

未来气候变化影响下的流域面源污染 负荷特征响应评估

赵越¹, 卢诚², 谢阳村¹, 王玉秋², 沙健³

(1. 环境保护部环境规划院, 北京 100012; 2. 南开大学 环境科学与工程学院 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071; 3. 天津师范大学 天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387)

摘要: 针对流域面源污染负荷在未来气候变化影响下的变化特征, 以我国新安江上游率水流域为例, 使用通用流域污染负荷模型(GWLF), 对其2000-2013年的水量及总氮、总磷面源污染负荷通量进行了模拟, 并解析了其负荷来源分配。在此基础上, 基于政府间气候变化专业委员会(IPCC)的气候变化评估报告结果, 利用GWLF模型分析了到21世纪20年代、50年代、80年代在A1FI(最高排放)和B1(最低排放)情景下, 率水流域的水文及总氮、总磷面源污染负荷特征变化。结果表明: 未来气候变化对流域水文及面源污染负荷特征均有一定影响。年水资源量先减少后增加, 地表径流量和蒸发量逐渐上升而地下水量逐渐下降。到2080s, A1FI情景比B1情景有更多的水资源量。年总氮通量先增加后减少, 在2050s最高, 而年总磷通量则逐渐增加, 且两种污染物均在A1FI排放情景下有更高的污染负荷量, 表明人类温室气体的排放会潜在地增加流域水体面源污染负荷。

关键词: 气候变化; 面源污染; 污染源解析; GWLF; 率水; 新安江

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2016)01-0040-06

Estimation of feature response of watershed nonpoint source pollution load under influence of future climate change

ZHAO Yue¹, LU Cheng², XIE Yangcun¹, WANG Yuqiu², SHA Jian³

(1. Chinese Academy For Environmental Planning, Ministry of Environment Protection, Beijing 100012, China; 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The feature of watershed non-point source pollution load response under the influence of future climate change are paid close attention. Taking Shuaishui watershed which locates in the upstream of Xin'an River for example, the paper used generalized watershed loading function (GWLF) model to simulate the nonpoint source pollution load flux of stream flow and TN and TP from 2000 to 2013, and analyzed the allocation of load source. On this basis, the validated GWLF model was used to estimate the changes of stream flow and TN and TP loads in 2020s, 2050s, and 2080s under A1FI (highest future emission trajectory) and B1 (lowest future emission trajectory) scenarios based on intergovernmental panel on climate change (IPCC) 's assessment report. The results show that the future climate change has certain effect on both watershed hydrologic process and non-point pollution loads. The annual amount of water resources first increases and then decreases while the runoff and evaporation gradually increase and the groundwater gradually decrease. Up to 2080s, there will be more water resources under A1FI scenario than that under B1. The annual TN flux also first increase with highest pressure in 2050s and then decrease, and the annual TP flux gradually increases. Both TN and TP have higher loads under A1FI, which indicated that the

收稿日期: 2015-08-13; 修回日期: 2015-09-17

基金项目: 水污染综合防治-重点流域环境保护监管项目(2110302); 天津市水资源与水环境重点实验室开放基金(117-YF11700102)

作者简介: 赵越(1978-), 男, 辽宁辽中人, 博士, 副研究员, 主要从事水污染防治技术支持、流域水环境管理等研究。

通讯作者: 沙健(1985-), 男, 天津市人, 博士, 助理研究员, 主要从事流域水环境模型、环境信息挖掘与大数据分析等研究。

emissions of greenhouse gases from human activities would potentially increase watershed non-point source pollution load.

Key words: climate change; non-point source pollution; pollution source analysis; GWLF; Shuashui River; Xin'an River

1 研究背景

面源污染是自然水体中污染物负荷的主要来源之一,是当前国际流域水环境领域的研究热点^[1-3]。在我国,伴随着对点源污染的有效管控,面源污染问题逐渐凸显^[4]。关注面源污染负荷特征,在流域尺度上开展有针对性的污染防治措施,已成为当前我国重要的水环境管理内容之一^[5-6]。

面源污染是指在流域汇水过程中,水体经陆面及地下传输时,受到相应污染物质影响,进而导致污染物进入水体,造成的污染负荷。面源污染具有间接性、复杂性、动态性等特征,受到流域自然属性特征和人类活动行为的共同影响。一方面,人类活动所导致的污染物质在流域空间上的分布是流域面源污染物质的直接来源,另一方面,流域内的降水、温度等自然条件是驱动上述污染物质向水体转移的核心动力,对流域面源污染负荷特征具有重要影响。已有的研究主要关注于对人类活动行为导致的面源污染负荷的评估,而针对自然因素,特别是未来气候条件变化影响下的流域面源污染负荷特征变化与趋势分析,是当前流域水环境研究工作的重要内容 and 热点话题^[7-9]。

相关研究表明,伴随着人类活动对自然环境的影响,特别是温室气体的持续性排放,未来全球气候会发生不同程度的变化,主要表现为全球气温升高和相应的降水量变化^[10]。政府间气候变化专业委员会(IPCC)对在未来不同人类活动情境下的气候变化情况进行了分析评估,对全球不同区域、不同月份的气温和降水变化情况进行了模拟预测,并发布了相应的气候变化评估报告。基于 IPCC 的评估分析结果,能够为开展面向未来气候变化与相关环境因子相互作用关系等方面的研究提供可靠参考,相关研究工作在国际上得以广泛开展。Baer 等^[11]基于 IPCC 的评估结果对黑海流域的农业水资源进行了脆弱性评价。Wagner 等^[12]利用 IPCC 评估结果评估的印度高止山脉西部流域的水资源变化情况。Narsimlu 等^[13]使用 SWAT 模型评估了未来气候变化对印度信德河上游水资源量的影响。本研究利用 IPCC 气候变化评估报告中针对东亚区域的降水和气温变化预测结果,选取我国新安江上游的率水流域为例,使用通用流域污染

负荷模型(GWLF),评估了未来气候变化对目标流域面源污染负荷特征的影响,包括在不同温室气体排放情境下的面源污染负荷通量及其来源构成比例变化,探究了直接影响大气环境的人类活动行为对水体面源污染过程的间接影响。

2 研究方法

2.1 研究区介绍

本论文研究选取位于我国安徽省黄山市境内的新安江上游的率水流域,作为案例研究区域,如图 1 所示。率水发源于六股尖,而后自西向东流至黄山市屯溪区,与左岸支流横江汇合,始称新安江,是新安江的正源。流域内以山区林地为主要的地貌与土地利用形式,区域开发程度低,人类活动干扰较小,适于开展本研究内容的评估及相关流域模型技术工具的应用。率水流域总面积 1 528 km²,最低海拔 101 m,最高海拔 1 622 m,平均海拔 413 m,年平均气温 17.7℃,年均降水量 1 903 mm。流域内的土地利用类型以林地为主,包括林地、疏林地、灌木林及其他林地,共占到全部流域面积的 83%;其次为农业耕地,包括山地水田、丘陵水田、平原水田及水浇旱地,共占到 12%,其余 5%为草地、城镇用地以及水面。流域内的水文监测站点月潭断面年均流量 33 m³/s,水质监测站点黄山林校断面年均总氮负荷通量 152 × 10³ kg,年均总氮负荷通量 7.5 × 10³ kg。

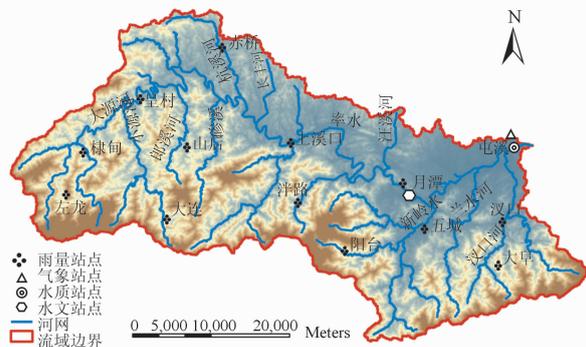


图 1 率水流域河网及主要监测点空间分布图

2.2 模型应用

本研究使用通用流域污染负荷模型(GWLF)作为评估目标流域面源污染负荷特征的技术工具。GWLF 模型是 1987 年由美国康奈尔大学提出的半

分布式流域水文化学模型^[14],设计用于在中尺度流域(不超过1万平方公里)评估其水文及污染物通量,能够在月尺度上提供可靠的评估结果,并解析污染物来源构成,作为有效的流域管理决策支持工具在国际上有较为广泛的应用^[15-18]。

GWLF模型在率水流域的应用,依照模型通用的操作流程,依次校准模型的水文参数和营养盐参数,得到可靠的模型参数集。水文参数校准以月潭水文站为把口断面,以其上游流域部分作为模型研究对象,使用2000-2007年逐月的实测水量数据作为校准数据,率定模型参数,再使用2008-2013年逐月的实测水量数据作为验证数据。使用已校准得到的水文参数集,以黄山林校水质监测点为把口断面,使用2003-2009年的实测月总氮、总磷负荷通量作为校准

数据,进一步校准模型营养盐参数,并使用2010-2013年的实测月总氮、总磷负荷通量作为验证数据,进而得到面向率水流域可靠的GWLF模型参数集。

本研究中针对未来气候变化影响的模拟,选取2013年为基准年,并基于IPCC的评估报告结果(请参见表1),计算未来变化后的气象数据,并将其输入已校准的GWLF模型,进而评估得到未来不同时期和不同排放情景下的气候条件变化对流域面源污染负荷特征的影响。本研究针对IPCC报告中提出的化石燃料密集型高排放情景(A1FI)和趋同性低排放情景(B1),分别评估得到了目标流域在21世纪20年代、50年代、80年代的模拟气象条件数据,进而利用GWLF模型分析了相应的流域水资源与面源污染负荷特征变化。

表1 IPCC对本研究区域未来气候变化的预测结果

月份	2020s				2050s				2080s			
	温度/℃		降水/%		温度/℃		降水/%		温度/℃		降水/%	
	A1FI	BI	A1FI	BI	A1FI	BI	A1FI	BI	A1FI	BI	A1FI	BI
12-2	1.82	1.50	6	5	4.18	2.81	13	10	6.95	3.88	21	15
3-5	1.61	1.50	2	2	3.81	2.67	9	7	6.41	3.69	15	10
6-8	1.35	1.31	2	3	3.18	2.43	8	5	5.48	3.00	14	8
9-11	1.31	1.24	0	1	3.16	2.24	4	2	5.51	3.04	11	4

本研究中所涉及的模型数据主要包括基础空间数据和气象、水文、水质历史监测数据(表2)。针对原始数据面向模型需求的数据处理转化,主要基于ArcGIS9.3软件平台实现,包括基于流域数字高程地图(DEM)的河网生成与子流域划分、基于泰森多边形技术的气象数据加权平均、基于栅格数据的流域人口统计,基于矢量数据的土地利用类型面积核算,以及基于区县污普数据的流域空间转化等。

表2 率水流域模型分析的原始基础数据来源

项目	来源	精度属性	年份
数字高程图	中国科学院数据云	30m × 30m	2009
土地利用	中国科学院数据云	1:10万	2010
人口	地球系统科学数据共享平台	1km × 1km	2003
雨量	黄山市水务局	逐日	2000-2013
气温	中国气象科学数据共享服务网	逐日	2000-2013
污染源	黄山市环境保护局	区县调查	2008
水量	黄山市水务局	逐月	2000-2013
河道水质	黄山市环境监测站	逐月	2003-2013

3 结果与讨论

3.1 GWLF模型校准结果

基于实测历史数据,依次校准得到了GWLF模型水文参数和营养盐参数,并使用校准后的GWLF模型对率水流域月水量和总氮、总磷负荷通量进行了模拟评估,其结果如图2所示。由模拟结果可知,校准后的GWLF模型能够在月尺度上较好地模拟流域水量和总氮、总磷负荷通量。将GWLF水文模拟结果与月潭水文监测站实测值对比可知,在校准期内,模型纳西效率系数达到0.91,而在验证期,纳西效率系数可达0.95,说明校准得到的GWLF模型水文参数集在目标流域有很好的适用性,可依据该结果进一步开展面向总氮、总磷负荷通量的营养盐模拟。类似地,将GWLF营养盐模拟结果与黄山林校水质监测点实测值对比可知,面向总氮负荷通量模拟的模型纳西效率系数在校准期内为0.72,在验证期为0.69;而面向总磷负荷通量模拟的模型纳西效率系数在校准期内为0.75,在验证期为0.70。上述结果表明,校准得到的GWLF模型能够在月尺度上提供对率水流域水量和总氮、总磷负荷通量的可靠模拟,可基于该模型进一

步评估未来气候变化影响下的流域水文学过程特征变化情况,如 3.2 节所述。

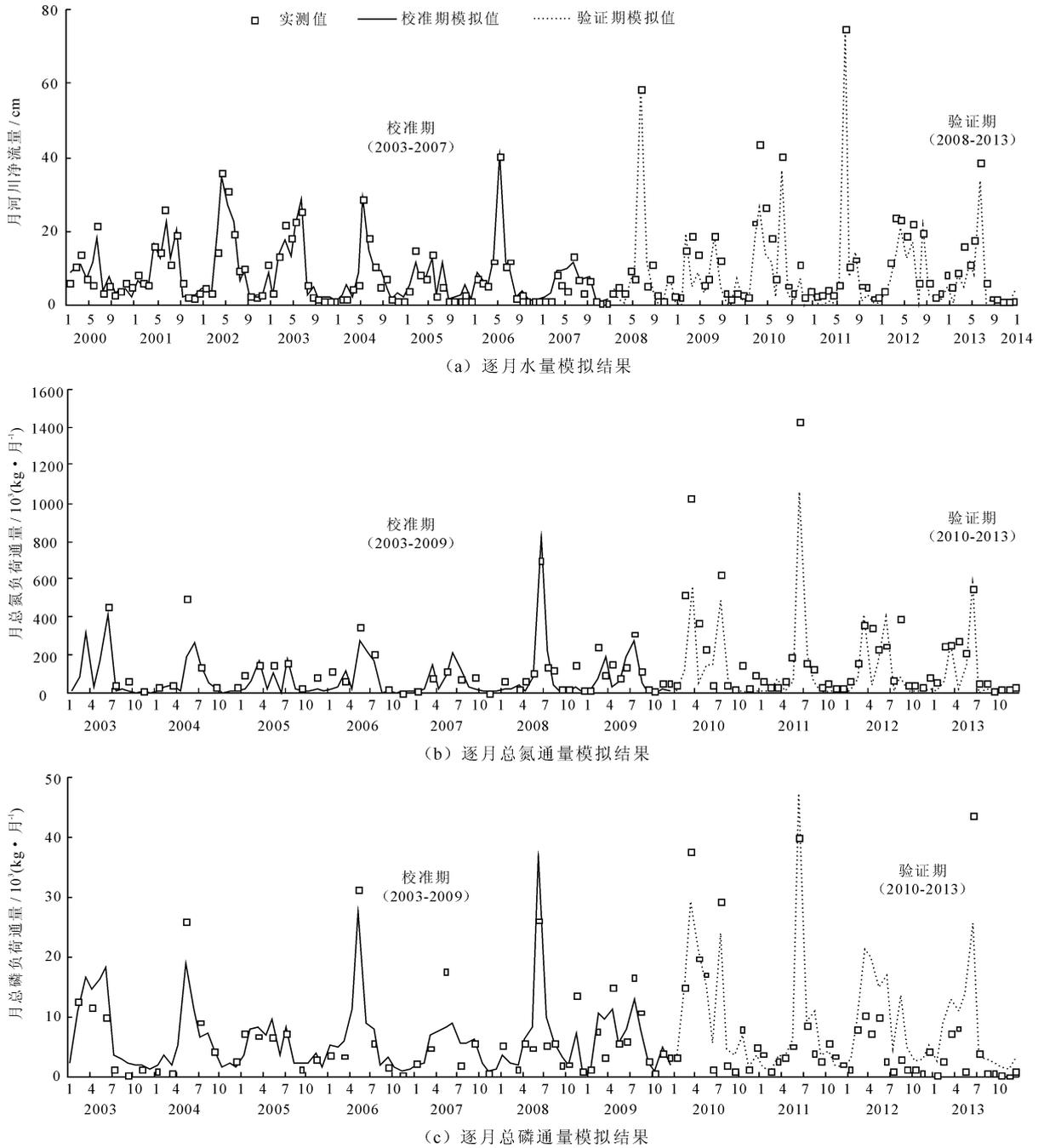


图 2 率水流域 GWLF 模型模拟结果

3.2 气候变化对流域水文过程影响评估

使用已校准的可靠 GWLF 模型,利用基于 IPCC 评估结果得到的未来气象条件模拟数据,评估了 2020s、2050s、2080s 率水流域水量变化的虚拟情景,并以 2013 年为基准年进行了比较分析。结果表明,从流域水资源量的角度来看,未来气候变化对流域地表径流、地下水、河川径流、蒸发等主要水文过程均有不同程度的影响,如图 3 所示。

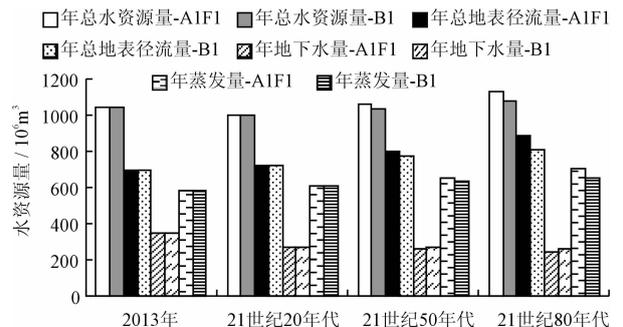


图 3 未来气候变化影响下的流域水文过程评估

由模型模拟分析结果可知,在未来气候变化影响下,流域年总水资源量呈现先减少后增加的趋势。在2020年前后年总水资源量达到最低值,且在A1FI高排放情景下较B1低排放情景更低。而后,年总水资源量逐渐升高,且在A1FI高排放情景下较B1低排放情景有更多的水资源量,到2080年前后,在A1FI和B1情景下流域年总水资源量较基准年份2013年会分别增加7.93%和2.76%。具体到影响流域水资源量的各个因素,因蒸发作用导致的水量损失呈逐年升高的趋势,且在A1FI高排放情景下更高,可能与流域气温的升高有关。流域地下水量呈逐渐降低的趋势,且同样在A1FI高排放情景下更为显著。流域地表径流量则呈现出逐渐升高的趋势,且在A1FI高排放情景下更显著,可能与其伴随蒸发量增加导致的降雨量增加有关。综合来看,在未来气候变化影响下流域水资源量会呈现一定的上升趋势,且来源比例也会发生显著变化,其中地表径流量所占比重升高,而地下水量所占比重降低。伴随上述流域水文过程特征变化,流域营养盐污染负荷过程也会发生相应的变化,污染物通量绝对量及其来源比例构成等负荷特征均有一定程度的改变,其结果如3.3节所述。

3.3 气候变化对流域营养盐污染负荷过程的影响评估

与水文过程类似,基于IPCC评估结果计算得到的未来气象条件模拟数据,评估了2020s、2050s、2080s率水流域营养盐污染负荷的变化情景,并以2013年为基准年进行了对比评估。分析结果可知,流域总氮污染负荷在未来气候变化背景下有一定程度的下降,如图4所示。

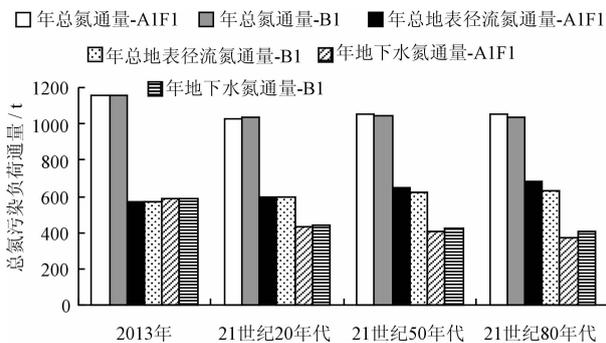


图4 未来气候变化影响下的流域总氮污染负荷特征变化

具体分析,受未来气候变化的影响,流域年总地表径流氮通量呈持续增加的趋势,而年总地下水氮通量呈显著下降的趋势,其与未来地表径流和地下水量变化的趋势一致,但地下水负荷通量的削减较

地表径流负荷的增加更为显著,因此整体的总氮通量较基准年均有一定程度的下降。另一方面,在高排放的A1FI情景下,相同年份各种形式的总氮通量均较低排放的B1情景高,说明人类温室气体排放会潜在的增加流域总氮面源污染负荷压力。

关注目标流域总磷面源污染负荷受未来气候变化的影响,其污染负荷特征变化与总氮类似,如图5所示。具体来看,流域年总地表径流磷通量呈上升的趋势,而年总地下水磷通量呈下降趋势,整体上的年总磷负荷通量较基准年有一定程度的下降,但伴随气象条件的持续变化仍呈上升趋势。类似的,流域总磷污染负荷通量与未来地表径流和地下水量的变化趋势一致,同时在A1FI高排放情景下亦有更强的磷污染通量排放。

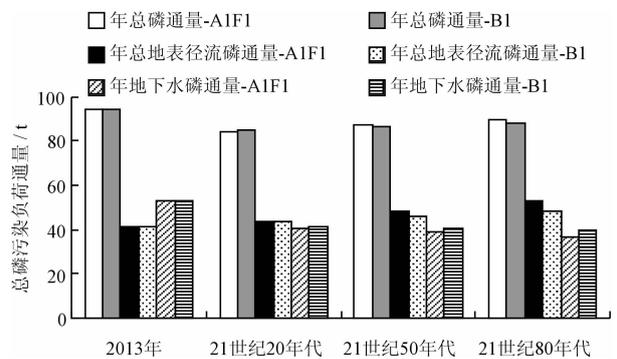


图5 未来气候变化影响下的流域总磷污染负荷特征变化

4 结论

本文基于IPCC提出的气候变化评估报告结果,计算得到能够表征未来气候变化影响的模拟气象数据,进而使用GWLF模型评估了未来气候变化影响下新安江上游率水流域的水文及营养盐污染负荷特征变化响应。结果表明,未来气候变化会对流域水资源量与面源污染负荷特征均造成一定程度的影响。其中,地表径流量和蒸发量逐渐上升而地下水量逐渐下降,进而表现为年总水资源量呈先减少后增加的趋势。流域氮、磷营养盐通量较2013年基准年均有一定程度下降,但在未来年总氮通量先增加后减少,而年总磷通量则逐渐增加,且两种污染物均在A1FI排放情景下有更高的污染负荷量,表明人类温室气体的排放会潜在地增加流域水体面源污染负荷,应予以特别关注。

参考文献:

[1] 吕川,刘德敏,刘特. 辽河源头区流域农业非点源污染负

- 荷估算[J]. 水资源与水工程学报. 2013,24(6):185-191.
- [2] Kaushal S S, Groffman P M, Band L E, et al. Tracking non-point source nitrogen pollution in human-impacted watersheds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19): 8225-8232.
- [3] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. *中国环境科学*. 2015, 35(5): 1511-1519.
- [4] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(5): 712-716.
- [5] 刘聚涛, 钟家有, 付敏, 等. 鄱阳湖流域农村生活区面源污染特征及其影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(7): 1012-1018.
- [6] 付少杰, 田嘉宁, 邢君杰, 等. 灵武农场非点源污染特征分析及控制措施[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(3): 157-160.
- [7] Jennings E, Allott N, Pierson D C, et al. Impacts of climate change on phosphorus loading from a grassland catchment: Implications for future management [J]. *Water Research*, 2009, 43(17): 4316-4326.
- [8] Sha Jian, Liu Min, Wang Dong, et al. Application of the ReNuMa model in the Sha He river watershed: Tools for watershed environmental management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124(2): 40-50.
- [9] 王刚, 严登华, 尹军, 等. 气候变化对淮北市面源污染的影响及综合调控[J]. *环境保护科学*, 2011, 37(6): 41-46.
- [10] Cruz R V, Harasawa M Lal, et al. Asia, climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability, contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007: 469-506.
- [11] Baer R, Rouholahnedjad E, Rahman K, et al. Climate change and agricultural water resources: A vulnerability assessment of the Black Sea catchment [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 46: 57-69.
- [12] Wagner P D, Reichenau T G, Kumar S, et al. Development of a new downscaling method for hydrologic assessment of climate change impacts in data scarce regions and its application in the Western Ghats, India [J]. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(3): 435-447.
- [13] Narsimlu B, Gosain A K, Chahar B R. Assessment of future climate change impacts on water resources of upper Sind river basin, India using SWAT model [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(10): 3647-3662.
- [14] Haith D A, Shoemaker L L. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1987, 23(3): 471-478.
- [15] 杜新忠, 李叙勇, 张汪寿, 等. 基于 GWLF 模型的流域总氮负荷模拟及污染源解析[J]. *水资源与水工程学报*. 2014, 25(3): 19-23.
- [16] Sha Jian, Li Zeli, Swaney D P, et al. Application of a Bayesian watershed model linking multivariate statistical analysis to support watershed-scale nitrogen management in China [J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(11): 3681-3695.
- [17] Lyon Steve W, Meidani Roya, van der Velde Ype, et al. Seasonal and regional patterns in performance for a Baltic sea drainage basin hydrologic model [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2015, 51(2): 550-566.
- [18] Matonse A H, Pierson D C, Frei A, et al. Investigating the impact of climate change on New York City's primary water supply [J]. *Climatic Change*, 2013, 116(3-4): 437-456.