

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.04.012

# 山美水库流域氮素流失的时间过程及影响因素

刘梅冰<sup>1,2,3</sup>, 陈兴伟<sup>2,3</sup>, 陈莹<sup>2,3</sup>

(1. 福建师范大学 地理所, 福州 350007; 2 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007;  
3 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

**摘要:** 通过构建山美水库流域 SWAT 模型, 对日场次暴雨过程中流域出口氮素负荷和浓度过程随降雨、径流的变化特征进行了模拟, 并采用线性相关分析, 对不同降雨条件下的产流与氮素流失的相关性进行研究。结果发现, 山美水库流域产流过程表现出明显的滞后效应, 径流峰值以滞后于降雨峰值 1 d 为主要特征; 氮素流失量变化特征与降雨、径流变化特征基本一致, 但 TN 负荷峰值大多滞后于降雨峰值 1~2 d, TN 浓度过程基本与降雨过程相反; 不同等级降雨条件下, 氮素流失量随着雨强的增加而增大, 流域出口径流与 TN 负荷呈显著线性相关, 径流是氮素流失变化的主导因子。

**关键词:** 氮素流失; 降雨径流过程; 时间变化特征; SWAT 模型; 山美水库流域

**中图分类号:** X524   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0659-05

## Temporal characteristics and impact factors of nitrogen loss in Shanmei Reservoir watershed

LIU Meibing<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xingwei<sup>2,3</sup>, CHEN Ying<sup>2,3</sup>

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology (Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province), Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Based on the development of SWAT model in the Shanmei Reservoir watershed, variation characteristics of TN load and concentrations with the precipitation and runoff during the processes of rainstorm at the outlet of the watershed were simulated. Furthermore, linear correlation analysis was conducted to analyze the relationship between runoff and nitrogen loss under different precipitation intensities. The results showed that the peak of runoff lagged one day behind the peak of rainfall. During the process of rainstorm, nitrogen loss varied consistently with the variation process of precipitation and runoff, and TN load showed hysteresis properties lagging behind precipitation peak with one or two additional days, while TN concentration process showed the opposite trend with precipitation process. Under different conditions of rainfall intensities, average loss rate of nitrogen increased with the increasing of rainfall intensity, and runoff showed a statistically significant ( $P < 0.01$ ) positive linear relationship with TN load. Runoff is the primary factor affecting nitrogen loss.

**Key words:** nitrogen loss; process of precipitation and runoff; temporal characteristic; SWAT model; Shanmei Reservoir watershed

由农业流域氮营养盐流失产生的地表水体水质恶化、富营养化问题已经成为国内外政府和社会关注的焦点之一。降雨径流作为土壤侵蚀和污染物扩散的主要驱动力, 对流域氮营养盐流失有重要影响<sup>[1]</sup>。研究流域氮素随降雨径流流失的时间变化特征, 对于深入认识氮的流失机理、控制流域非点源氮污染具有重要意义。

近年来, 国内外学者针对氮素流失开展了大量研究<sup>[2-4]</sup>。Vinay 等<sup>[5]</sup>认为, 氮素流失过程与产流过程基本一致, 雨季中

氮素的大量流失, 导致水体氮浓度明显高于雨后的浓度; 杨小林等<sup>[6]</sup>对农林复合小流域的研究发现, 在中雨和暴雨事件过程中, 初期径流氮浓度较低、中后期逐渐升高, 呈现“前低后高”的特点; 李恒鹏<sup>[7]</sup>在太湖流域野外样地的观测发现, 暴雨过程中 TN 浓度表现为先升高后降低而后趋于稳定; 任秀文等<sup>[8]</sup>开展人工降雨实验研究, 认为累积硝态氮产生量与降雨时间、累积产流量之间均存在显著的线性相关。目前, 已有研究主要采用野外观测自然降雨或人工降雨的方式, 多

收稿日期: 2014-11-21   修回日期: 2015-07-05   网络出版时间: 2015-07-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150723.2020.019.html>

基金项目: 福建省科技厅省属公益类科研院所项目(2014R10344); 福建省科技厅重点项目(2013N0013); 福建省教育厅 B 类项目(JB12038)

作者简介: 刘梅冰(1981-), 女, 福建福清人, 讲师, 博士, 主要从事流域水文过程与水环境研究。E-mail: lmb\_18@163.com

通讯作者: 陈兴伟(1963-), 男, 福建福鼎人, 教授, 博士生导师, 主要从事流域水文过程及河道水动力污染物过程模拟方面研究。E-mail: cxwchen215@163.com

集中在田间地块或坡面尺度,大部分实验观测时长有限,难以反映流域尺度上较长时间序列内氮素流失对暴雨径流过程的响应特征。

分布式水文模型 SWAT 是研究流域非点源污染的有效途径,可以模拟预测农业管理措施对流域水文、泥沙和营养盐物质的影响,在国内外得到了广泛应用<sup>[9-10]</sup>。目前, SWAT 模型关于氮营养盐日过程的模拟已经可以达到精度要求<sup>[11-12]</sup>,但有关氮素流失时间分布特征的大部分研究依然针对较长的时间尺度,如年、月尺度,而较少从场次暴雨过程的短时间尺度进行分析。本文通过构建山美水库流域 SWAT 模型,探讨日尺度下流域氮素流失负荷和氮浓度随暴雨径流过程的时间变化特征,以期为流域非点源氮素污染的控制和治理提供科学的理论支撑。

## 1 研究区概况

山美水库位于泉州市晋江东溪中游,是一座集灌溉、供水、防洪、发电等多功能于一体的大型水利枢纽工程,保证下游 400 多万人口的饮水安全,是晋江流域目前唯一的一座大型水库,被誉为泉州人民的“生命库”。山美水库大坝以上集水面积 1 023 km<sup>2</sup>,主要有桃溪和湖洋溪两大支流,多山地和丘陵,海拔约在 40~1360 m 之间。流域气候属亚热带海洋性季风气候,年降雨量约为 1 600 mm;年内降雨季节变化大,其中台风雷雨季(7 月-9 月)降水量占全年的 37%~39%,而 10 月-12 月为干季,降水量仅为全年 20%。区内降水量年际变化大,枯水年份降水量不及丰水年份的一半。流域土地利用类型以林地为主,约占流域总面积的 68%,其次是园地和耕地,约占 12% 和 11%,建设用地占 5%,其余有水域、草地及未利用地等。

近年来,随着山美水库流域社会经济的迅速发展,上游耕作作业尤其是坡耕地茶果园的大量垦殖、农业化肥的大量使用、畜禽养殖业的发展和农村生活污水的无序排放等,流域非点源氮素污染问题突出,对下游山美水库造成显著影响:库区水质不断恶化, TN 含量超标严重(以 NO<sub>3</sub>-N 为主),水质基本处于 Ⅴ 类标准,水库处于由中营养化向富营养化发展的阶段<sup>[3]</sup>。



图 1 山美水库流域水系分布

Fig. 1 Stream networks of Shanmei reservoir watershed

## 2 研究方法

### 2.1 SWAT 模型构建

利用 SWAT 模型进行流域非点源污染模拟时,需要输

入的数据量巨大。本研究数据包括:分辨率为 30 m × 30 m 的数字高程模型(DEM);永春和德化 2 个气象站 1990 年-2010 年的逐日最高、最低气温、风速、相对湿度以及 16 个雨量站的逐日降水数据;1:50 万福建省数字化土壤图。根据 2006 年 TM 影像进行目视解译的土地利用数据,以及来自山美水库及永春县水文站的实测水文资料。

构建模型时,将流域划分为 38 个子流域和 297 个水文响应单元(HRU)(图 1)。通过实地调研和资料查找,对流域内农业管理措施进行概化,并将其输入农业管理模块。其中,水稻种植一般为一年两熟,旱地以薯类和蔬菜为主,园地主要种植水果和茶叶。

本研究采用手动调参,分别对影响径流、泥沙和营养物过程的参数进行率定;选择 2001 年-2005 年和 2006 年-2010 年山美水库实测入库日流量,分别用于模型产流的率定和验证。结果显示,径流实测值与模拟值的吻合程度较高,日  $Ens$  均超过 0.86。但是,产沙仅有 1995 年-1997 年数据进行率定,月  $Ens=0.77$ ,日  $Ens=0.58$ ,也可以达到模拟精度要求。考虑到水质数据有限,因此以 2006 年-2008 年为率定期,2009 年-2010 年为验证期,率定期总氮(TN)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)浓度的相对误差都在 15% 以内,验证期都在 23% 以内。由于水质实测数据本身存在一定的误差,加上水文和泥沙部分的误差也会累积到水质部分的计算,因此认为本文中的水质误差是可以接受的。

总体来看, SWAT 模型的模拟效果达到精度要求,可以较好地用于山美水库流域非点源污染方面的模拟。有关率定的具体过程详见文献<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 流域氮素流失时间特征的分析方法

首先,根据率定好的山美水库流域 SWAT 模型,模拟 1991 年-2010 年气象条件下各子流域的降雨、径流和氮素流失的日变化过程。其次,采用泰森多边形法计算 1991 年-2010 年流域面平均降雨量,挑选出 84 场降雨峰值超过 50 mm 的暴雨过程,分析流域出口的 TN 负荷、TN 浓度随降雨径流的变化特征,并统计相应的径流峰值、TN 负荷峰值以及 TN 浓度低谷分别滞后于降雨峰值 0 d、1 d、2 d、3 d 的场次,分析山美水库流域氮素流失的滞后特性。在此基础上,将日降雨量分为小雨(<10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)、暴雨(50~100 mm)、大暴雨(>100 mm)等 5 个等级,分别计算不同等级降雨条件下的山美水库流域 TN 流失率,并采用线性回归分析方法,分析流域出口的 TN 负荷与径流的相关性,进一步揭示降雨、径流对流域氮素流失的影响。

## 3 结果分析

### 3.1 降雨径流过程

从径流过程滞后于降雨过程的场次统计可以看出(表 1),径流峰值滞后降雨峰值 1 d 的场次高达 75 场,占全部样本总数的 89.29%;滞后 2 d 的有 6 场,比例为 7.14%;与降雨峰值同一天出现的有 3 场,比例仅 3.57%。以 1997 年 5 月 1 日-11 日的降雨过程为例(图 2),降雨峰值出现在 5 月 6 日,达到 66.8 mm,流量峰值比降雨峰值滞后 1 d,出现在 5 月 7 日,达到 706.4 m<sup>3</sup>/s。山美水库流域 95% 以上的面积由

林地、耕地、园地、草地等透水下垫面组成,其中,林地面积超过68%,对降雨的截留效应显著,雨水下渗、壤中流形成过程使得流域降雨汇集到流域出口需要一定的时间,因此,流域径流过程呈现显著的“滞后效应”。径流峰值与降雨峰值也有出现在同一天的,主要是由于流域前期降雨量较大,土壤水分相对饱和,导致径流与降雨同步达到峰值,李瑞玲在太湖流域的研究也得到了相似的结果<sup>[16]</sup>。当出现径流峰值滞后降雨峰值达到2 d时,通常是前期降雨量小,而降雨峰值后1 d的降雨量依然较大,导致河川径流量继续增大,峰值的出现时间因此推迟。例如,1991年9月5日降雨出现峰值(90.8 mm),9月6日、7日的降雨量分别达到80.7 mm、71.4 mm,径流量持续增大,直至9月7日达到580.1 m<sup>3</sup>/s的峰值。

总体上看,山美水库流域的径流过程以滞后于降雨过程1 d为主要特征,但不同降水过程的径流滞后时间与延长效应差

异很大,这与各场降雨径流过程影响因子的复杂程度有关,如降雨量、降雨强度以及前期流域水分状况、植被覆盖度等<sup>[17-18]</sup>,尚且难以用统一的数学模型来估算径流滞后效应<sup>[19]</sup>。

表1 1991年-2010年暴雨系列中径流、氮素流失滞后于降雨峰值天数

滞后降雨峰值天数	径流峰值		TN 负荷峰值		TN 浓度谷值	
	场次	比例(%)	场次	比例(%)	场次	比例(%)
0	3	3.57	0	0.00	74	88.10
1	75	89.29	51	60.71	10	11.90
2	6	7.14	28	33.33	0	0.00
3	0	0.00	5	5.95	0	0.00

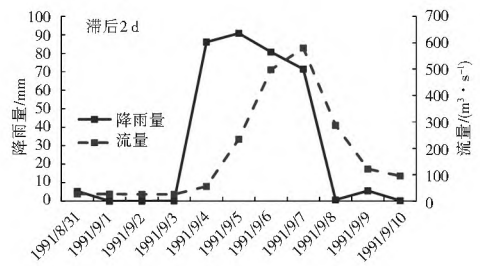
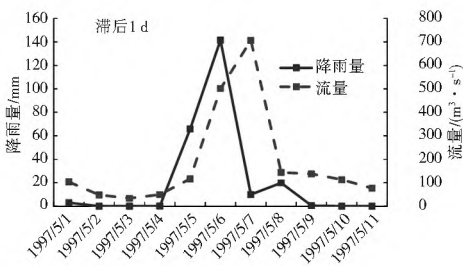


图2 典型场次降雨径流过程

Fig. 2 The process of precipitation and runoff

### 3.2 氮素流失过程特征

山美水库流域的氮素流失量变化过程表现出与径流相似、滞后于降雨过程的特征,随着降雨、径流量的增加,通过径流携带的氮营养盐负荷也随之增大,且表现出明显的滞后性(图3)。从TN负荷峰值滞后于降雨峰值天数的场次可以看出(表1),滞后降雨峰值1 d的有51场,比例占60.71%;滞后2 d的有28场,比例为33.33%;滞后3 d的有5场,比例为5.95%。以1997年5月1日-11日的降雨过程为例(图3),最大TN负荷量出现在5月7日,比降雨峰值滞后1 d。

这主要是由于流域氮素是在降雨冲刷和径流携带下输出的,径流滞后降雨1 d, TN负荷也随着滞后1 d。当降雨峰值过后的雨量依然较高时,径流峰值滞后降雨的时间延长至2 d,径流冲刷导致氮素流失持续增大, TN负荷峰值则相应出现在径流峰值之后,即滞后降雨峰值2~3 d,如1991年8月31日-9月10日的降雨过程, TN负荷是在降雨峰值出现后的第3 d才达到峰值。由此可见,山美水库流域的氮素迁移集中在降雨后期,氮素负荷峰值以滞后于降雨峰值1~2 d为主要特征,径流的滞后是导致氮素流失量滞后的重要原因。

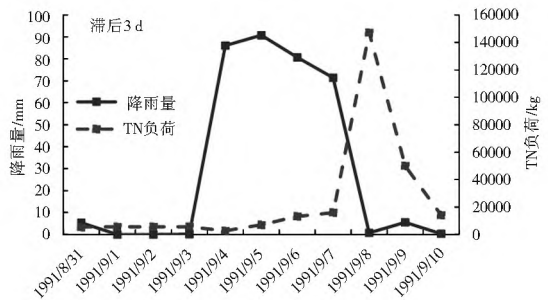
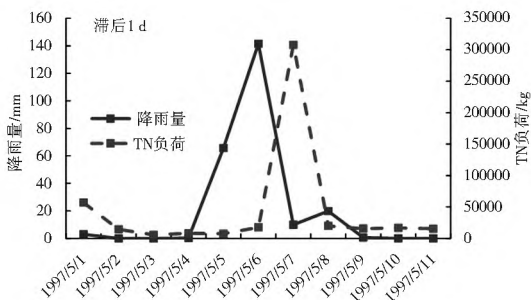


图3 典型场次降雨与TN负荷过程

Fig. 3 The process of precipitation and TN load

从TN浓度低谷的滞后天数可以看出(表1),有74场降雨过程的TN浓度低谷出现在降雨峰值的同一天,比例高达88.1%;滞后1 d的场次有10场,比例为11.9%。总体来看,浓度低谷一般出现在降雨峰值同一天(图4),即TN浓度的变化过程基本遵循与降雨过程成反比的规律,这与韩建刚等人<sup>[20]</sup>的结论基本相同。随着降雨历时延长,降雨对径流中氮

素污染物的稀释作用增强,地表径流的高强度稀释作用造成氮素浓度大幅度降低,在降雨、流量峰值附近时间达到最低值<sup>[4,21]</sup>。倘若降雨峰值后1 d的雨量依然较高,降雨继续稀释地表水中的氮素,则TN浓度出现低谷的时间则会滞后于降雨峰值,如1991年9月6日, TN浓度在降雨峰值后1 d才达到0.31 mg/L的低值(图4)。氮素浓度随着降雨峰值达到

低谷后,开始随着降雨的减少和径流的退水过程开始反弹,逐渐升高达到浓度峰值。这主要是由于产流停止后径流量

减少,稀释作用减弱,而壤中流开始淋溶析出氮素,使 TN 浓度随之上升<sup>[16]</sup>。

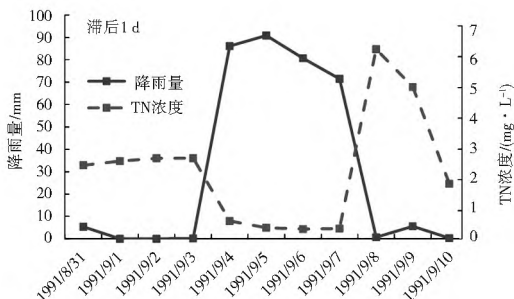
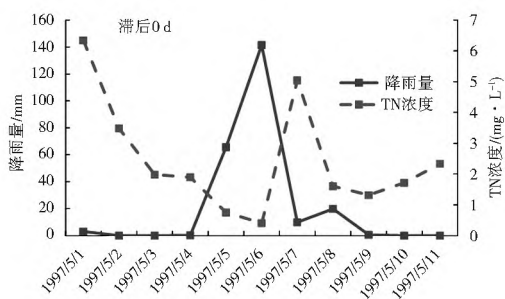


图 4 典型场次降雨与 TN 浓度过程

Fig. 4 The process of precipitation and TN concentration

### 3.3 不同降雨条件下的氮素流失与径流关系

从不同降雨条件下的 TN 流失率可以看出(表 2),氮素流失率随着降雨强度的增加而增大,表现为大暴雨 > 暴雨 > 大雨 > 中雨 > 小雨,这与井光花等<sup>[18]</sup>在沂蒙山区孟良崮小流域的研究规律基本一致。从流域出口的径流量与 TN 负荷的 Pearson 相关分析结果可以看出,不同等级降雨强度下的产流与 TN 流失负荷量之间存在显著的线性相关( $P < 0.01$ ),其中,大雨、暴雨以及大暴雨条件下的产流与 TN 负荷的相关性明显大于小雨和中雨的相关性。降雨强度较大时,径流冲刷效应强烈,对氮营养盐的侵蚀、淋溶和迁移作用就大;反之,降雨条件较弱时,地表产流量小,地表侵蚀作用随之降低,对氮营养盐的迁移作用也相对较小。由此可见,不同的降雨量、雨强影响着流域氮营养盐流失的特性,而径流总是导致地表氮素流失量差异的主导因子。

表 2 不同降雨条件下日尺度 TN 流失率及与流量的相关性  
Tab. 2 Correlation coefficients between runoff and TN loss rate under different precipitation intensities

降雨级别	24 h 降雨量/mm	样本数	相关性 r	TN 流失率/(kg · hm <sup>-1</sup> )
小雨	0~ 10	6 255	0.514**	7.16
中雨	10~ 25	639	0.453**	7.44
大雨	25~ 50	296	0.781**	8.09
暴雨	50~ 100	102	0.664**	8.49
大暴雨	> 100	13	0.869**	10.03

注:\*\*表示相关显著水平为 0.01(双尾检测)。

## 4 结论

(1) 受山美水库流域下垫面覆盖条件的影响,流域产流过程表现出明显的滞后效应,径流峰值以滞后于降雨峰值 1 d 为主要特征。

(2) 暴雨过程中,氮素流失量与降雨、径流变化过程基本一致,受径流的滞后效应影响,TN 负荷峰值大多滞后于降雨峰值 1~ 2 d;TN 浓度变化过程基本遵循与降雨过程相反的规律,浓度低谷一般出现在降雨峰值同一天,TN 浓度峰值的出现则伴随着降雨减少和径流的退水过程。

(3) 不同等级降雨条件下,氮素流失率随着降雨强度的增加而增大;流域出口径流与 TN 负荷存在显著的线性相关,径流是导致流域氮素流失量差异的主导因子。

### 参考文献(References):

- [1] 童晓霞,崔远来,史伟达.降雨对灌区农业面源污染影响规律的分布式模拟[J].中国农村水利水电,2010(9):33-35. (TONG Xiaoxia, CUI Yuanlai, SHI Weida. Distribution simulation of impact of rainfall on agricultural non point pollution in irrigation districts[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(9): 33-35. (in Chinese))
- [2] Boithias L, Srinivasan R, Sauvage S, et al. Daily Nitrate Losses: Implication on Long Term River Quality in an Intensive Agricultural Catchment of Southwestern France [J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43: 46-54.
- [3] Zhu Q, Schmidt J P, Buda A R, et al. Nitrogen Loss from a Mixed Land Use Watershed as Influenced by Hydrology and Seasons [J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3-4): 307-315.
- [4] 魏林宏,张斌,程训强.水文过程对农业小流域氮素迁移的影响[J].水利学报,2007,38(9):1145-1150. (WEI Lin hong, ZHANG Bin, CHENG Xun qiang. Effects of hydrological factors on nitrogen loss in small agricultural catchments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(9): 1145-1150. (in Chinese))
- [5] Vinay N, Prasanna H G, Mulla D J. Effects of changes in N-fertilizer management on water quality trends at the watershed scale [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11): 1855-1860.
- [6] 杨小林,朱波,董玉龙,等.紫色土丘陵区小流域非点源氮迁移特征研究[J].水利学报,2013,44(3):276-283. (YANG Xiaolin, ZHU Bo, DONG Yulong, et al. Transport processes of diffuse nitrogen in typical catchments in the hilly area of purple soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(3): 276-283. (in Chinese))
- [7] 李恒鹏,金洋,李燕.模拟降雨条件下农田地表径流与壤中流氮素流失比较[J].水土保持学报,2008,22(2):6-8. (LI Heng peng, JIN Yang, LI Yan. Comparative study of nitrogen losses between surface flow and interflow of farmland under artificial rainfall conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 6-8. (in Chinese))
- [8] 任秀文,李开明,刘爱萍,等.模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究[J].中国环境科学,2013,33(S1):119-124. (REN Xiurwen, LI Kai ming, LIU Aiping. Characteristics of nitrate nitrogen loss on red soil slope under simulated rainfall condi

- tions[J]. China Environmental Science, 2013, 33(S1): 119-124. (in Chinese)
- [9] Naramngama S, Tong S T Y. Environmental and economic implications of various conservative agricultural practices in the Upper Little Miami River basin [J]. Agricultural Water Management. 2013 (119) : 65-79.
- [10] De Girolamo AM, Lo Porto A. Land use scenario development as a tool for watershed management within the Rio Manu Basin [J]. Land Use Policy, 2012, 29: 691-701.
- [11] Liu X L, Chen Q W, Zeng Z X, Study on nitrogen load reduction efficiency of agricultural conservation management in a small agricultural watershed [J]. Water Science and Technology. 2014, 69(8) : 1689-1696.
- [12] Ye L, Grimm N B, Modelling potential impacts of climate change on water and nitrate export from a mid sized, semiarid watershed in the US Southwest [J]. Climatic Change, 2013, 120: 419-431.
- [13] 周真明, 沈春花, 涂帆, 等. 山美水库综合水质标识指数评价[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2010, 31(2): 215-217. (ZHOU Zhen ming, SHEN Chur hua, TU Fang, et al. Water quality assessment of shanmei reservoir by the comprehensive water quality identification index [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2010, 31(2): 215-217. (in Chinese))
- [14] 杨柳, 刘梅冰, 陈莹, 等. 山美水库集水区径流模拟的日尺度 SWAT 模型[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 3-5, 9. (YANG Liu, LIU Meibing, CHEN Ying, et al. Daily runoff simulation in shanmei reservoir catchment based on SWAT model [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 3-5, 9. (in Chinese))
- [15] 刘梅冰, 陈冬平, 陈兴伟, 等. 山美水库流域水量水质模拟的 SWAT 与 CEQUALW2 联合模型[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12) : 3574-3580. (LIU Meibing, CHEN Dongping, CHEN Xingwei, et al. Coupling SWAT and cequalw2 models to simulate water quantity and quality in shanmei reservoir watershed [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12) : 3574-3580. (in Chinese))
- [16] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(5): 1220-1224. (LI Rui ling, ZHANG Yong chun, LIU Zhuang, et al. Rainfall intensity effects on nutrients transport in surface runoff from farmlands in gentle slope hilly area of Taihu Lake Basin [J]. Environmental Science, 2010, 31(5): 1220-1224. (in Chinese))
- [17] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1353-1358. (JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jialiang, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in typical rainfall runoff events in a small watershed in hilly area of purple soil [J]. Journal of Agro Environment Science, 2008, 27(4): 1353-1358. (in Chinese))
- [18] 井光花, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 120-125. (JING Guang hua, YU Xing xiu, LIU Qian jin, et al. Characteristics of soil nitrogen loss under different intense rainfalls in Yimeng Mountainous Area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 120-125. (in Chinese))
- [19] 王金叶, 李海防, 段文军, 等. 漓江上游森林小流域径流过程及其影响因素[J]. 林业科学, 2013, 49(6): 149-153. (WANG Jinye, LI Haifang, DUAN Wenjun, et al. Runoff processes and the influencing factors in a small forested watershed of upper reaches of Lijiang River [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(6): 149-153. (in Chinese))
- [20] 韩建刚, 李占斌. 紫色土丘陵区不同土地利用类型小流域氮素流失规律初探[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 160-165. (HANG Jiangan, LI Zhanbin. Process characteristics of nitrogen loss by runoff in different land use watersheds in purple soil hilly region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 160-165. (in Chinese))
- [21] Jia H Y, Lei A L, Lei J S, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil [J]. Agricultural Water Management, 2007, 89: 89-97. 00

## 《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿网址: [www.nsbdqk.net](http://www.nsbdqk.net), 电话: 0311-85020535, 85020639, 85020512。

《南水北调与水利科技》编辑部