因素为产流能力,而旱地产流能力大于水田,因而在水田变为旱地后氮负荷增加,水田对氮负荷具有一定的消减作用。

5 结语

构建了滁州花山水文实验流域SWAT模型,利用所建立的模型对现状土地利用情形和土地利用变化情景假设下进行了径流与氮素耦合模拟,计算了现状和不同土地利用情景假设下流域的径流深和氮负荷。结论如下:

(1)汛期的氮流失量占全年氮流失的比重较大,每年的汛期是控制氮流失的关键时期。

(2)旱地的氮流失潜力较水田大,水田对氮负荷具有一定的消减作用。控制氮肥的使用,加强水土保持能力,可以有效减少流域氮负荷。

(3)林地在控制氮输移的过程中发挥了重要的作用,积极开展退耕还林,改善土地利用方式,有利于减少流域氮负荷。

(4)对氮模拟模型的率定和验证所用的数据系列还不够长,应加强野外观测试验,收集更多的有关氮的数据,进一步率定和验证模型。

参考文献:

- [1] 顾慰祖,陆家驹,唐海行,等. 水文实验求是传统水文概念—纪念中国水文流域研究50年、滁州水文实验20年[J]. 水科学进展, 2003,14(3):368-370. (GU Weizu, LU Jiaju, TANG Haixing, et al. Challenges of basin study to traditional hydrological conceptions: the 50 years anniversary of hydrological basin study of PRC and the 20 years anniversary of Chuzhou hydrological laboratory [J]. Advances in Water Science, 2003,14(3):368-370. (in Chinese))
- [2] 付从生,陈建耀,曾松青,等. 国内外实验小流域水科学研究综述[J]. 地理科学进展, 2011,30(3):259-267. (FU Congsheng, CHEN Jianyao, ZENG Songqing, et al. An overview on the water science researches at the experimental watersheds in China and abroad [J]. Progress in Geography, 2011,30(3):259-267. (in Chinese))
- [3] 顾慰祖,尚煜廷,翟劲毅,等. 天然实验流域降雨径流现象发生的悖论[J]. 水科学进展, 2010,21(4):471-477. (GU Weizu, SHANG Manting, ZHAI shaoyi, et al. Rainfall-runoff paradox from a natural experimental catchment [J]. Advances in Water Science, 2010,21(4):471-477. (in Chinese))
- [4] Xiaoyuan Yan, Zucong Cai, Rong Yang, et al. Nitrogen budget and riverine nitrogen output in a rice paddy dominated agricultural watershed in eastern China [J]. Biogeochemistry, 2011, 106(3):489-501.
- [5] 张燕,张志强,谢宝元,等. 饮用水源区小流域氮素污染负荷估算方法比较[J]. 中国水土保持科学, 2009,7(1):84-91. (ZHANG Yan, ZHANG Zhiqiang, XIE Baoyuan, et al. Estimating methods for non-point source pollution of small watershed in drinking water source area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(1): 84-91. (in Chinese))
- [6] 罗璇,史志华,尹炜,等. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 2010,31(1):58-62. (LUO Xuan, SHI Zhihua, YIN Wei, et al. Effects of land use structure on nitrogen output in small watershed [J]. Environmental Science, 2010,31(1):58-62. (in Chinese))
- [7] 赵中华,邱祖民. 桃江流域农业区氮平衡及时空差异性[J]. 水电能源科学, 2012,5:83-86. (ZHAO Zhonghua, QIU Zumin. Nitrogen balance of agricultural area and temporal variation of Taojiang river basin [J]. Water Resources and Power, 2012,5:83-86. (in Chinese))
- [8] 陈媛,郭秀锐,程水源,等. 基于SWAT模型的三峡库区大流域不同土地利用情景对非点源污染的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2012,31(4):798-806. (CHEN Yuan, GUO Xiurui, CHENG Shuiyuan, et al. Research on management of non-point source pollution with land use in Three Goeges reservoir, macro-scale watershed based on SWAT [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012,31(4): 798-806. (in Chinese))
- [9] S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, et al. SWAT Version 2000 Theoretical Documentation [EB/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/>.

(下转第81页)

体系,加快水文事业发展,提高水文现代化水平,以更加全面优质的水文信息支撑水资源可持续利用和社会可持续发展。

参考文献:

[1] 水利部水文局. 2013 全国水文统计年报 [Z].(Bureau of Hydrology,

MWR. 2013 Annual Report of National Hydrological Statistics [Z]. (in Chinese))

[2] 国家发展改革委,水利部. 全国水文基础设施建设规划(2013-2020年)[Z].(National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources. Plan for Construction of Hydrological Fundamental Facilities between 2013 and 2020 [Z]. (in Chinese))

Situation and Mission for Construction of Hydrological Infrastructures

WEI Xinping, JIANG Rong, LIU Jin, LI Xia

(Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China)

Abstract: In recent years, construction of hydrological infrastructures was enhanced obviously. Layout and function of hydrological network got improved. Integral level of hydrological infrastructures got increased. Ability of hydrometry and information service got intensified. The growth of economy and society demands more and more hydrological service in present and future. Construction of hydrological infrastructures required being enhanced further. This paper made a summary for achievement on construction of hydrological infrastructures in 11th “5-year plan”, elaborated the situation and question of construction of hydrological infrastructures, analyzed the objective and mission of construction of hydrological fundamental facilities.

Key words: hydrology; construction; situation; mission

(上接第 44 页)

[10] 中国资源卫星应用中心. 资源三号卫星介绍 [EB/OL]. <http://www.cresda.com/n16/n1130/n175290/175676.html>. (China Center for Resources Satellite Data and Application (CRESDA). Introduction of ZY-3[EB/OL]. <http://www.cresda.com/n16/n1130/n175290/175676.html>. (in Chinese))

[11] 李德仁. 我国第一个民用三线阵立体测图卫星-资源三号测绘卫星 [J]. 测绘学报, 2012,41(3):317-322. (LI Deren. China's first civilian three-line-array stereo mapping satellite: ZY-3 [J]. Acta Geo-

daetica et Cartographica Sinica, 2012,41(3):317-322. (in Chinese))

[12] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤数据库 [EB/OL]. <http://www.soil.csdb.cn>. (Institute of Soil Science of Chinese Academy of Sciences. China Soil Scientific Database [EB/OL]. <http://www.soil.csdb.cn>. (in Chinese))

[13] Chaplotv. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and NO₃-N loads prediction [J]. Journal of Hydrology, 2005,312(10):207-222.

Coupled Simulation of Runoff and Nitrogen in Huashan Hydrological Experimental Watershed

WANG Jianqun, WANG Yang, GUO Kun, LIU Songping

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, SWAT model was used to simulate runoff and nitrogen coupling in Huashan hydrological experimental watershed, and effects of the different land use changes on nitrogen transportation was studied. SWAT model was used in the watershed, the hydro-meteorological data from January, 2008 to December, 2013 and the concentration monitoring data of Ammonia nitrogen and nitrate nitrogen from May, 2012 to December, 2013 in the watershed were used to calibrate the model. The model was used to simulate runoff and nitrogen coupling under the present situation and the assumption of scenarios of land use change, the runoff and nitrogen load of the watershed were calculated. The results show that nitrogen loss in the rainy season accounted for a larger proportion of nitrogen loss in a year, the annual rainy season is the key period of controlling nitrogen loss. The potential of nitrogen loss in dry farmland is larger than that in paddy field. The nitrogen load is reduced by the increasing woodland. Control of nitrogen fertilizer use and strengthen of the ability of soil and water conservation can effectively reduce the nitrogen load in the watershed.

Key words: hydrological experimental watershed; nitrogen transportation; SWAT model; agriculture catchment; land use