

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 ..... 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 ..... 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 ..... 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 ..... 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 ..... 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO<sub>2</sub> 的时空分布 ..... 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 ..... 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 ..... 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 ..... 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 ..... 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 ..... 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 ..... 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 ..... 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 ..... 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 ..... 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 ..... 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 ..... 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 ..... 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 ..... 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 ..... 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 ..... 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响 ..... 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 ..... 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 ..... 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 ..... 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 ..... 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 ..... 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 ..... 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 ..... 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo<sub>12</sub> 催化电化学反应降解染料废水的研究 ..... 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 ..... 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 ..... 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 ..... 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu<sup>2+</sup> 研究 ..... 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 ..... 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能 ..... 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 ..... 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 ..... 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 ..... 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 ..... 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 ..... 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 ..... 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: <sup>13</sup>C 连续标记法 ..... 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 ..... 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 ..... 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 ..... 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 ..... 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 ..... 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 ..... 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 ..... 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 ..... 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 ..... 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H<sub>2</sub>S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 ..... 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 ..... 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM<sub>2.5</sub> 采样方法综述 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 ..... 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

# 基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析

席庆, 李兆富\*, 罗川

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要:** 参数敏感性分析对于水文水质综合模型的构建及推广应用具有重要的意义. 本研究基于 AnnAGNPS 模型机制, 选取可能对模型产生影响的地形、水文气象、田间管理、土壤等 4 大类 31 个参数, 以太湖地区典型低山丘陵小流域——中田河流域为实验区, 利用扰动分析方法评价了模型参数对水文水质模拟结果的敏感性. 结果表明, 11 个地形参数中, LS 对径流、泥沙与氮磷等模拟结果普遍敏感, RMN、RS 和 RVC 对泥沙输出分别为一般敏感和弱敏感, 其余参数不敏感. 水文气象参数中 CN 对模型径流和泥沙输出特别敏感, 对其余结果也都比较敏感. 田间管理与植被作物肥料参数中 CCC、CRM 和 RR 对泥沙和颗粒态污染物输出弱敏感, 6 个肥料参数 (FR、FD、FID、FOD、FIP、FOP) 对氮磷营养盐输出特别敏感. 土壤参数中, K 对模型除径流之外的所有结果都特别敏感, 土壤氮磷含量的 4 个参数 (SONR、SINR、SOPR、SIPR) 对相对应的氮磷输出结果弱敏感. 通过对中田河流域 2005~2010 年径流量的模拟和校正检验发现, 模拟期与校正期年径流量偏差基本都在 10% 以内, 模拟精度优秀. 本研究对 AnnAGNPS 模型构建中的参数选取与校验调整具有直接参考价值, 对研究区的径流模拟结果也证明了模型敏感性分析对于调参过程的可行性和该模型在太湖地区低山丘陵流域径流模拟的适用性, 对于模型在国内的推广应用具有重要的指导意义.

**关键词:** AnnAGNPS 模型; 参数敏感性; 模型适用性; 扰动分析法; 太湖低山丘陵地区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1773-08 DOI: 10.13227/j.hjx.2014.05.019

## Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method

XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Sensitivity analysis of hydrology and water quality parameters has a great significance for integrated model's construction and application. Based on AnnAGNPS model's mechanism, terrain, hydrology and meteorology, field management, soil and other four major categories of 31 parameters were selected for the sensitivity analysis in Zhongtian river watershed which is a typical small watershed of hilly region in the Taihu Lake, and then used the perturbation method to evaluate the sensitivity of the parameters to the model's simulation results. The results showed that: in the 11 terrain parameters, LS was sensitive to all the model results, RMN, RS and RVC were generally sensitive and less sensitive to the output of sediment but insensitive to the remaining results. For hydrometeorological parameters, CN was more sensitive to runoff and sediment and relatively sensitive for the rest results. In field management, fertilizer and vegetation parameters, CCC, CRM and RR were less sensitive to sediment and particulate pollutants, the six fertilizer parameters (FR, FD, FID, FOD, FIP, FOP) were particularly sensitive for nitrogen and phosphorus nutrients. For soil parameters, K is quite sensitive to all the results except the runoff, the four parameters of the soil's nitrogen and phosphorus ratio (SONR, SINR, SOPR, SIPR) were less sensitive to the corresponding results. The simulation and verification results of runoff in Zhongtian watershed show a good accuracy with the deviation less than 10% during 2005-2010. Research results have a direct reference value on AnnAGNPS model's parameter selection and calibration adjustment. The runoff simulation results of the study area also proved that the sensitivity analysis was practicable to the parameter's adjustment and showed the adaptability to the hydrology simulation in the Taihu Lake basin's hilly region and provide reference for the model's promotion in China.

**Key words:** AnnAGNPS model; parameter sensitivity; adaptability; perturbation method; hilly region in Taihu Lake

AnnAGNPS (annualized agricultural non-point source pollution model) 模型是一种连续的、分布式的流域非点源污染模型<sup>[1]</sup>. 自引入我国之后, 在流域径流模拟、产沙估算、氮磷输出及模型适应性等方面开展了诸多研究<sup>[2,3]</sup>. 研究中普遍表明, AnnAGNPS 模型机制复杂, 参数众多, 参数的直接获

取和确定工作庞大, 在不同地区应用时同一参数的影响水平也会不同, 且参数的不确定性会显著影响

收稿日期: 2013-09-03; 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171071); 江苏高校优势学科建设工程项目; 教育部留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 席庆(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域非点源污染模型, E-mail: xiqingde@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: lizhaofu@njau.edu.cn

输出结果<sup>[4-6]</sup>。因此,参数的准确性成为了影响模型可靠运行以及模拟结果真实可信的重要因素,参数敏感性分析以及参数识别和率定成为了分布式水文水质模型研究及应用的关键<sup>[7]</sup>。对模型参数的敏感性进行识别,进而重点对模型的敏感参数进行敏感性分析,是确定模型关键参数、控制模型效率非常有效的途径。

国内外对 AnnAGNPS 模型参数敏感性的研究较少,高龙华<sup>[8]</sup>在四川省御临河小流域仅对影响模拟结果的 11 个参数进行了敏感性分析,重点分析了 CN 值在非点源污染中的作用,并结合最佳管理措施(BMPs)进行了效果模拟;边金云<sup>[9]</sup>在杭州四岭水库小流域采用修正的摩尔斯分类筛选法对选定的 8 个参数进行敏感性分析,并分析了其对模拟结果的影响;Li 等<sup>[10]</sup>在浙江宁波章溪河流域对显著影响输出结果的参数进行了敏感性分析,并结合调整空间分布的方法评估了模拟效果以便做出最佳管理措施。这些研究着重基于结果反馈的参数选取,将重点放在最佳管理措施和模型模拟效果评估上,缺乏基于模型机制的对各类参数进行敏感性分析的深入系统研究。按照模型机制,每个参数都具有物理定义。对 AnnAGNPS 模型进行参数敏感性分析也可以帮助理解和改善模型结构,在模型的校准和验证阶段有重要意义。本研究选取 AnnAGNPS 模型内部组块相关的参数,以太湖地区典型低山丘陵小流域——中田河流域为研究区,对 AnnAGNPS 模型进行了相对系统的参数敏感性分析。

## 1 材料与方 法

### 1.1 AnnAGNPS 模型水文水质参数选择

AnnAGNPS 模型的机制结构主要包括地表径流、土壤侵蚀及化学物质输移 3 个组块。其中,地表径流采用水分平衡方程和 SCS-CN 曲线方程<sup>[11]</sup>进行计算,并按每日的耕作、土壤水分和作物情况,调整曲线数。土壤侵蚀部分,采用修正的通用流失方程 RUSLE<sup>[12]</sup>来计算泥沙侵蚀量。化学物质输移部分,则采用与 CREAMS(chemicals runoff and erosion from agricultural management system)模型相同的公式来计算碳、氮、磷这 3 种营养物质的颗粒吸附态和溶解态浓度<sup>[13]</sup>。模型逐日计算各单元内氮、磷和有机碳的养分平衡,包括作物对氮磷的吸收、施肥、残留的降解和氮磷的迁移等。氮磷和有机碳的输出按可溶态和颗粒吸附态分别计算,并采用了一级动力学方程计算平衡浓度。作物对可溶

态养分的吸收计算,采用了简单的作物生长阶段指数。

根据模型机制结构,考虑模型的软件实现方法与过程,针对可能对模型输出结果有影响的参数,筛选出与 SCS 方程、RUSLE 方程、氮磷营养盐输出模拟过程等有关的地形参数、水文气象参数、田间管理、植被作物与肥料参数、土壤参数等 4 大类共计 31 个参数(见表 1)进行敏感性分析。

### 1.2 参数敏感性分析方法

模型参数敏感性分析能够确定参数对模型输出的重要性及贡献度,以便有针对性地优选较为重要的参数。本研究采用基于扰动分析的相对灵敏度分析方法<sup>[14,15]</sup>,即在其他因子都不变的情况下,通过在一定范围内扰动(如在  $\pm 30\%$  范围内多次改动)目标因子的取值,进行多次模拟,选取  $n$  次不同的计算结果,利用相邻的两次计算结果计算相对敏感性的一个值,然后取  $n-1$  次的平均值。此方法计算公式为:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(Q_{i+1} - Q_i)/Q_a}{(P_{i+1} - P_i)/P_a}}{n-1} \quad (1)$$

式中, $S$  为参数相对敏感度; $P_{i+1}$  和  $P_i$  为第  $i+1$  和第  $i$  次参数输入的数值, $P_a$  为两者均值; $Q_{i+1}$  和  $Q_i$  为第  $i+1$  和第  $i$  次模型输出的结果, $Q_a$  为两者均值。

本研究根据各项参数取值范围和初始值不同,在初始值基础上对每个参数分别增减 10%、20%、30%、50% 共 8 次,获得模型相应输出的敏感性指数,求出均值作为最终结果。

参考陈建等<sup>[16]</sup>的敏感性分级方法,结合 AnnAGNPS 模型的机制和结构,根据  $S$  值的范围将参数敏感性划分为 5 个级别(表 2)。

### 1.3 研究区概况及模型构建

研究区中田河流域位于江苏省溧阳市饮用水源地——天目湖水库的上游,是太湖流域上游典型的低山丘陵小流域,地处东经  $119^{\circ}08' \sim 119^{\circ}36'$ ,北纬  $31^{\circ}01' \sim 31^{\circ}04'$ 。流域集水面积约  $47.8 \text{ km}^2$ ,是天目湖的主要水源涵养地。流域属典型亚热带季风气候,多年平均降水量为  $1\ 169.3 \text{ mm}$ ,主要集中在 4~9 月。流域内地形主要以低山丘陵为主,海拔跨度从 30~530 m,平均海拔 196 m。近年来该地区非点源污染有加重趋势,库区内水质下降明显,在 2005 年已不能完全达到 II 类水标准<sup>[17]</sup>,2006 年已达到中富营养化状态<sup>[18]</sup>,2007~2008 年部分水质指标已

表 1 AnnAGNPS 参数定义表  
Table 1 Parameters of AnnAGNPS model

参数分组	参数	含义	取值范围	单位
地形参数	CAL	分室平均坡度	0.000 01 ~ 3.0	坡角的正切值
	LS	坡长	0.000 1 ~ 100.0	m
	MN	层流曼宁系数 $n$	0.005 ~ 1.000	—
	CFS	河床水流坡度	0.000 01 ~ 3.0	—
	CFL	河床水流长度	0.0 ~ 50.0	m
	CFHD	河床水流水力深度	0.0 ~ 40.0	m
	CFMN	河床水流曼宁系数	0.005 ~ 1.000	—
	RS	河道坡度	0.000 01 ~ 10.0	坡角的正切值
	RVC	河道植被覆盖类型	0, 1, 2	—
	RMN	河道曼宁系数 $n$	0.005 ~ 1.000	—
水文气象参数	CN	CN	30.0 ~ 100.0	—
	AKC	土壤可蚀性计算类型	Y or N	—
植被作物管理和肥料数据	CRMD	水分损耗速率	0.0 ~ 1.0	—
	CRM	根生物量	0 ~ 112 000	kg·hm <sup>-2</sup>
	CCC	冠层覆盖	0.0 ~ 1.0	%
	CRFH	作物降雨截流高度	0.0 ~ 80	m
	RR	地表随机糙率	0.000 01 ~ 500.0	mm
	NACR	年覆盖率	0.0 ~ 1.0	%
	NSRC	地面残留物覆盖率	0.0 ~ 100.0	%
	FR	肥料施用量	0.0 ~ 56 000	kg·hm <sup>-2</sup>
	FD	肥料深度	0.0 ~ 1 500.0	mm
	FIN	肥料无机 N 比例	0.0 ~ 1.0	%
	FON	肥料有机 N 比例	0.0 ~ 1.0	%
土壤数据	FIP	肥料无机 P 比例	0.0 ~ 1.0	%
	FOP	肥料有机 P 比例	0.0 ~ 1.0	%
	K	土壤可蚀性因子	0.0 ~ 0.131 7	(t·hm <sup>2</sup> ·h)·(hm <sup>2</sup> ·MJ·mm) <sup>-1</sup>
	SONR	有机 N 含量	0.0 ~ 100 000	g·m <sup>-3</sup>
	SINR	无机 N 含量	0.0 ~ 100 000	g·m <sup>-3</sup>
	SOPR	有机 P 含量	0.0 ~ 100 000	g·m <sup>-3</sup>
	SIPR	无机 P 含量	0.0 ~ 100 000	g·m <sup>-3</sup>

表 2 敏感性分级

Table 2 Classification of sensitivity degree

级别	S 值范围	敏感性表征
I	S  < 0.1	不敏感
II	0.1 <  S  < 0.25	弱敏感
III	0.25 <  S  < 0.5	一般敏感
IV	0.5 <  S  < 1.0	比较敏感
V	S  > 1.0	特别敏感

处于 III 类<sup>[19]</sup>。由于此地为饮用水源地流域,基本不存在点源污染影响,其水质恶化主要来源于非点源污染。作为溧阳市 60 万人口的饮用水源地,分析天目湖地区非点源污染状况迫在眉睫。而中田河流域作为天目湖最主要注入水源,在该地区开展非点源污染相关研究有利于分析污染产生过程,对于协助治理天目湖水污染状况,提高饮用水源地的水质很有帮助,同时对该模型在其它类似地区的推广具有参考作用。

AnnAGNPS 模型构建主要需要气象、地形、土壤、土地利用和田间作物管理数据等。流域内的气象数据根据 2005 ~ 2010 年实测值,参照中国气象局标准文件<sup>[20,21]</sup>进行换算,并根据模型要求计算相关参数值,生成气象输入文件。地形数据依照 1:5 万地形图矢量化并用双线性内插方法<sup>[22]</sup>生成中天河流域数字高程模型(DEM),由模型自动提取生成地形参数的初始值。土壤数据依据第二次土壤普查数据,查阅文献<sup>[23]</sup>,矢量化得到土壤图类型,并根据模型需要提取和换算土壤理化性质参数。其中,土壤可蚀性  $K$  值的计算运用 EPIC 公式法<sup>[24]</sup>获得,然后转换为国际制单位输入;此外,由于肥料施用和土地利用的不同,土壤氮磷含量在空间上存在一定的差异,土壤氮磷含量通过查阅资料和计算确定合理取值范围,取平均值作为初始输入值。土地利用数据采用 2009 年 0.5 m 空间分辨率的航拍影像目视解译获得,同时进行实地勘察验证,获得流域高精

度土地利用数据. 各土地利用类型的径流曲线数 CN 根据实地情况和模型自带参考文件<sup>[25]</sup>确定. 肥料类型参数来自于流域内的实地调查, 模型肥料参数方面, 中田河地区施用的肥料主要有尿素、复合肥、有机肥、碳铵以及一些农家肥、厩肥等. 因各地施肥水平有一定差异, 进行实地调查后确定肥料中氮磷养分和肥料施用量的范围. 根据模型要求, 以范围内平均作为初始值. 植被作物参数和田间管理参数根据实地调查并查阅模型自带参考文件<sup>[25]</sup>确定输入.

所有参数初始值选取本着准确并尽可能接近真实值的原则获取汇总, 按照模型格式要求处理并换算, 统一导入模型的 Input Editor 编辑器之中, 输入

模型运行需要的气象文件 (Climate. inp) 和流域文件 (AnnAGNPS. inp), 构建起中田河流域 AnnAGNPS 模型.

## 2 结果与讨论

### 2.1 地形参数敏感性分析

地形参数是影响地表径流、土壤侵蚀、表层储水等过程的重要因子. 模型需要的主要地形数据由分室单元 (Cell) 数据和沟道 (Reach) 数据提供. 在 AnnAGNPS-ArcView 界面中运行地形参数模块 (TOPAGNPS), 对中田河流域进行科学合理的流域汇水单元 (Cell) 划分以及河道 (Reach) 的提取<sup>[26]</sup>. 地形参数对模型输出结果的敏感性如表 3 所示.

表 3 地形参数敏感性结果

Table 3 Results of topography parameter sensitivity

参数	中文含义	径流	泥沙	吸附态氮	溶解态氮	总氮	吸附态无机磷	吸附态有机磷	溶解态无机磷	总磷	总有机碳
CAL	分室平均坡度	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
LS	坡长	I	V	IV	I	IV	IV	IV	IV	IV	IV
MN	层流曼宁系数	— <sup>1)</sup>	I	I	—	I	I	I	I	I	I
CFS	河床水流坡度	I	I	I	—	I	I	I	I	I	I
CFL	河床水流长度	I	I	I	—	I	I	I	I	I	I
CFHD	河床水流水力深度	—	I	I	—	I	I	I	I	I	I
CFMN	河床水流曼宁系数	—	I	I	—	I	I	I	I	I	I
RS	河道坡度	I	II	I	—	I	I	I	I	I	I
RVC	河道植被覆盖类型	—	II	I	—	I	I	I	I	I	I
RMN	河道曼宁系数	—	III	I	—	I	I	I	I	I	I
RVMN	沟谷曼宁系数	—	I	I	—	I	I	I	I	I	I

1) 表示该参数对模拟结果无影响, 下同

通过对地形参数的敏感性分析可以看出, 坡长因子 (LS) 对模型径流、泥沙、氮磷营养盐及有机碳输出结果都有较大影响, 其中对土壤侵蚀模块的泥沙输出敏感性最强, 敏感性指数为 1.01, 为 V 级, 属于特别敏感范围. LS 主要是通过影响汇流时间和径流对地表的冲刷来影响模型结果的输出, 与模型输出结果呈正比关系, 是 RUSLE 方程中的重要因子. 河道坡度 (RS) 和河道植被覆盖码 (RVC) 对泥沙输出表现出弱敏感性. 河道坡度 RS 与河道泥沙输出呈正比关系. RVC 表示河道植被覆盖类型, 其取值 0、1、2 分别代表无植被、有植被和被水淹没, 默认为 1, 不同取值对模型泥沙输出结果影响较小, 当取值为 2, 即表示被水淹没时, 径流对河道冲刷最严重, 泥沙输出最多. 分室平均坡度 CAL 对模型输出结果不敏感, 原因是模型径流部分的 SCS-CN 方程没有考虑坡度对径流的影响<sup>[27]</sup>, 调整 CAL 对模型径流输出结果变化微弱, 泥沙和氮磷营养盐变化也不明显. 河道曼宁系数 RMN、层流曼宁系数 MN

和河床水流曼宁系数 CFMN 分别表示河道、层流以及河床的粗糙度, 代表了对径流的阻力, 能改变水流结构, 影响泥沙和氮磷营养盐的运动<sup>[28,29]</sup>. 当曼宁系数  $n$  增大时, 河道粗糙度增加, 对径流阻力增加, 导致流速减缓, 从而引起泥沙输出减少, 同时也会减少颗粒态营养盐的输出. 本研究中, 只有 RMN 对泥沙输出表现出一般敏感性, 而 MN 和 CFMN 表现出不敏感性; 河床水流参数 (CFS、CFL、CFHD) 对模型结果不敏感, 是因研究区河道多为小河流, 河道坡度较小且水较浅所致.

地形参数的敏感性结果分析可以看出, 地形参数主要影响模型土壤侵蚀组块, 氮磷营养盐通过径流对地表的冲刷侵蚀输出. 在 11 个参数中, LS 为影响土壤侵蚀的关键参数.

### 2.2 水文气象参数敏感性分析

AnnAGNPS 模型主要根据每日的气象数据来计算模拟步长, 输出结果. 水文气象数据模拟生成的降雨径流是非点源污染物质迁移到水体的直接动

力,因此径流模拟的优劣是模型的基础. 针对水文 气象参数的敏感性计算结果如表 4.

表 4 水文气象参数敏感性结果

Table 4 Results of hydrological and meteorological parameter sensitivity

参数	中文含义	径流	泥沙	吸附态氮	溶解态氮	总氮	吸附态无机磷	吸附态有机磷	溶解态无机磷	总磷	总有机碳
CN	径流曲线数	V	V	IV	V	V	IV	IV	IV	IV	IV
AKC	土壤可蚀性计算类型	—	II	II	I	II	II	II	II	II	II

从敏感性分析结果看,径流曲线数 CN 对径流、泥沙、氮磷及有机碳等均表现出显著的敏感性. 径流、泥沙、吸附态氮、溶解态氮、总氮、总磷、总有机碳的敏感性指数分别是 4.27、1.06、0.53、5.49、1.57、0.73、0.72. 其中对径流、溶解态氮的敏感性最大,敏感性指数分别达到 4.27 和 5.49. CN 主要是表征降雨前流域下垫面性质的综合参数,模型应用在 SCS-CN 曲线方程中,与 AMC、土壤类型、土地利用、坡度等因子有关,对径流非常敏感. 在氮磷结果中,CN 对溶解态氮磷的敏感性比颗粒态氮磷大,是由于 CN 通过影响模型水文模块的运算影响了径流量模拟值的变化,导致溶解态污染物输出改变,而颗粒态氮磷输出主要受土壤侵蚀模块影响,因此 CN 对颗粒态输出作用相对减弱. 此外,由于 CN 对地表径流特别敏感,径流冲刷引起的各集水单元土壤侵蚀量和整个流域的平均侵蚀状况也明显增多,使得泥沙输出敏感性平均为 V 级,在特别敏感范围内. 水文气象参数中,年均土壤可蚀性 AKC 在模型中有两种确定方法<sup>[30]</sup>:根据诺模图(nomographs)和火山土壤方程(volcanic soil

equations) 计算或者使用土壤数据中的 K 因子计算. 两种计算方法输出结果的敏感性为 II 级,比较两种方法发现在本流域中第一种方法输出结果相对较好.

敏感性分析的结果表明,水文气象参数对模型径流产生贡献最大,泥沙和营养盐输出都以径流为载体,CN 对模型径流输出有主要影响.

2.3 植被作物管理和肥料参数敏感性分析

AnnAGNPS 模型中的田间管理参数、植被作物参数和肥料参数是重要的输入数据,决定了流域内植被的数量及营养水平. 同时,植被是流域水循环中的重要因子,在降雨的截留、下垫面水分的蒸发、化学物质的溶出和吸收等过程中,都起着重要的作用. 而伴随植被的生长、收获、死亡、分解等过程,流域内各种营养物质也同时循环<sup>[31]</sup>. 肥料中的氮磷是造成非点源污染中水体污染和富营养化的最主要来源<sup>[32]</sup>,各地施肥水平也同时存在着一定差异. 研究植被作物和肥料中氮磷及肥料施用量对模型的影响有助于控制非点源污染. 表 5 为选定参数的敏感性计算分级结果.

表 5 植被作物管理和肥料参数敏感性结果

Table 5 Results of crop management and fertilizer parameter sensitivity

参数	中文含义	径流	泥沙	吸附态氮	溶解态氮	总氮	吸附态无机磷	吸附态有机磷	溶解态无机磷	总磷	总有机碳
CRMD	水分损耗速率	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CRM	根生物量	—	II	II	I	II	II	II	II	II	II
CCC	冠层覆盖	—	III	III	I	III	III	III	III	III	III
CRFH	作物降雨截流高度	—	I	I	I	I	I	I	I	I	I
RR	地表随机糙率	—	II	II	III	II	II	II	II	II	II
NACR	年覆盖率	—	I	I	—	I	I	I	I	I	I
NSRC	地面残留物覆盖	—	I	I	—	I	I	I	I	I	I
FR	肥料施用量	—	—	V	V	V	V	I	V	V	—
FD	肥料深度	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
FIN	肥料无机 N 比例	—	—	—	V	III	—	—	—	—	—
FON	肥料有机 N 比例	—	—	IV	I	IV	—	—	—	—	—
FIP	肥料无机 P 比例	—	—	—	—	—	V	—	V	V	—
FOP	肥料有机 P 比例	—	—	—	—	—	I	I	I	I	—

通过表 5 的敏感性分级可以看出,在植被作物管理数据中,根生物量(CRM)、冠层覆盖(CCC)对泥沙和营养盐输出的敏感性都表现为 II ~ III 级,它

们对结果输出的影响主要是通过根系提高土壤结构紧密度以及增加地表覆盖来减少土壤侵蚀,从而减少泥沙和可溶性营养盐的输出. 地表的随机糙率

(RR)是土壤表面特性的重要因子,对风蚀和水蚀有显著作用<sup>[33]</sup>,对泥沙侵蚀敏感性为Ⅱ级,属弱敏感性,对伴随土壤侵蚀输出的氮磷营养盐的敏感性也为Ⅱ级.作物降雨截留高度(CRFH)的不敏感性是因为本流域为低山丘陵区,作物种植面积小且覆盖度高、作物类型低矮,使得从作物冠层低落的雨滴对地表冲击小.

肥料的施用量(FR)可以改变流域土壤及水体中氮磷含量,对营养盐的输出有显著影响:模型吸附态氮、溶解态氮、总氮、吸附态无机磷、溶解态有机磷、总磷的敏感性指数分别为1.22、1.26、1.23、1.25、1.25、1.20,均达到特别敏感范围.可见肥料的施用量(FR)是氮磷营养盐输出的关键因子,对非点源污染的贡献程度高.此外,各肥料类型的养分含量也可对相应的模型输出结果有显著的敏感性,

表6 土壤参数敏感性结果

Table 6 Results of soil parameter sensitivity

参数	中文含义	径流	泥沙	吸附态氮	溶解态氮	总氮	吸附态无机磷	吸附态有机磷	溶解态无机磷	总磷	总有机碳
K	土壤可蚀性因子	—	V	IV	I	IV	IV	IV	IV	IV	IV
SONR	有机 N 含量	—	—	I	I	I	—	—	—	—	—
SINR	无机 N 含量	—	—	—	I	I	—	—	—	—	—
SOPR	有机 P 含量	—	—	—	—	—	I	III	I	I	—
SIPR	无机 P 含量	—	—	—	—	—	I	III	I	I	—

由表6可以看出,土壤可蚀性因子K对除径流与溶解态氮之外的各项模型结果的敏感性均非常高,模拟结果中泥沙、吸附态氮、总氮、总磷和总有机碳的敏感性因子达到了1.01、0.87、0.72、0.82和0.67,均在比较敏感范围以上.K值是模型中通用流失方程RUSLE的重要参数之一,是评价土壤对侵蚀影响作用的因子<sup>[34]</sup>,代表了土壤对侵蚀应力分离和搬运作用的抵抗能力.从模型的模拟结果敏感性上看,K值对模型的泥沙和氮磷营养盐输出贡献很大,在模型模拟时要得到统一的、具有可比性的土壤可蚀性K值.在AnnAGNPS模型中,K值可以根据输入的土壤信息中的机械组成数据自动计算,也可根据经验公式自行计算输入.本研究中,土壤可蚀性K值的计算运用EPIC公式法<sup>[24]</sup>获得,然后转换为国际制单位输入.土壤的有机和无机氮磷含量对模型相对应的氮磷营养盐输出也有微弱影响,敏感性都在Ⅰ级以上,主要是随径流溶解和土壤侵蚀输出.此外,土壤的氮磷养分含量也会影响肥料的施用,从而进一步影响模型的输出结果.

土壤参数的敏感性分析可以看出,土壤参数中K为模型土壤侵蚀组块的关键参数,其余参数主要

肥料的无机氮比例(FIN)和无机磷比例(FIP)可以影响输出结果的溶解态氮和溶解态磷,有机氮比例(FON)和有机磷比例(FOP)可以影响输出结果的吸附态氮和吸附态磷,这些随径流溶解和土壤侵蚀输出的氮磷营养盐成为了非点源污染的重要来源.

植被作物参数和肥料参数对模型结果都有较明显的影响,植被作物管理参数主要通过截留影响径流、改变地表覆盖度和物理结构影响侵蚀;肥料参数主要影响氮磷营养盐输出.

## 2.4 土壤参数敏感性分析

作为流域中最重要下垫面,土壤的理化性质直接关系到土壤中的地表径流的形成、泥沙输出及氮磷营养盐迁移等过程.根据AnnAGNPS模型需要,本研究主要分析土壤可蚀性因子K、土壤有机、无机氮磷含量等参数对模拟结果的敏感性,结果见表6.

影响氮磷营养盐输出.

## 2.5 模型径流校准验证

根据参数敏感性分析的结果,采用经过校准之后的参数对中田河流域2005~2010年年径流量进行模拟,并用径流观测数据与模拟结果相比较来验证模型模拟精度.其中,2005~2008年为模型校准期,2009~2010年为模型验证期.模型效率评价指标采用偏差百分比(RE)、Nash-Sutcliffe效率系数(Ens)来对模拟结果进行评价.评价指标为RE越小,模拟值与实际值越吻合;Ens系数值越大,表明模拟效果越好<sup>[35]</sup>,具体评价标准如表7.

表7 AnnAGNPS模型校准/验证指标评价标准

Table 7 General calibration/validation targets for

指标	AnnAGNPS application			
	优秀	良好	一般	较差
RE/%	<10	10~15	15~25	25~30
Ens	≥0.9	0.75~0.9	0.5~0.75	<0.5

模型径流模拟结果显示,在校准期模拟精度良好,2005~2008各年偏差百分比分别为7.2%、5.6%、13.1%和0.2%.分析表明,除2007年偏差较大外,其余都控制在10%以内,模拟精度在优秀

范围内;在验证期,偏差百分比分别为 0.4% 和 -3.8%,模拟效果优秀。在校准期和验证期,模型的效率系数(Ens)分别达到了 0.76 和 0.96,相对误差分别为 6.5% 和 1.7%,模型对径流的模拟精度符合研究要求,可以反映中田河流域年径流量的变化规律,证明在此尺度上 AnnAGNPS 模型对径流模拟的可行性。

### 3 结论

(1)参数的敏感性可以得出不同类型参数对模型输出结果的影响:对模型径流输出影响最大的参数主要是 SCS 径流曲线数(CN)。同时,CN 值对模型所有结果都有显著影响。对模型土壤侵蚀部分泥沙输出影响最大的参数主要是 CN 值、坡长(LS)和土壤可蚀性因子(K)。对模型污染物输出影响最大的参数主要是 CN 值、坡长(LS)、土壤可蚀性因子(K)以及肥料参数、作物管理参数、土壤参数。模型的营养盐输出主要通过径流冲刷和土壤侵蚀为载体输出,其结果的准确性与径流和土壤侵蚀密切相关。结合本流域实际情况,在进行非点源污染控制和治理时应重点考虑下垫面的径流曲线值和水土保持情况,并注意施肥量和施肥周期的调整。

(2)模型对径流的模拟结果优秀,能反映中田河流域年径流量的变化规律,证明了 AnnAGNPS 模型在中田河流域尺度上的径流模拟适应性。同时根据不同类型参数的敏感性并结合模型机制可以看出,在模型模拟时地表径流会影响土壤侵蚀模块中的泥沙输出,径流和泥沙又会影响氮磷营养盐的输出,为了不影响其他模拟结果,AnnAGNPS 模型参数应依次调整地表径流参数、土壤侵蚀参数、营养盐输出参数。

(3)AnnAGNPS 模型参数复杂,实地调查工作量大,在构建模型时可以结合 GIS 和 RS 手段进行参数获取。在中田河流域范围内应用 AnnAGNPS 模型进行参数敏感性分析对进行非点源污染研究具有参考作用,对太湖低山丘陵小流域进行非点源污染模拟预测和水文水质监测治理具有科学指导意义。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS: a nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, **44**(2): 168-173.
- [ 2 ] 孙金华,朱乾德,颜志俊,等. AGNPS 系列模型研究与应用综述[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(6): 876-884.
- [ 3 ] 李家科,李怀恩,李亚娇. AnnAGNPS 模型研究及应用进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, **37**(2): 225-234.
- [ 4 ] 王晓燕,林青慧. DEM 分辨率及子流域划分对 AnnAGNPS 模型模拟的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(S1): 46-52.
- [ 5 ] 田耀武,黄志霖,肖文发. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价[J]. *生态学报*, 2011, **31**(16): 4568-4578.
- [ 6 ] 马建,鲁彩艳,赵倩,等. AnnAGNPS 模型土壤数据库的建立——以柴河上游小流域为例[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(S1): 151-155.
- [ 7 ] 田雨,雷晓辉,蒋云钟,等. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述[J]. *水文*, 2010, **30**(4): 9-12, 62.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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. 43-48.
- [ 10 ] Li A M, Yang H Z, Gui X A. GIS-based decision making analysis of nonpoint source pollution management in Zhangxi River Watershed, P. R. China [A]. In: 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering [C]. Beijing: ICBBE, 2009. 1-6.
- [ 11 ] Soil Conservation Service. National engineering handbook: Hydrology [M]. Washington DC: US Department of Agriculture, 1972. Section 4, chap 4-10.
- [ 12 ] Yoder D, Lown J. The future of RUSLE: inside the new revised universal soil loss equation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, **50**(5): 484-489.
- [ 13 ] Gordon L M, Bennett S J, Bingner R L, *et al.* Simulating ephemeral gully erosion in AnnAGNPS [J]. *Transactions of the Asabe*, 2007, **50**(3): 857-866.
- [ 14 ] Scardi M, Harding L W. Developing an empirical model of phytoplankton primary production: a neural network case study [J]. *Ecological Modelling*, 1999, **120**(2): 213-223.
- [ 15 ] Choi J Y, Choi C H. Sensitivity analysis of multilayer perceptron with differentiable activation functions [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, **3**(1): 101-107.
- [ 16 ] 陈建,梁川,陈梁. SWAT 模型的参数灵敏度分析——以贡嘎山海螺沟不同植被类型流域为例[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, **9**(2): 41-45.
- [ 17 ] 张运林,陈伟民,杨顶田,等. 天目湖 2001~2002 年环境调查及富营养化评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, **14**(1): 99-103.
- [ 18 ] 高永霞,朱广伟,贺冉冉,等. 天目湖水水质演变及富营养化状况研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 673-679.
- [ 19 ] 王晓杰,贾锁宝. 氮类指标对湖库水质评价结果的影响分析[J]. *江苏水利*, 2009, (5): 35, 38.
- [ 20 ] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 2003. 135-136.
- [ 21 ] 中国气象局. 湿度查算表(甲种本)[M]. 北京:气象出版社, 1980. 15-27.
- [ 22 ] Wu S M, Li J, Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models [J].

- Environmental Modeling & Assessment, 2005, **10**(1): 33-42.
- [23] 溧阳县土壤普查办公室. 江苏省溧阳县土壤志[M]. 南京: 江苏省土壤普查办公室, 1985. 42-64.
- [24] Sharpley A N, Williams J R. USDA Technical Bulletin No. 1768; EPIC-erosion/productivity impact calculator; 1. Model documentation [R]. Washington DC: US Department of Agriculture, 1990. 235.
- [25] Soil Conservation Service. Urban hydrology for small watershed [R]. USDA Technical Release No. 55, 1986.
- [26] Momm H G, Bingner R L, Wells R R, *et al.* AGNPS GIS-based tool for watershed-scale identification and mapping of cropland potential ephemeral gullies [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, **28**(1): 17-29.
- [27] Huang M B, Gallichand J, Wang Z L, *et al.* A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2006, **20**(3): 579-589.
- [28] Murphy E, Ghisalberti M, Nepf H. Model and laboratory study of dispersion in flows with submerged vegetation [J]. Water Resources Research, 2007, **43**(5): W05438, doi: 10.1029/2006WR005229.
- [29] Yen B C. Open channel flow resistance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, **128**(1): 20-39.
- [30] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, *et al.* Agricultural Handbook No. 703; 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. 65-99.
- [31] 邹桂红, 崔建勇, 刘占良, 等. 大沽河典型小流域非点源污染模拟[J]. 资源科学, 2008, **30**(2): 288-295.
- [32] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, **19**(5): 87-91, 96.
- [33] 张光辉. 土壤水蚀预报模型研究进展[J]. 地理研究, 2001, **20**(3): 274-281.
- [34] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, **44**(1): 7-13.
- [35] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the Asabe, 2007, **50**(3): 885-900.

## CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region .....	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing .....	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011 .....	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region .....	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013 .....	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China .....	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion .....	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical .....	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities .....	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu .....	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal .....	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City .....	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period .....	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers .....	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed .....	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake .....	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland .....	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems .....	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method .....	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration .....	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System .....	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron .....	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light .....	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Graphene Oxide Nanoparticles .....	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism .....	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China .....	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment .....	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes .....	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater .....	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo <sub>12</sub> Adopted Catalyst .....	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment .....	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor .....	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process .....	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu <sup>2+</sup> by Xanthate-Functionalized Waste Sludge .....	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L. ....	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene .....	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals .....	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area .....	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe .....	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors .....	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing .....	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs .....	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous <sup>13</sup> C Labeling .....	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area .....	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge .....	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China .....	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake .....	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice .....	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i> .....	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate .....	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) .....	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process .....	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H <sub>2</sub> S over Supported Fe Catalysts on CeO <sub>2</sub> -Intercalated Laponite Clay .....	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites .....	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM <sub>2.5</sub> from Stationary Sources: a Review .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens .....	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行