

# 分布式流域面源模型与污染来源解析

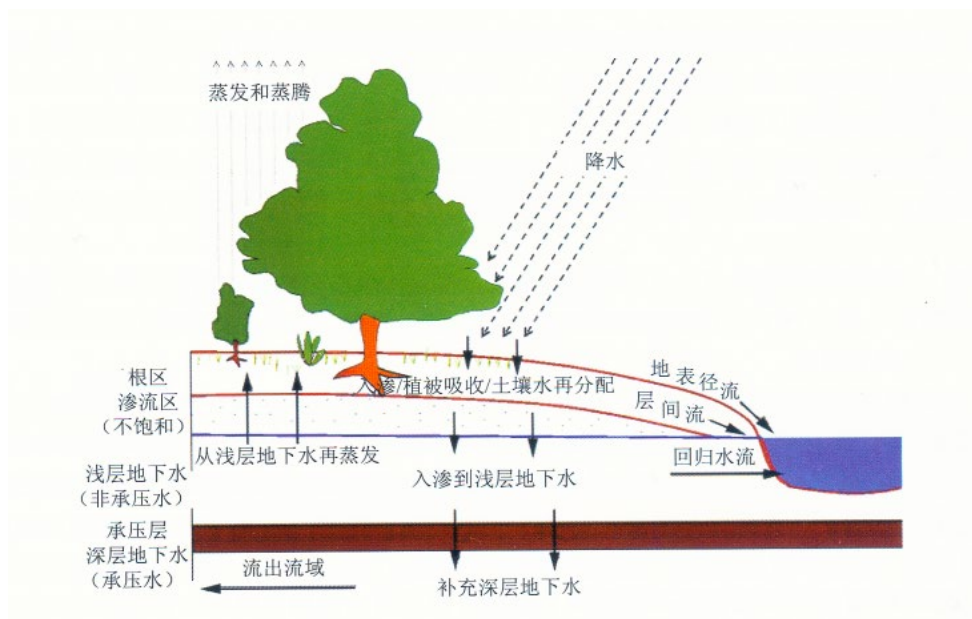
## 1 模型原理

采用 SWAT 模型进行流域面源污染模拟评估。该模型是由美国农业部开发，与地理信息系统相结合的分布式水文模型，包括水文过程子模型、土壤侵蚀子模型和污染负荷子模型等，可用于径流、泥沙和营养物运移的模拟。模型首先进行子流域划分，在此基础上根据研究区域内土地利用、土壤类型及坡度划分水文响应单元（HRU），进行水文过程与水质过程演算，将实测的点源污染数据、土地管理措施等输入模型，即可输出流域水文水质模拟结果。

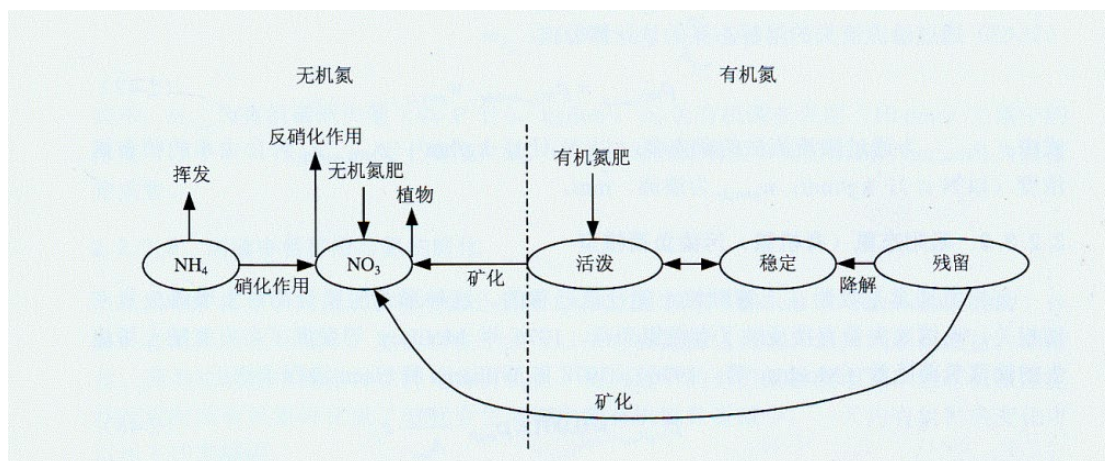
SWAT 模型的水文循环可分为陆地阶段（产流及坡面汇流）与河道演算两部分，陆地阶段决定着子流域及河道的水量、泥沙、污染物等的输入量，模型驱动涉及到气象数据、土壤与土地利用数据和管理措施等。SWAT 模型水文计算的核心为水量平衡方程，计算表达式如下：

$$SW_t = SW_0 + \sum_1^t (P_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (\text{式 1})$$

式中： $SW_t$ 代表下一时段的土壤含水量，mm； $SW_0$ 代表时段初土壤含水量，mm； $t$ 为时间步长，d； $P_{day}$ 为第  $i$  天降水量，mm； $Q_{surf}$ 为第  $i$  天地表径流，mm； $E_a$ 为第  $i$  天蒸发量，mm； $W_{seep}$ 为第  $i$  天土壤层侧向流量，mm； $G_w$ 为第  $i$  天地下径流量，mm。



SWAT 模型在进行非点源污染模拟时，能够模拟氮元素的迁移转化过程，包括化学过程与生物过程两个部分。氮在有氧环境中，氮元素形态转化过程为有机氮到氨氮，然后到亚硝酸盐、硝酸盐。SWAT 模型在计算河道中各种氮元素的转化运移采用的是 QUAL2E 模型，在有氧水环境中，氮的存在形式变化为有机氮转化成氨氮，然后被氧化为亚硝酸和硝酸盐，藻类生物量中的氮可转化为有机氮，从而使河道中的有机氮增加。



## 2 模型构建

进行 SWAT 水文水质模拟需要的数据可分为两部分，即建立模型所需的研究区空间属性数据和驱动模型计算的点源输入、农业管理、气象等数据。本文基于 ArcGIS 对流域土地利用、土壤栅格数据和气象数据进行处理并建立数据库，将实测数据处理为文本文件对模型进行率定，SWAT 水文水质模拟需要的数据及其详细来源见表 1。

表 1 SWAT 建模数据及其来源

数据类型	属性	来源
数字高程数据	90mx90m 分辨率	地理空间数据云
土地利用数据	30mx30m 分辨率	数据共享服务系统 (casearth.cn)
土壤数据	1kmx1km 分辨率	世界土壤数据库
气象数据	CMADS 气象驱动日数据	青藏高原数据中心
水文数据	沂沭河流域控制站径流数据	水利部水文年鉴
水质数据	沂河、沭河监测断面周数据	中国环境监测总站
点源排放数据	临沂市重点企业排放月数据、山东省废水排放数据	临沂市生态环境局
临沂市人口与社 会经济	统计年鉴	临沂市人民政府

研究区域的数字高程（DEM）数据下载于自地理空间数据云（gscloud.cn），分辨率为 90m×90m。沂河流域地区西北部山区内较为陡峭，而中部和南部多为平原，上下游高程悬殊坡度较大，沭河流域与沂河流域的特征较为相似，表现为北部高而东南低，大官庄-水库区间集水区范围坡度相对较缓。

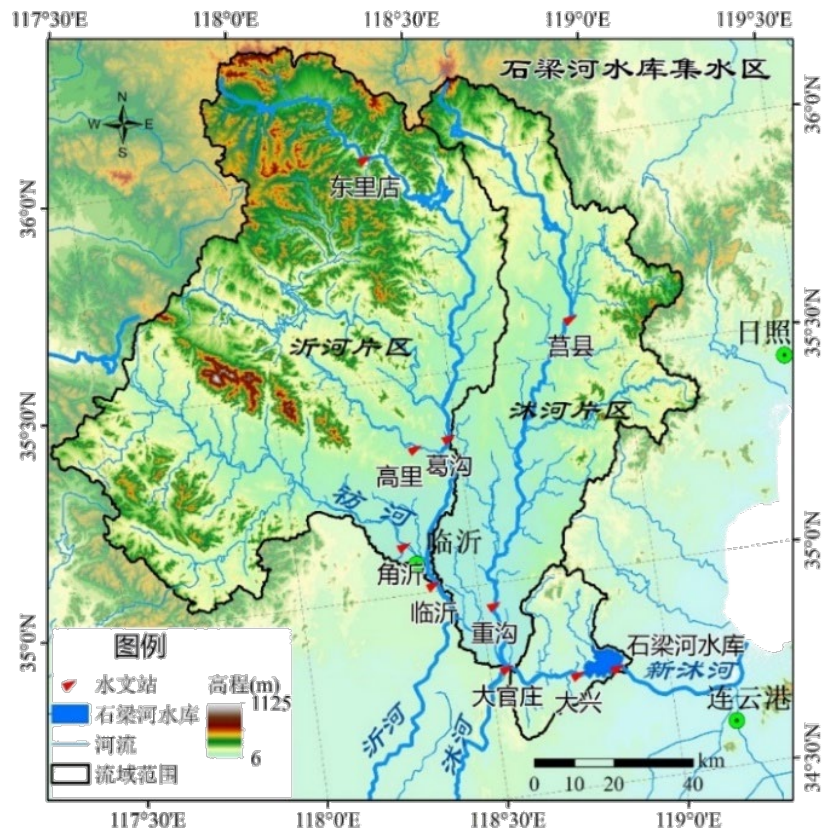


图 3 研究区数字高程

研究区土地利用数据（2010GLC）来源于地球大数据科学工程数据共享网，精度为  $30\text{m} \times 30\text{m}$ 。石梁河水库区的农业用地占比为 78.88%，是流域内最主要的用地类型；沂河流域的农业用地集中在下游水系旁，仅占流域面积的 29.23%，上游山地丘陵地区多为草地；沭河流域的农业用地（42.43%）位于中下游地区，草地主要分布在流域北部，面积占比为 46.58%。

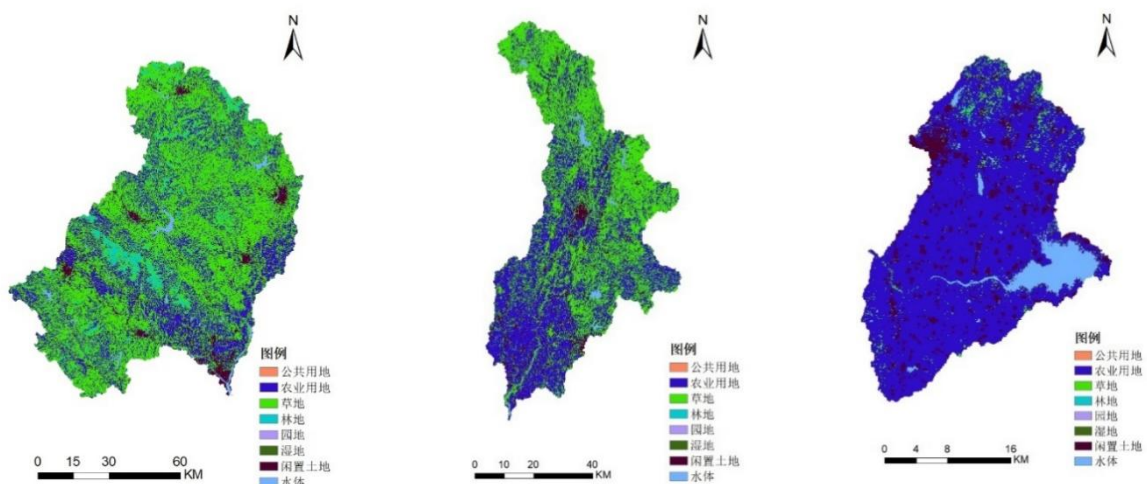


图 4 研究区土地利用空间分布图



土壤类型栅格数据来源于联合国粮农组织等所构建的世界土壤数据库 (HWSD)，基于 ArcGIS 对研究区域的土壤数据进行剪裁并根据 SWAT 使用手册进行重分类，得到研究区域的各种土壤类型及占比与空间分布见下图。

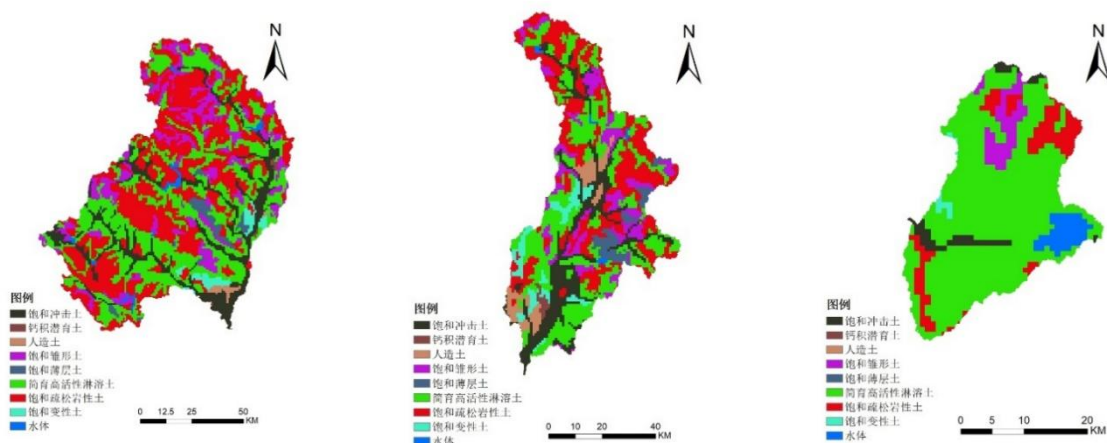


图 5 研究区土壤类型空间分布图

分别以临沂站、重沟站、石梁河水库出库点为流域出口，进行子流域划分。参考模型推荐的阈值，将沂河流域划分为 41 个子流域、沭河流域划分为 31 个子流域，石梁河水库（大兴镇以上）划分为 29 个子流域。根据三个区间的土地利用与土壤类型划分水文响应单元，沂河流域最终划分出 230 个水文响应单元，沭河流域划分为 160 个水文响应单元，石梁河水库集水区划分为 56 个水文响应单元。



图 6 沂河、沭河及大官庄-水库区间子流域划分

### 3 径流溶质模拟结果

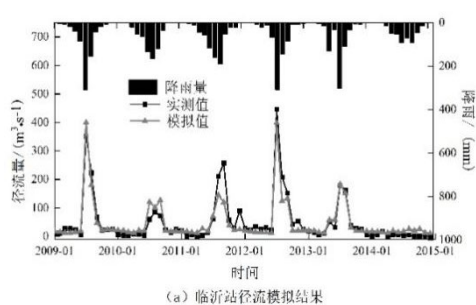
临沂站、莒县站、重沟站及大官庄和大兴镇站的实测径流数据来自于水利部历年水文年鉴，摘录时间为 2006-2019 年。沂河、沭河、石梁河水库入库监测断面水质数据摘录自中国环境监测总站发布的全国站点水质自动检测报告，监测频次为每周，主要指标为氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）和溶解氧（DO）。采用决定系数  $R^2$ 、相对误差  $R_e$  和纳什效率系数  $E_{ns}$  作为模拟结果与实测数据拟合程度的评价指标。

#### 3.1 径流模拟精度

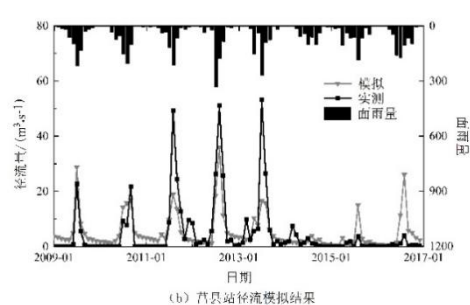
沂河流域逐月径流模拟过程与实测过程下图 7，临沂水文站径流模拟结果决定系数  $R^2$  为 0.90、纳什系数  $E_{ns}$  为 0.90，相对误差为 3.86%。

沭河流域莒县站逐月径流模拟结果的决定系数  $R^2$  为 0.53、纳什系数  $E_{ns}$  为 0.53，相对误差为 3.8%，重沟站逐月径流模拟结果的决定系数  $R^2$  为 0.18、纳什  $E_{ns}$  为 0.04，相对误差为 6.9%，精度相比莒县水文站略低。

对于石梁河水库入库大兴镇站径流的模拟，除了要考虑集水区内的降雨径流过程之外，还要将大官庄站流量和污染负荷作为外源输入。石梁河水库集水区大兴镇站逐月径流模拟结果的决定系数  $R^2$  为 0.80、纳什系数  $E_{ns}$  为 0.70，相对误差为 5.11%。



(a) 临沂站径流模拟结果



(b) 莒县站径流模拟结果

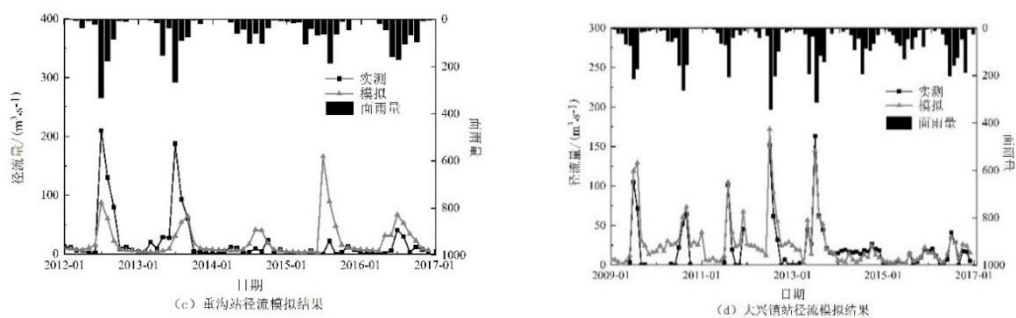


图 7 临沂、莒县、重沟与大兴镇站径流模拟结果

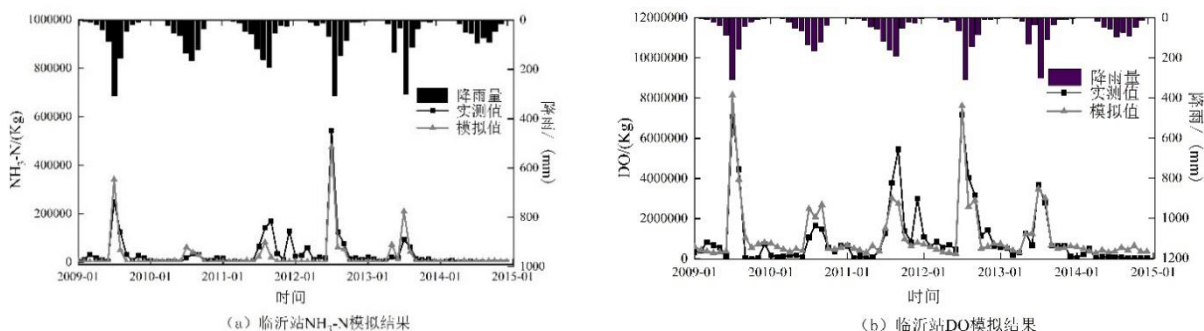
### 3.2 水质模拟精度

沂河临沂站断面监测水质指标氨氮 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) 和溶解氧 ( $\text{DO}$ ) 模拟结果的决定系数  $R^2$  分别为 0.82、0.84，纳什系数  $E_{\text{ns}}$  分别为 0.79、0.83，相对误差分别为 18.02% 和 6.43%。

沭河监测水质指标氨氮 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) 和溶解氧 ( $\text{DO}$ ) 模拟结果趋势与沭河断面实测  $\text{NH}_3\text{-N}$  和  $\text{DO}$  的变化趋势相同。重沟站模拟决定系数  $R^2$  分别为 0.11、0.19，纳什系数  $E_{\text{ns}}$  分别为 0.10、0.18，相对误差分别为 26.8% 和 9.4%。

石梁河水库大兴镇入库断面监测水质指标氨氮 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) 和溶解氧 ( $\text{DO}$ ) 模拟结果的决定系数  $R^2$  分别为 0.85、0.56，纳什系数  $E_{\text{ns}}$  分别为 0.85、0.52，相对误差分别为 3.23% 和 18.91%。

总体上，SWAT 模型可以较好地模拟水库集水区水文过程与面源污染运移。



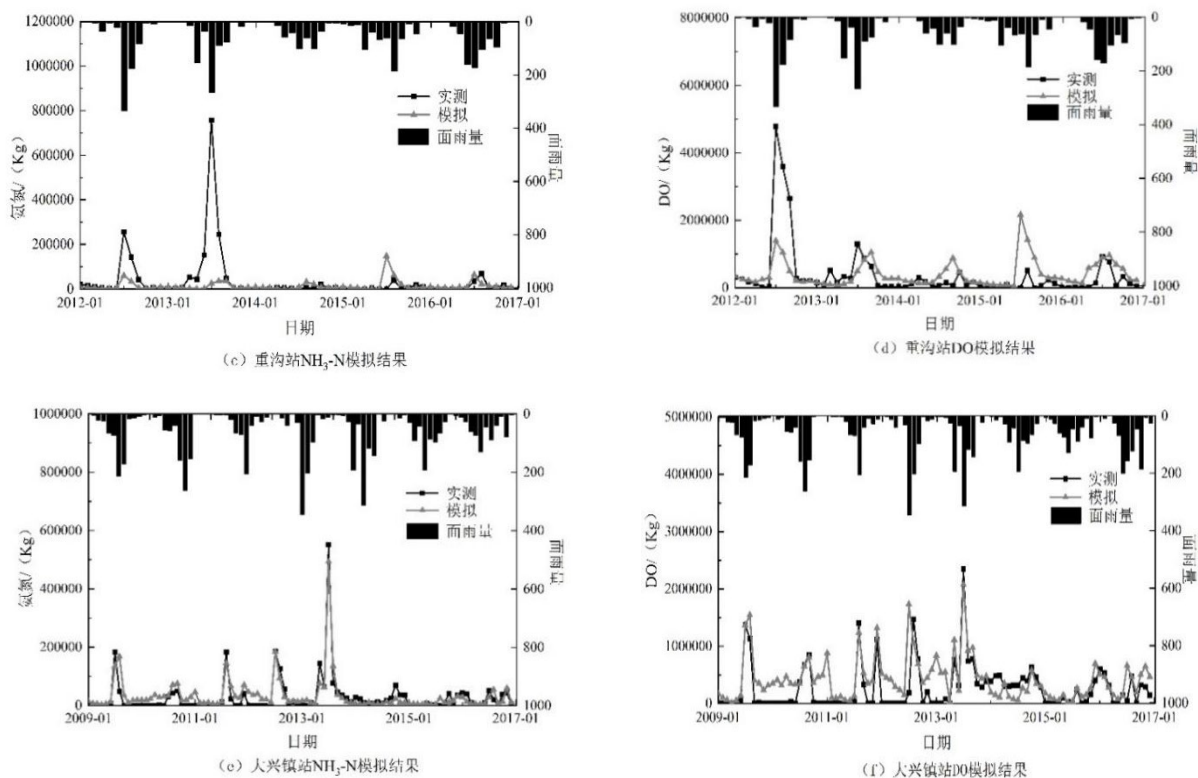


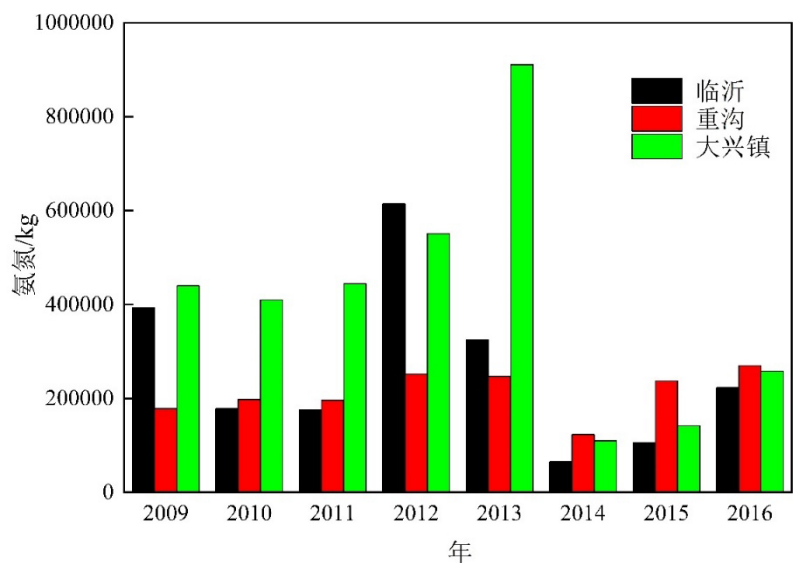
图 8 临沂、莒县、重沟与大兴镇站水质模拟结果

## 4 氮污染负荷来源解析

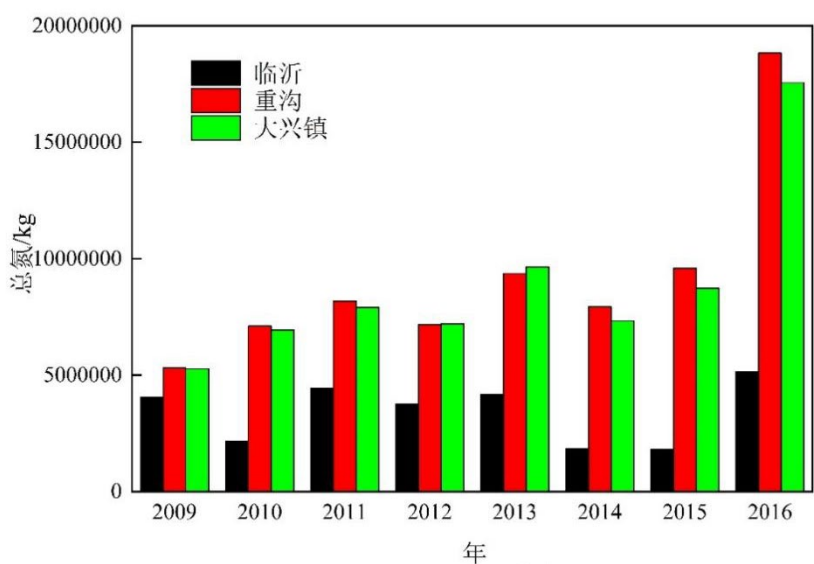
研究区  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 负荷量年际变化较大，沂河沭河流域的氮流失量随着降雨量的增大而上升，反之亦然；大兴镇站入库  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TN 负荷的年际变化均受沭河跨流域来水影响，TN 负荷与沭河流域氮流失量变化趋势一致，与区间内降雨径流的相关性不显著。

年内主要集中在汛期的 7-9 月，大兴镇站入库氮污染物浓度的时间分布与沭河大致相同；沭河流域、大官庄-水库区间的氮污染浓度峰值出现在非汛期的 10-2 月，TN 浓度最高分别为 13.15mg/L 和 15.88mg/L；而沂河流域汛期 7 月  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷与浓度为 0.26mg/L 最高，TN 浓度在 10 月、11 月达到峰值。



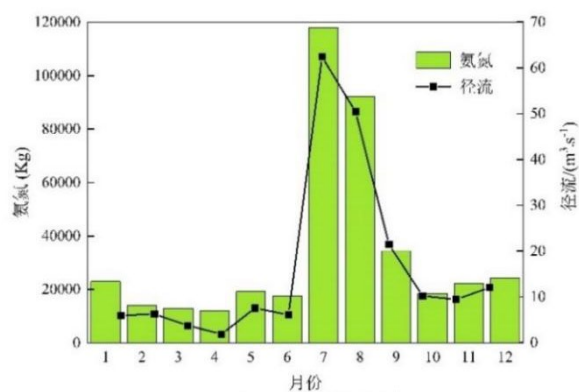


(a) NH<sub>3</sub>-N年际分布

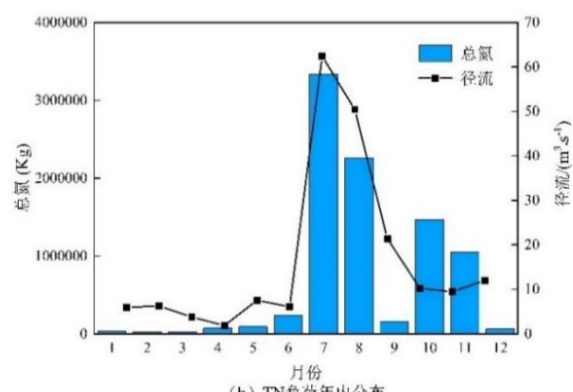


(b) TN年际分布

图9 研究区氨氮、总氮模拟结果年际分布



(a) NH<sub>3</sub>-N负荷年内分布



(b) TN负荷年内分布

图10 新沭河大兴镇氮负荷量年内分布

沂沭河流域污染程度较重的地区集中在农业较为发达的中下游地区，上游用地类型为草地的地区主要污染物来自土壤冲刷流失，生活与工业用水等流入河道后造成干流河道水质变差；大官庄-水库区间受上游来水影响，污染严重的地区集中在新沭河两岸地区，区间内支流如塘子河、石门头河水系中的污染物直接进入库区加剧了水质恶化。

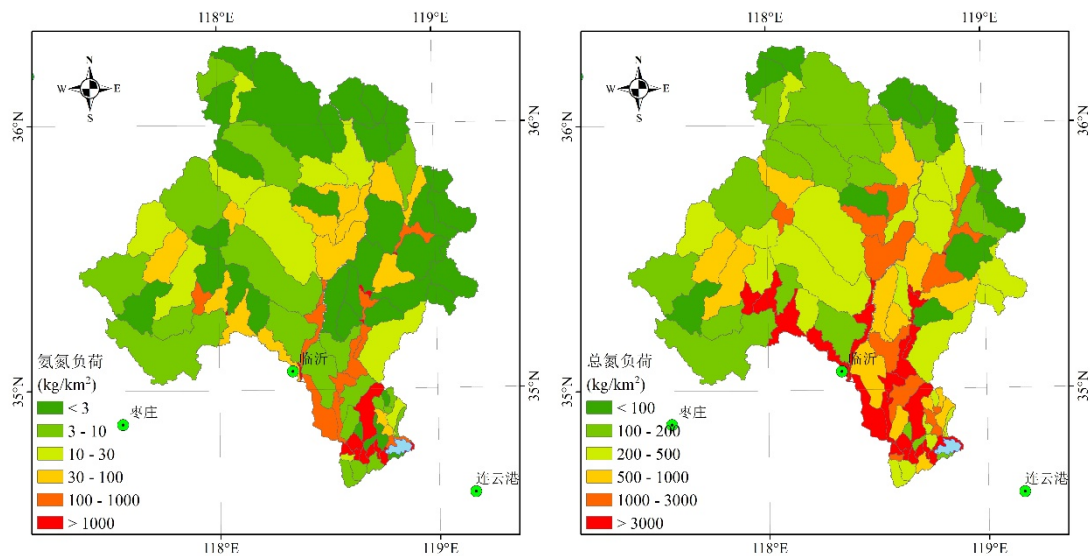


图 11 集水区氨氮、总氮负荷空间分布

沂河流域的土壤氮流失、污水排放、农业施肥对 TN 的贡献率较为接近，其中水土流失的总氮贡献（36.16%）高于其他两项；沭河流域的农业施肥（68.46%）TN 负荷贡献率高于沂河流域，对  $\text{NH}_3\text{-N}$  负荷贡献量最大的为污水排放（59.5%），主要原因是该地区的农业占比、人口密度、人均 GDP 高于沂河流域；新沭河入库主要污染物来源为沭河来水，大官庄-水库区间内的主要污染源为农业面源污染与工业、生活污水排放。为控制新沭河入库水质，建议在治理区间内点源与非点源污染的同时，针对沂沭河流域分别设置不同管理措施，并优化跨流域水量调度。

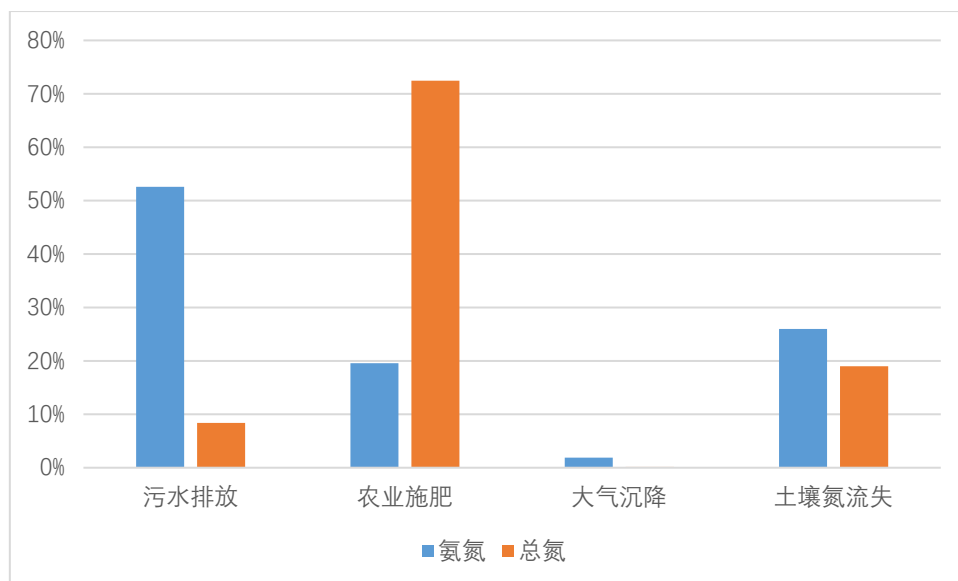


图 12 不同污染源对大官庄-水库区间内氮贡献率

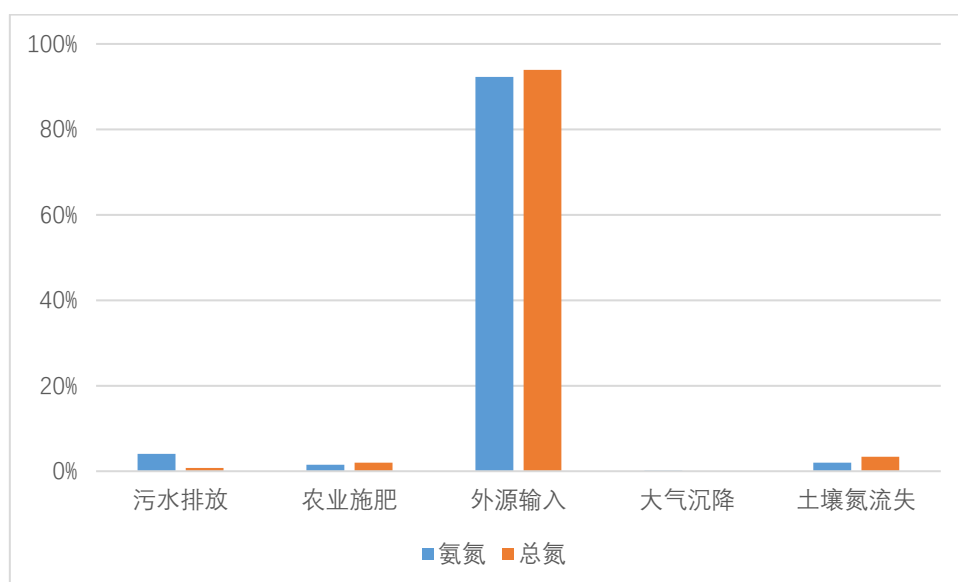


图 13 考虑跨流域调水的不同污染源对石梁河入库氮负荷贡献率