

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生, 王茜, 李嘉诚, 涂媛杰 (2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇, 孙兆彬, 李梓铭, 张小玲, 杨慧玲 (2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧, 张海亮, 向欣, 张鹏, 程水源, 魏巍 (2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群, 赵普生, 王迎春, 苗世光, 高健 (2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰, 周震, 黄玉虎, 王堃, 聂滕, 聂磊, 秦建平 (2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达, 张春林, 白莉, 沈雨冉, 王伯光, 刘军, 杨立辉 (2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰 (2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀, 安俊琳, 邵平, 邹嘉南, 林旭, 张玉欣 (2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞, 朱潇, 沈健林, 曾冠军, 王娟, 吴金水, 李勇 (2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔, 谭正莹, 赵慧, 李继华, 田林玮, 王青曜, 米持真一, 吕森林 (2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇, 汪倩, 张姝琳, 张素坤, 邓春萍, 张洪铭, 朱盟翔, 蒋昕, 朱成旺, 任燕玲 (2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 罗程钟, 徐凤, 何秀清 (2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇, 黄成, 胡馨遥, 李莉, 陈勇航, 徐健 (2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明, 赵成志, 徐宁, 谭丕强, 胡志远 (2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦, 李建鸿, 孙平安, 何师意, 于爽 (2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁, 陈维梁, 高扬, 郝卓, 于贵瑞 (2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟, 周川, 纪道斌, 刘德富, 任豫霜, Douglas Haffner, 谢德体, 张磊 (2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹, 王圣瑞, 焦立新, 张云, 高秋生, 杨枫 (2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 戴泽龙, 胥焘, 黄应平 (2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉, 田倩, 许大毛, 占长林, 刘婷, 姚瑞珍, 刘先利, 肖文胜 (2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲, 孙迎雪, 杨哲, 胡春芳, 常学明, 胡洪营 (2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨, 姜括, 谢文龙, 汪磊 (2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣, 李田, 时珍宝 (2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥, 常杉, 李飞, 徐毅, 高维春 (2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红, 孙博成, 杨小雨, 李克斌 (2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇, 林建伟, 詹艳慧, 邢云青, 黄宏, 储鸣, 王星星 (2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英, 朱星, 周翔, 徐亚东, 王菊, 韦诚, 高雅洁, 周橄 (2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊, 张胜花, 张翔凌, 王广军 (2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲, 彭党聪, 常蝶 (2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉, 于德爽, 李津, 单晓静, 杨振琳 (2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉, 韩梅琳, 仇天雷, 高敏, 孙兴滨, 王旭明 (2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正, 刘凯, 王凡, 林兴, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友, 陈威, 马兆瑞, 刘小英, 陈晓国, 余文韬, 夏媛媛, 黄健 (2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞, 杨新萍, 张雯雯 (2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森, 牛全睿, 徐雨梅, 王陇梅, 王岱, 武少华 (2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳, 李激, 徐巧, 付磊, 尤世界, 王硕 (2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢, 王磊, 王亚楠 (2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙, 周永娜, 柴宝峰, 贾彤, 李鑫 (2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端, 卢新卫 (2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏, 杨校毅 (2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 黄润林, 刘德玲, 彭焕龙, 黄玲, 王欣, 蒋晓璐 (2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐, 邓潇, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟, 杨文骏, 辜娇峰, 周航, 高子翔, 廖柏寒 (2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃, 雷鸣, 周航, 杨文骏, 廖柏寒, 胡立琼, 曾敏 (2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊, 李倩倩, 沈羽, 顾若尘, 盛好, 占新华 (2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟, 毕二平 (2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀, 陈浩, 肖孔操, 杨利琼, 文丽, 李德军 (2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 周应田, 杨学云, 顾江新 (2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东, 白瑶, 李秋旭, 王英, 金军 (2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能, 马鹏程, 张丽娟, 陈棉彪, 黄楚珊, 柳晓琳, 胡国成, 许振成 (2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣, 葛明民, 刘勇迪, 贾红华, 闫志英, 雍晓雨, 吴夏荒, 周俊 (2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽, 杨肇勋, 景盛翱 (2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

基于 SWAT 与 DNDC 模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程

韩宁^{1,2}, 陈维梁³, 高扬^{1,2*}, 郝卓^{1,2}, 于贵瑞²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 本研究通过对亚热带香溪河小流域的氮输出进行长期监测, 并通过 DNDC 与 SWAT 模型对流域氮素流失进行对比模拟研究, 以期合理建立适合亚热带流域氮循环模型提供科学依据。结果表明: ① 影响 DNDC 模型模拟小流域内氮素流失的关键参数包括降水、坡度以及氮肥施用量, 而影响 SWAT 模型模拟的关键参数包括地下水滞后系数、最大冠层截留量、基流系数和土壤蒸发补偿系数; ② DNDC 模型模拟小流域内 2014 年的径流量、TN 和 NO_3^- -N 排放量与实测值的偏差分别为 5.19%、8.10% 和 71.70%, SWAT 模型模拟小流域内 2014 年的 TN、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的排放量与实测值的偏差分别为 2.04%、14.29% 和 8.89%; ③ 通过对 SWAT 与 DNDC 模拟结果对比分析香溪小流域氮素流失时空分布特征, 进一步耦合了 DNDC 和 SWAT 模型, 有助于提高亚热带流域氮素流失模拟精确度。

关键词: 流域; 氮输出; 模拟; DNDC; SWAT

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2317-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611151

Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed

HAN Ning^{1,2}, CHEN Wei-liang³, GAO Yang^{1,2*}, HAO Zhuo^{1,2}, YU Gui-rui²

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: In this study, N export from Xiangxi River Basin in subtropical watershed was measured by long-term monitoring, N loss in the basin was simulated by DNDC and SWAT models in order to provide a scientific basis for the establishment of nitrogen circulation model in subtropical watershed. The results showed that N loss with runoff was well simulated by DNDC and SWAT. The key parameters of DNDC were precipitation, slope and amount of N fertilization, while the key parameters of SWAT were GW_DELAY, CANMX, ALPHA_BF and ESCO. The deviations between simulations and observations of runoff, TN and NO_3^- -N simulated by DNDC were 5.19%, 8.10% and 71.70%, respectively. Whereas the deviations between the emission of TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N simulated by SWAT and observations were 2.04%, 14.29% and 8.89%. The results indicated that the precision of N export simulated by SWAT was higher than DNDC in Xiangxi River Basin, and N loss in this area was mainly controlled by precipitation and nitrogen cycle of terrestrial ecosystem. The temporal and spatial distribution of N loss in Xiangxi River Basin was analyzed by comparing simulation results, which further demonstrated that DNDC and SWAT had simulation ability for N loss in subtropical watershed.

Key words: watershed; N export; simulation; DNDC; SWAT

工业革命以来, 人为活化氮的排放量急剧上升^[1]。有研究报道, 20 世纪 90 年代人为活化氮的排放量为 $140 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$, 是 1860 年的 10 倍; 并预测到 2050 年人为活化氮排放总量将达到 $267 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[2]。现在大量的氮肥被投入到农林生产, 使得土壤氮含量超出植物吸收负荷, 部分氮素遗留在土壤中, 并随径流迁移到水体或以气体形式排放到大气, 导致水体和大气污染加剧, 大气污染物以湿沉降的形式进入到陆地生态系统。土壤对氮输入虽然表现出一定的截留效应, 但陆地生态系统的氮淋溶与输出会造

成土壤 pH 变化、土壤肥力下降及湖泊、河流富营养化等一系列的环境问题^[3,4]。小流域氮素流失是水土流失型面源污染的主要表现形式之一^[5], 因此定量估算不同时空尺度的氮素流失是十分必要的。

近年来, 随着计算机技术的发展, 生物地球化学

收稿日期: 2016-11-19; 修订日期: 2017-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570465); 城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目(SKLURE2015-2-2); 中国科学院青年创新促进会项目

作者简介: 韩宁(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文, E-mail: 1293384193@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn

过程模型逐渐成为定量估算氮素流失必不可少的工具^[6,7]。目前的生物地球化学模型主要针对 C、N 循环模拟研究,通过追踪不同生态环境因子驱动下 C、N 循环中各个过程的发生与联系,从而实现对循环中各组分的准确模拟^[8]。目前应用最广泛的为 SWAT 模型和 DNDC 模型,SWAT 模型在模拟流域系统内的迁移和转化时,较全面地考虑了氮输入、有机氮矿化、植物吸收、氨挥发、地表径流引起的氮流失、氮淋溶等过程,被广泛应用于估算流域尺度的氮负荷^[9~11];DNDC 模型能够被应用于估算小流域尺度氮素随水土流失(地表径流、泥沙迁移、壤中流)及气态排放的途径与数量,发展和完善估算氮素流失在小流域尺度的方法,并对减轻因氮素流失而引起的环境污染和气候变暖具有重要意义^[12]。黄仲冬等^[13]应用 SWAT 模型估算浑河流域硝态氮淋失量的空间和时间分布时发现降雨、施肥是影响流域硝态氮淋失的主要因素;李虎等^[14]通过利用冬小麦整个生长季水分和氮素淋失量观测数据对 DNDC 模型进行检验和敏感性分析,结果表明农田氮素淋失易受到灌溉水量和施肥量的影响。

目前已有研究主要建立在大流域尺度上分析并估算氮收支,对于小流域氮收支计算系数的差异并未充分考虑^[15]。本文以亚热带红壤丘陵区的小流域为研究对象,通过对流域基流过程中氮淋溶与输出的监测,为模型验证提供重要参数,然后利用 SWAT 与 DNDC 模型模拟小流域尺度氮素流失,为

模拟亚热带小流域尺度内氮素流失提供重要参数,以期为进一步控制亚热带流域氮素非点源输出提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验研究区域位于中国科学院地理科学与资源研究所千烟洲红壤丘陵区生态网络试验站(115°04'13"E,26°44'48"N),所选取的香溪河流域位于江西省泰和县境内。站内平均海拔为 110.8 m,属于典型的亚热带季风气候,年均气温 17.9℃,年均降水量为 1 542 mm,雨季多集中于 3~9 月,其中 4~6 月降雨量约占全年的一半,7~8 月高温少雨^[16,17]。香溪河流域的面积为 97.38 hm²,小流域内土地利用方式为林地、农业用地、草地、坑塘、居民用地等 7 种方式,其中林地面积最大为 61.00 hm²,面积所占权重为 62.64%,林地以种植马尾松和湿地松为主;农业用地以水田、桔园为主,面积为 21.52 hm²,所占权重为 22.10%。土地利用类型具体分布状况见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析

在研究区域内自上游至下游设置 8 个采样点(图 1),A 点位于上游鱼塘出口处,B、C 两点位于上游的林地外缘,D、E 和 F 位于中游的农田、桔园交错带,G、H 两点位于下游,所处地区为桔园。在

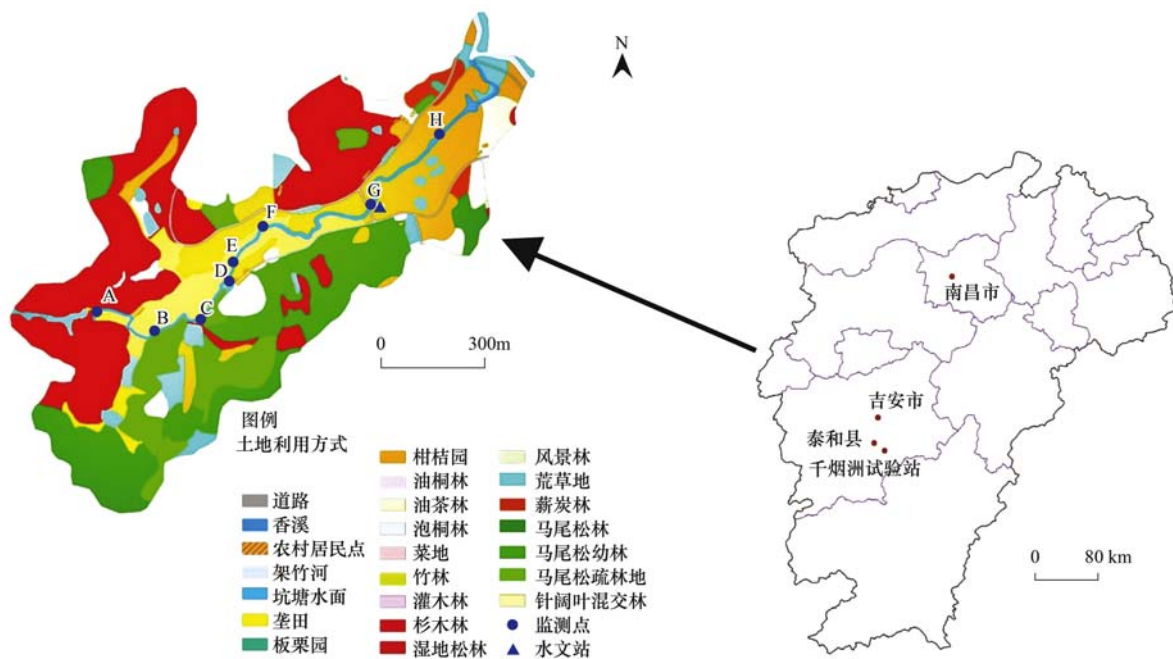


图 1 流域采样点分布及土地利用方式

Fig. 1 Sampling point distribution of watersheds and different land-uses

G 点设置截留三角堰,并安装 ISCO 水质采样仪,可实时监测记录水位变化. 采样结束后立刻将样品送往实验室进行基本理化性质分析. 采样时间为 2013 年 7 月至 2014 年 12 月,每月 10 日、20 日采集基流水样(河流常规水样)供基流水质分析.

1.2.2 常规水样分析

常规水样测定:将采集的水样分为两份,一份用 0.45 μm 滤膜过滤,滤液用于 NH₄⁺-N(氨氮)和 NO₃⁻-N(硝氮)的测定,未过滤水样经过碱性过硫酸钾消煮后用于 TN(总氮)的测定. TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用 ALLANCE 流动注射分析仪(法国)测定.

1.3 模型运行

DNDC 模型运行示意图见图 2^[18],DNDC 模型调用氮负荷模块计算由地表径流引起的氮迁移和流

失,模型模拟的地表径流引起的氮流失被从土壤各氮库中扣除. DNDC 模型以日为时间步长模拟陆地生态系统的氮迁移和转化,模拟结果包括土壤中各形态的氮淋溶、土壤-大气界面的氮气体交换,也包括模型模拟输出的地表径流、总径流、土壤侵蚀及由地表径流引起的氮流失. SWAT 模型在每个 HRU 对氮元素进行独立模拟,并将结果在子流域的出口进行汇合,以此来研究氮元素的迁移路径和循环规律^[19]. SWAT 模型通过溶解态氮和吸附态氮两种类型来对氮元素进行模拟,SWAT 模型以日为时间步长,可同时连续长时段模拟流域的水文过程、水土流失、化学过程、农业管理措施和生物量变化^[20],可以比较准确地进行流域内氮元素在河网中的运动迁移的计算.

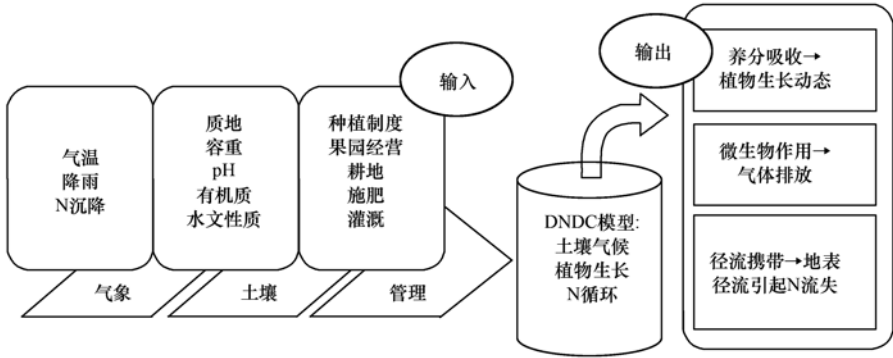


图 2 DNDC 模型运行示意
Fig. 2 Schematic of DNDC model

1.4 敏感性分析

在径流的模拟中,影响 SWAT 和 DNDC 模型产汇流过程的参数较多,对每一个参数都进行校准是不现实的,因此需要对参数进行敏感性分析. 本研究采用传统的动力学扰动法对 DNDC 模型进行参数敏感性分析,即先选定一个模拟情景,然后选择需进行敏感性分析的目标参数并设置参数的变化序列,同时其它参数保持不变,运行模型得到相对应的模型输出结果的变化序列. 在参数敏感性分析实施过程中,目标参数输入值与模型输出结果一一对应,定量比较不同输入参数对模型输出结果的影响即可建立模型输出结果与参数的灵敏度关系;利用瑞士联邦水科学与技术研究所研发的 SWAT 率定与不确定性分析工具 SWAT-CUP,采用连续不确定性匹配算法(SUFI-2)对 SWAT 模型参数进行率定以及验证. 选取 2013 年 7~12 月的数据进行参数率定,以 2014 年 1~12 月的数据进行模型验证.

1.5 模型验证指标

本研究采用纳什系数(Nash-Sutcliffe, ME)和决定系数(R^2)来评价模拟结果. ME 衡量相对于观测资料的均值而言,ME 大于 0 即表示模拟结果比观测资料的均值更接近观测,等于 1 即表示模拟结果与观测资料完全吻合^[21,22]. R^2 检验模拟结果与观测资料的相关程度, R^2 越接近 1,则模拟结果和实测结果越接近.

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{o})^2} \tag{1}$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}} \right)^2 \tag{2}$$

式中, o_i 和 p_i 分别为观测值和模拟值, $\bar{o}$ 和 $\bar{p}$ 分别为观测和模拟的平均值, n 为样本数.

2 结果与分析

2.1 参数敏感性分析

2.1.1 DNDC 模型

在本研究中,重点考察气象因素(降水量)、地形因素(坡度)、土壤性质(表层 SOC 含量、土壤容重和酸碱度 pH)、及所施氮肥量对径流、土壤侵蚀及由径流引起的氮流失的影响. 敏感性指数 S 越高则意味着输入参数对模型输出结果的影响越大. 敏感性指数 S 的值见表 1,输入参数敏感性分析表明:① 香溪小流域典型农田中,降水是控制径流、土壤侵蚀、由径流引起的氮流失的关键环境因子;② 坡度的变化影响土壤侵蚀,进而影响氮随地表径流的迁移和流失;③所 施氮肥量的改变影响地表径流引起的无机氮流失,但对氮随地表径流的迁移和流失影响甚微. 本研究参数敏感性分析的结果亦与其它报道相吻合^[23,24].

表 1 DNDC 模型参数敏感性分析结果¹⁾

Table 1 Results of parameter sensitivity analysis of DNDC

项目	敏感性指数(S)			
	地表径流	土壤侵蚀	TION	NL
降水量/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	2.17	2.10	2.03	1.74
坡度/ $(^\circ)$	0.36	1.00	0.43	-0.02
土壤表层有机碳/ $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.01	0.02	0.86	0.81
土壤容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.00	0.00	0.28	0.32
施氮肥量/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	0.00	0.00	0.06	0.00
pH	0.00	0.00	0.01	1.53

1) TION 为地表径流引起的无机氮流失;NL 为硝态氮淋溶

2.1.2 SWAT 模型

选取 12 个参数进行全局敏感性分析,并利用 SWAT-CUP 中自带的 T 检验模块对所选参数进行 T 检验,结果见表 2. t -Stat(T 检验值)的绝对值越大,则对应参数的敏感性越强,由表 2 可知,对研究流域地表径流模拟结果影响较大的参数有 GW_DELAY(地下水滞后系数)、CANMX(最大冠层截留量)、ALPHA_BF(基流系数)和 ESCO(土壤蒸发补偿系数). ESCO 在湿润区和半湿润区的敏感性更强,主要是因为湿润区和半湿润区降水丰富,土壤含水量较多,常年气温较高引起土壤水蒸发量大,而土壤水蒸发会影响流域径流;ALPHA_BF 反映基流消退时间的长短,ALPHA_BF 越大,地下径流量越大,基流消退过程也越稳定;GW_DELAY 表示降水入渗补给地下水的滞后时间,该值受到气候条件、土壤岩性、作物类别等因素的综合影响^[25],这些敏感性参数主要影响流域内由径流引起的氮流失.

表 2 SWAT 模型参数敏感性分析结果

Table 2 Results of parameter sensitivity analysis of SWAT

序号	参数名称	t -Stat
1	CN2. mgt(SCS 径流曲线系数)	-0.77
2	ALPHA_BF. gw(基流系数)	32.55
3	GW_DELAY. gw(地下水滞后系数)	-34.62
4	SOL_AWC(...). sol(土壤可利用水量)	-1.043
5	ESCO. hru(土壤蒸发补偿系数)	10.41
6	CH_K2. rte(河道有效水电导率)	-5.52
7	CH_N2. rte(主河道曼宁系数)	-5.43
8	GWQMN. gw(最大冠层截留量)	-0.64
9	SFTMP. bsn(降雪温度)	0.39
10	GW_REVAP. gw(地下水再蒸发系数)	-0.31
11	SHALLST. gw(地下水硝酸盐浓度对地表水的贡献)	0.79
12	CANMX. hru(最大冠层截留量)	-12.29

2.2 流域空间离散化

流域空间离散化是建立分布式输入数据库的前提. 本研究基于香溪小流域 DEM、土地利用图和土壤图,利用 GIS 软件(ArcGIS, ESRI)的空间和地形分析技术生成小流域 HRU^[26,27]. 小流域被划分成 25 个子流域,香溪小流域数字沟渠网络及子流域如图 3 所示. 为了体现不同的土地利用-土壤类型组合氮的迁移、转化、流失特征差异,应在子流域的基础上进一步空间划分生成 HRU. 利用 GIS 软件(ArcGIS, ESRI)所提供的空间分析功能,叠加香溪小流域子流域、土地利用和土壤图即可生成小流域水文响应单元,见图 4.

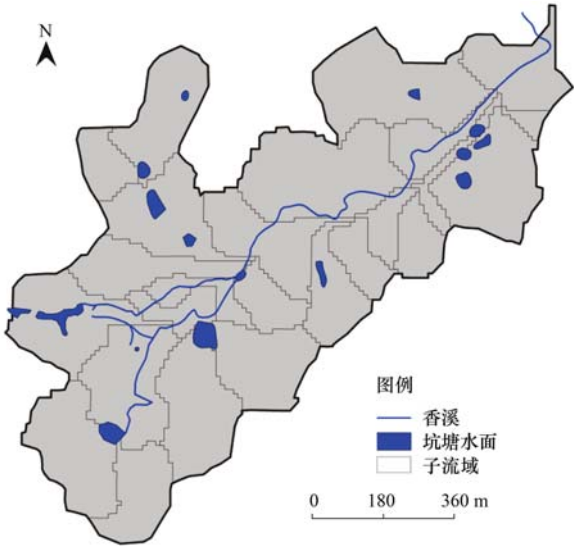


图 3 香溪小流域数字沟渠网络和子流域示意

Fig. 3 Schematic of digital network ditches and watersheds of Xiangxi River Basin

参考香溪小流域土地利用和土壤类型空间分布特征,土地利用主要被概化为林地、果园、旱地、草地、水田、灌木 6 个类型;香溪小流域土壤分类系统

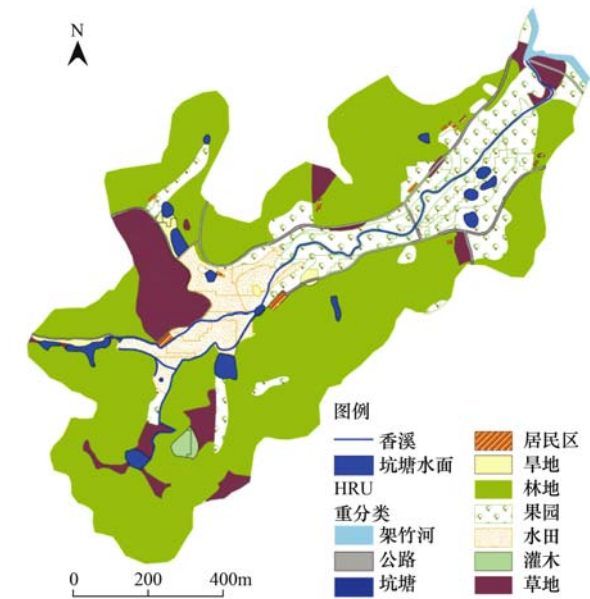


图4 香溪小流域土地利用重分类

Fig. 4 Land use reclassification of Xiangxi River Basin

如表 3. 最终生成的 HRU 如图 5 所示. 共计 124 个

水文响应单元. 按照土地利用类型分类分别为林地 52 个、果园 34 个、水田 11 个、草地 19 个、旱地 6 个、灌木 2 个.

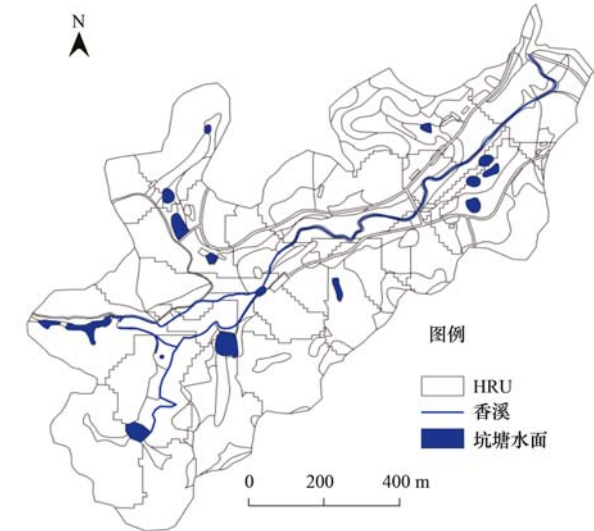


图5 香溪小流域水文响应单元示意

Fig. 5 HRUs of Xiangxi River Basin

表 3 香溪小流域土壤分类系统

Table 3 Soil classification system of Xiangxi River Basin

土壤种类	土壤属性	说明
红壤	紫红色泥岩、泥砾岩风化物	少量有机质薄层红壤、少量有机质中层红壤、少量有机质厚层红壤 中量有机质薄层红壤、中量有机质中层红壤、中量有机质厚层红壤 多量有机质厚层红壤、多量有机质中层红壤
潮土	紫红色岩类沟谷充填物	黄潮土
	红泥底复壤质冲积物	灰潮土
草甸土	紫红色岩类沟谷充填物	少量有机质厚层草甸土、中量有机质厚层草甸土
水稻土	紫红色岩类沟谷充填物	多砂泥田(中潜)、灰砂泥田(中潜)、黄砂泥田(中潜)

2.3 DNDC 模型对小流域氮素流失的模拟

如图 6 和表 4 所示,DNDC 模型能较准确地模

拟香溪小流域年径流量以及季节变化趋势. 模型模拟的 2014 年径流总量为 $1.44 \times 10^5 \text{ m}^3$, 实测的径流总量为 $1.52 \times 10^5 \text{ m}^3$, 模拟结果和实测值的偏差为 5.19%, 模拟结果和实测值吻合较好. 对小流域出水口径流的模拟结果和模型验证指标表明, 与观测相比, 应用 DNDC 模型能较准确地模拟香溪小流域每年的径流总量和季节变化趋势(径流量验证指标为 $ME = 0.71, R^2 = 0.72, P < 0.01$), 这为应用模型模拟香溪小流域由径流引起的 N 流失奠定了坚实的基础.

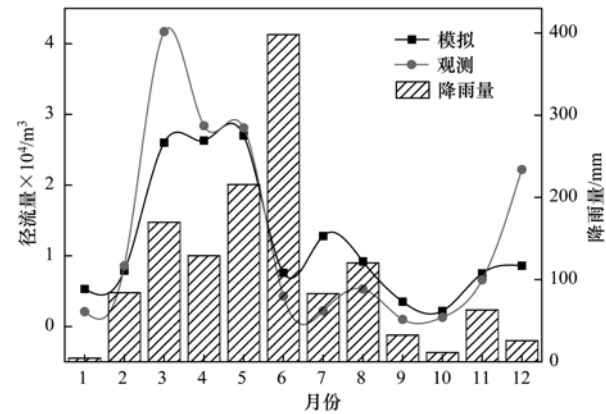


图6 2014 年香溪小流域逐月降雨量、流域出水口逐月径流排出量观测和模拟值

Fig. 6 Observations and simulations of monthly rainfall and runoff in Xiangxi River Basin in 2014

表 4 2014 年流域出水口径流、氮排出总量的模拟值和观测值

Table 4 Observations and simulations of runoff and N export from outlet of Xiangxi River Basin in 2014

验证项目	模拟值	观测值	偏差/%
径流/ m^3	1.52×10^5	1.44×10^5	5.19
TN/kg	1.30×10^3	1.20×10^3	8.10
$\text{NO}_3^- \text{-N/kg}$	373.16	217.38	71.70

如图 7 所示,应用 DNDC 模型能较准确地模拟香溪小流域出水口 TN 和 NO_3^- -N 排出通量的季节变化趋势. 如表 4 所示,DNDC 模型所模拟的流域出水口 2014 年的 TN 排放量为 1.30×10^3 kg,实测的 TN 排放量为 1.20×10^3 kg,模拟结果和实测值的偏差为 8.10%,TN 排放量的 R^2 和 ME 分别为 0.83 和 0.81,模拟结果和实测值吻合较好;模型所模拟的流域出水口 2014 年的 NO_3^- -N 排放量为 373.16 kg,实测的 NO_3^- -N 排放量为 217.38 kg,模拟结果和实测值的偏差为 71.70%, NO_3^- -N 排放量的 R^2 和 ME 分别为 0.29 和 0.34,偏差增大. NO_3^- -N 模拟结果偏差增大可能与模型以固定衰减系数概括渠道过程有关,简单的衰减系数无法准确描述小流域内复杂的渠道过程^[28],流域尺度土壤中的 N 随径流而流失,进入沟渠或河流等水生生态系统,通过汇流过程直至流域出水口,N 在沟渠、河流、水库、湖泊等水生生态系统发生吸收、拦截、分解、硝化以及反硝化等一系列复杂的理化与生物学过程,而 DNDC 模型不具备模拟水生生态系统 N 迁移和转化的能力,因此有待进一步提高 NO_3^- -N 的模拟效果.

2.4 SWAT 模型对小流域氮素流失的模拟

利用验证期内径流量和流域实测月均氮浓度进行流域氮输出负荷的估算,结果如图 7 所示,应用 SWAT 模型能较准确的模拟香溪小流域出水口 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 排放量的季节变化趋势. 如表 5 所示,SWAT 模型所模拟的流域出水口 2014 年 TN 的排放量为 1.18×10^3 kg,实测的 TN 排放量为 1.20×10^3 kg,模拟结果和实测值的偏差为 2.04%;模型所模拟的流域出水口 NO_3^- -N 排放量为 186.32 kg,实测

的 NO_3^- -N 排放量为 217.38 kg,模拟结果和实测值的偏差为 14.29%;模型所模拟的流域出水口 NH_4^+ -N 排放量为 194.75 kg,实测的 NH_4^+ -N 排放量为 213.75 kg,模拟结果和实测值的偏差为 8.89%,模拟结果和实测值吻合较好.

表 5 2014 年流域出水口氮排出总量的模拟值和观测值

Table 5 Observations and simulations of nitrogen export from outlet of Xiangxi River Basin in 2014

验证项目	模拟值/kg	观测值/kg	偏差/%
TN	1.18×10^3	1.20×10^3	2.04
NO_3^- -N	186.32	217.38	14.29
NH_4^+ -N	194.75	213.75	8.89

根据公式(1)和(2)计算验证期的评价结果如表 6 所示. 从中可知,验证期内 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的 R^2 和 ME 均达 0.7 以上,说明 SWAT 模型模拟结果可以令人满意,模型可用性较高.

表 6 SWAT 模型评价结果

Table 6 Evaluation results of SWAT model

验证项目	ME	R^2
TN	0.83	0.92
NO_3^- -N	0.77	0.89
NH_4^+ -N	0.73	0.86

3 讨论

3.1 SWAT 与 DNDC 模型模拟结果对比分析

如图 7 所示,SWAT 和 DNDC 模型能较准确地模拟香溪小流域氮输出总量以及他们的季节变化趋势,但是模拟结果和实测值存在一定的偏差. 如表 7 所示,DNDC 模型所模拟的流域出水口 TN 和 NO_3^- -N 排放量模拟结果和实测值的偏差为 8.10% 和 71.70%,而 SWAT 模型所模拟的流域出水口 TN 和 NO_3^- -N 排放量模拟结果和实测值的偏差为 2.04% 和 14.29%,SWAT 模型模拟流域内氮输出结果的精度高于 DNDC 模型. 在降雨量及径流偏少的月份中,模拟输出负荷同实测输出负荷存在较大差异,即使在降雨量丰富、径流量偏高的 3~6 月,模拟输出负荷同实测输出负荷也有偏差,引起该结果的原因有待进一步探究.

应用 DNDC 和 SWAT 模型模拟香溪小流域氮流失表明,该区氮流失特征主要由降水和陆地生态系统氮周转过程控制. 在秋、冬季节,该区降水较少,大量氮累积于土壤;夏季(3~8 月)降水丰富,土壤中累积的氮随地表径流和壤中流迁移、流失. 如图 7 所示,DNDC 与 SWAT 模拟的 TN、 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的变化趋势与实测径流量的变化趋势能够保

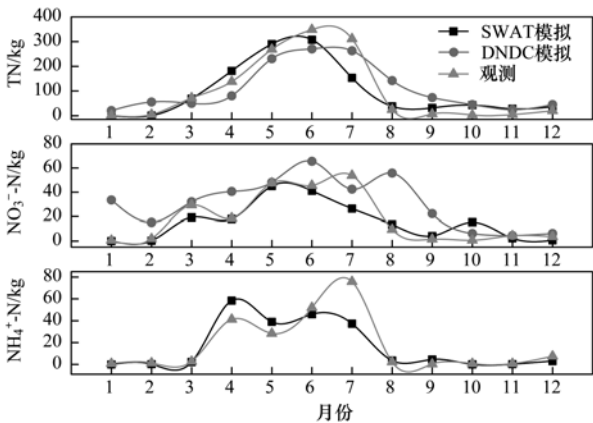


图 7 2014 年香溪小流域出水口逐月 TN、 NO_3^- -N 排放量观测与模拟值

Fig. 7 Observations and simulations of TN and NO_3^- -N emission from outlet of Xiangxi River Basin in 2014

持大体一致,由降水和陆地生态系统氮周转过程共同控制的小流域氮流失季节变化特征被观测所证实. 值得注意的是,在氮流失高峰期,模型模拟的小

流域出水口氮排放量略高于实际观测值,偏差很可能源于本研究对发生在沟渠系统中的氮削减过程的简化.

表 7 SWAT 与 DNDC 模拟结果对比

Table 7 Contrast of SWAT and DNDC simulation results					
验证项目	观测值/kg	SWAT		DNDC	
		模拟值/kg	偏差/%	模拟值/kg	偏差/%
TN	1.20×10^3	1.18×10^3	2.04	1.30×10^3	8.10
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	217.38	186.32	14.29	373.16	71.70

DNDC 和 SWAT 模型在模拟小流域氮流失规律时都是利用 SCS 径流曲线模型和通用土壤流失方程(MUSLE)从流域降雨径流量和土壤流失量两个方面结合溶解态和颗粒态 N 污染物输出模型,对流域 N 污染负荷及输出总量进行估算^[29],因此可以将 DNDC 和 SWAT 模型耦合起来分析流域非点源污染的规律. 但是小流域内部的气象、地形、土地利用等环境因子的空间异质性,也显示出模拟小流域尺度 N 输出的复杂性;DNDC 和 SWAT 模型的模拟结果可能因此而存在较大的不确定性. 另外,输入数据包含的不确定性有可能导致模拟结果发生较大的变异;因此,在流域尺度如何准确地估计模型输入参数是保证模拟结果准确的关键,亦是实施流域尺度 N 流失模拟应重点关注的问题. 由于观测资料的限制,本研究应用 DNDC 和 SWAT 模型在亚热带红壤丘陵区对由 N 随径流流失的模拟,模型所模拟的香溪小流域包含较大的不确定性,模型需被应用于更多的流域,使模型在模拟小流域尺度 N 素流失方面能得到更多的实际检验. 同时,由于观测资料及模型部分参数自身带有误差,因此减少观测资料及模型部分参数的误差,亦是降低模型模拟结果的不确定性及更加精确确定敏感因子的有效途径之一.

3.2 香溪小流域氮流失空间分布

对小流域尺度氮素流失开展模拟研究工作,主要目的在于探究小流域氮素流失的时空分布特征,以进一步识别氮素造成的污染的关键污染源,对于控制和减轻氮素流失及其污染有重要的意义. 如图 8 所示,香溪小流域内氮素流失年总量空间差异较大,多项研究表明这主要和土地利用方式相关^[30,31],这也说明合理规划土地利用方式也是减少氮流失的一种途径. 从空间分布图可看出氮流失贡献最大的是稻田以及果园,由于含氮肥料的投入,农田、果园成为小流域随径流而流失的氮的主要来源;径流引起的氮流失量约占小流域流失总量的 57%. 林地和草地因无大量氮肥投入(暂不考虑增

氮等科学实验的影响),氮流失相对较少. 模拟结果表明,2014 年香溪小流域由径流引起的氮流失总量为 638 kg(氮流失量的计算见文献[22]),其中约 64% 源于农田;2014 年模型模拟的香溪小流域以硝态氮形态的流失量为 253 kg,约占总流失量的 54.7%,是氮素流失的主要形式. 氮素流失空间分布特征也进一步表明了 DNDC 和 SWAT 模型对于小流域氮素流失有一定的模拟能力,有较好的适用性,比较适合在亚热带地区应用.

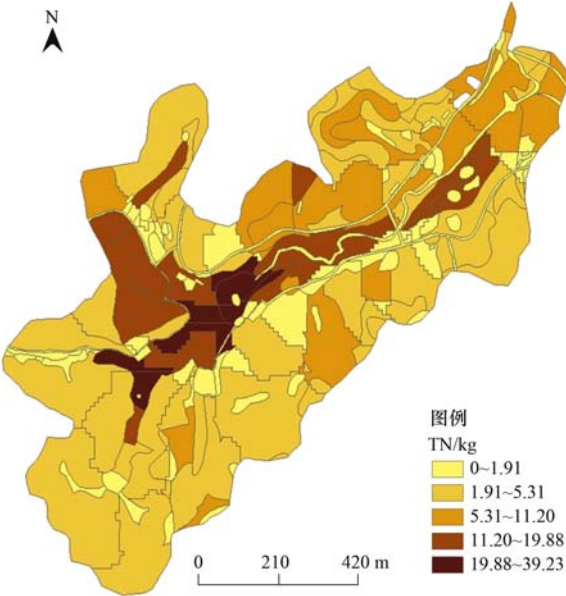


图 8 香溪小流域总氮流失空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of TN loss from Xiangxi River Basin

4 结论

(1) DNDC 模型模拟小流域内 2014 年的径流量、TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 排放量与实测值的偏差分别为 5.19%、8.10% 和 71.70%,SWAT 模型模拟小流域内 2014 年的 TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的排放量与实测值的偏差分别为 2.04%、14.29% 和 8.89%.

(2)SWAT 与 DNDC 模型模拟结果对比分析表明 SWAT 模型模拟流域内氮输出结果的精度高于

DNDC 模型;DNDC 和 SWAT 模型的模拟结果都存在一定的偏差,可以通过进一步耦合 DNDC 和 SWAT 模型来提高亚热带流域氮素流失模拟的精确度。

(3)影响 DNDC 模型模拟小流域内氮素流失的关键参数包括降水、坡度以及氮肥施用量的改变;影响 SWAT 模型模拟的关键参数包括地下水滞后系数、最大冠层截留量、基流系数和土壤蒸发补偿系数。在流域尺度如何准确地估计模型输入参数是保证模拟结果准确的关键,亦是实施流域尺度 N 流失模拟应重点关注的问题。

参考文献:

- [1] 邓美华, 谢迎新, 熊正琴, 等. 长江三角洲氮收支的估算及其环境影响[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(10): 1709-1716.
Deng M H, Xie Y X, Xiong Z Q, *et al.* Nitrogen budgets of the Yangtse delta region and their effect on the environment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(10): 1709-1716.
- [2] Galloway J N. The global nitrogen cycle: past, present and future [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, **48**(S2): 669-678.
- [3] Holtgrieve G W, Schindler D E, Hobbs W O, *et al.* A coherent signature of anthropogenic nitrogen deposition to remote watersheds of the northern hemisphere[J]. *Science*, 2011, **334**(6062): 1545-1548.
- [4] Gao Y, He N P, Zhang X Y. Effects of reactive nitrogen deposition on terrestrial and aquatic ecosystems[J]. *Ecological Engineering*, 2014, **70**: 312-318.
- [5] 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.
Han J G, Li Z B. 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.
- [6] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC 模型的发展[J]. 第四纪研究, 2001, **21**(2): 89-99.
Li C S. Biogeochemical concepts and methodologies: development of the DNDC model [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, **21**(2): 89-99.
- [7] 李长生. 陆地生态系统的模型模拟[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, **1**(1): 49-57.
Li C S. Modeling terrestrial ecosystems [J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(1): 49-57.
- [8] 王效科, 白艳莹, 欧阳志云, 等. 陆地生物地球化学模型的应用和发展[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(12): 1703-1706.
Wang X K, Bai Y Y, Ouyang Z Y, *et al.* Application and development of terrestrial biogeochemical model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(12): 1703-1706.
- [9] Hu X, McIsaac G F, David M B, *et al.* Modeling riverine nitrate export from an East-Central Illinois watershed using SWAT[J]. *Journal of Environment Quality*, 2007, **36**(4): 996-1005.
- [10] Saleh A, Du B. Evaluation of SWAT and HSPF within basins program for the upper North Bosque River watershed in Central Texas[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, **47**(4): 1039-1049.
- [11] Silgram M, Schoumans O F, Walvoort D J J, *et al.* Subannual models for catchment management: evaluating model performance on three European catchments [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, **11**(3): 526-539.
- [12] Deng J, Zhu B, Zhou Z, *et al.* Modeling nitrogen loadings from agricultural soils in southwest China with modified DNDC [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, **116**(G2): 1602.
- [13] 黄仲冬, 齐学斌, 李平, 等. 基于 SWAT 的浑河流域上游地区硝态氮淋失量估算[J]. 灌溉排水学报, 2011, **30**(3): 104-106.
Huang Z D, Qi X B, Li P, *et al.* Application of SWAT model to estimate nitrate leaching in the upper area of Hunhe Basin [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, **30**(3): 104-106.
- [14] 李虎, 王立刚, 邱建军. DNDC 模型在农田氮素渗漏淋失估算中的应用[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(7): 1591-1596.
Li H, Wang L G, Qiu J J. Application of DNDC model in estimating cropland nitrate leaching [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(7): 1591-1596.
- [15] 郭劲松, 刘京, 方芳, 等. 三峡库区紫色土坡耕地小流域氮收支估算及污染潜势[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2011, **34**(11): 141-147.
Guo J S, Liu J, Fang F, *et al.* Input-output budgets for nitrogen in a typical purple soil sloping ploughland in Three Gorges areas [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2011, **34**(11): 141-147.
- [16] 陈建平, 李艳, 董思宏, 等. 江西千烟洲农业生态系统水环境氮污染研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, **23**(6): 51-54.
Chen J P, Li Y, Dong S H, *et al.* Study on N pollution of water environment of agricultural ecosystem in Qianyanzhou, Jiangxi Province [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2012, **23**(6): 51-54.
- [17] 涂洁, 刘琪璟, 王辉民, 等. 江西千烟洲木荷液流特征及其与气象因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(2): 267-273.
Tu J, Liu Q J, Wang H M, *et al.* Dynamics of sap flow velocities and its relationship with meteorological factors of Schima Superba forest in Qianyanzhou Experimental Station [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(2): 267-273.
- [18] Deng J, Zhou Z, Zhu B, *et al.* Modeling nitrogen loading in a small watershed in southwest China using a DNDC model with hydrological enhancements [J]. *Biogeosciences*, 2011, **8**(10): 2999-3009.
- [19] 于峰, 史正涛, 李滨勇, 等. SWAT 模型及其应用研究[J]. 水科学与工程, 2008, (5): 4-9.
- [20] 孙瑞, 张雪芹. 基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文, 2010, **30**(3): 28-32, 47.
Sun R, Zhang X Q. Progress in application of watershed runoff simulation based on SWAT [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, **30**(3): 28-32, 47.
- [21] Miehle P, Livesley S J, Feikema P M, *et al.* Assessing productivity and carbon sequestration capacity of *Eucalyptus globulus* plantations using the process model Forest-DNDC: calibration and validation [J]. *Ecological Modelling*, 2006, **192**(1-2): 83-94.

- [22] 李轩然, 刘琪璟, 胡理乐, 等. 不同方法计算湿地松林生物量的比较[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(12): 1594-1598.
Li X R, Liu Q J, Hu L L, *et al.* Calculation of *Pinus elliotii* biomass: a comparison of different methods[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, **25**(12): 1594-1598.
- [23] Schlesinger W H, Abrahams A D, Parsons A J, *et al.* Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in Southern New Mexico: I. rainfall simulation experiments [J]. Biogeochemistry, 1999, **45**(1): 21-34.
- [24] Kwong K F N K, Bholah A, Volcy L, *et al.* Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius [J]. Agriculture, Ecosystem & Environment, 2002, **91**(1-3): 147-157.
- [25] 林炳青, 陈莹, 陈兴伟. SWAT 模型水文过程参数区域差异研究[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(11): 1988-1999.
Lin B Q, Chen Y, Chen X W. A study on regional difference of hydrological parameters of SWAT model[J]. Journal of Natural Resources, 2013, **28**(11): 1988-1999.
- [26] Whiteaker T, Schneider K, Maidment D. Applying the ArcGIS hydro data model [R]. Texas, USA: University of Texas at Austin, 2001.
- [27] Turcotte R, Fortin J P, Rousseau A N, *et al.* Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network [J]. Journal of Hydrology, 2001, **240**(3-4): 225-242.
- [28] 杨小林, 朱波, 李义玲, 等. 基于改进型 DNDC 模型的小流域非点源氮迁移过程模拟与空间拓展应用[J]. 水利学报, 2013, **44**(10): 1197-1203.
Yang X L, Zhu B, Li Y L, *et al.* Simulation of nonpoint source nitrogen transport in two separated catchments in the hilly area of purple soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(10): 1197-1203.
- [29] 董群. 山东沂蒙山区沭河流域非点源氮磷污染负荷研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
Dong Q. Non-Point source pollution of nitrogen and phosphorus burthen in Benghe watershed of the Yimeng Mountainous, Shandong Province [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011.
- [30] Smith K A, McTaggart I P, Tsuruta H. Emissions of N_2O and NO associated with nitrogen fertilization in intensive agriculture, and the potential for mitigation[J]. Soil Use and Management, 1997, **13**(S4): 296-304.
- [31] Jordan T E, Correll D L, Weller D E. Relating nutrient discharges from watersheds to land use and streamflow variability [J]. Water Resources Research, 1997, **33**(11): 2579-2590.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)