

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4  
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 ..... 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶污染特征 ..... 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分特征与来源解析 ..... 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 ..... 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 ..... 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 ..... 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 ..... 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 ..... 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 ..... 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 ..... 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 ..... 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O<sub>3</sub> 分析 ..... 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 ..... 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 ..... 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 ..... 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 ..... 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 ..... 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 ..... 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 ..... 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析 ..... 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 ..... 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 ..... 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 ..... 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 ..... 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) ..... 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 ..... 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 ..... 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征 ..... 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 ..... 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险 ..... 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 ..... 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 刚佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 ..... 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(VI) ..... 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 ..... 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 ..... 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 ..... 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生 ..... 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 ..... 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 ..... 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试 ..... 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 ..... 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌 *Pseudomonas putida* YH 的脱氮特性及降解动力学 ..... 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响 ..... 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落 ..... 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷 PHA 的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 ..... 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 ..... 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 ..... 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)浓度特征及影响因素 ..... 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH<sub>4</sub> 吸收规律 ..... 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 ..... 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 ..... 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 ..... 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 ..... 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与发展 ..... 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明晗, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

# 基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律

郑文波, 王仕琴\*, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 中国科学院农业水资源重点实验室, 河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050021)

**摘要:** 太行山低山丘陵区是华北平原地下水补给区, 近年来山区农田面积增加, 农田过量氮肥投入造成地下水硝酸盐浓度逐年升高, 因此, 研究典型农田土壤氮淋溶过程对保护补给区地下水具有重要意义. 本文以位于太行山低山丘陵区的中国科学院太行山生态试验站冬小麦-夏玉米轮作农田为研究对象, 应用根区水质模型 (root zone water quality model, RZWQM) 对太行山低山丘陵区 2015~2016 年冬小麦-夏玉米的 1 个轮作周期内 1m 土壤剖面水分和硝态氮迁移进行模拟. 结果表明, 土壤硝态氮淋溶主要发生在夏玉米季(雨季), 当全年施氮量为  $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 夏玉米季硝态氮淋失量达到  $59.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 而冬小麦生长期硝态氮淋失量仅为  $2.12 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . 不同施氮量和不同降水年型下玉米季土壤硝态氮淋溶模拟结果表明, 当施氮量为 0、300 和  $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 2016 年(丰水年)极端降水后, 玉米季土壤硝态氮潜在淋失量分别为 10.5、59.9 和  $136.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 当全年施氮量为  $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 2013(枯水年)、2015(平水年)和 2016 年(丰水年)玉米季硝态氮淋失量分别占轮作周期总施氮量的 9%、10% 和 20%; 当全年施氮量为  $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 2013(枯水年)、2015(平水年)和 2016 年(丰水年)玉米季硝态氮淋失量分别占总施氮量的 11%、17% 和 30%, 表明大降水事件不仅对地下水形成大量补给, 很大程度上也增加了累积在农田土壤中的硝态氮淋溶损失, 增加了对区域地下水硝酸盐潜在污染威胁.

**关键词:** 太行山低山丘陵区; 根区水质模型 (RZWQM); 硝态氮淋溶; 施氮量; 极端降水

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1770-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201809011

## Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model

ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin\*, LIU Bing-xia, LEI Yu-ping, CAO Jian-sheng

(Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Hebei Laboratory of Agricultural Water-Saving, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** Taihang Mountain region is the recharge area for groundwater in the North China Plain (NCP). In recent years, the elevated nitrate concentration in the groundwater in the Taihang Mountain has often been associated with the increased area of farmland and the excessive application of nitrogen. Thus, it is significant to study the soil nitrogen leaching process in typical farmland. In this study, the root zone water quality model (RZWQM) was used to simulate the nitrate nitrogen leaching of winter wheat/summer maize rotation systems in the Hilly Ecosystem Experimental Station in Taihang Mountain. The results showed that during the 2015-2016 winter wheat/summer maize season, the nitrate nitrogen from the soil leaching occurred mainly in the summer maize season (rainy season), with the nitrate nitrogen leaching amount reaching  $59.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , while the nitrate nitrogen leaching amount during the winter wheat season was only  $2.12 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . The soil nitrate nitrogen leaching condition was simulated using the RZWQM model for different nitrogen contents and years with different rainfall. Significant linear correlations were observed between nitrogen use and nitrate leaching in winter wheat/summer maize rotation systems. In summary, the results showed that the nitrate nitrogen leaching values were 10.5, 59.9, and  $136.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  for nitrogen fertilizer applications of 0, 300, and  $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively, during extreme precipitation in a wet year (2016). The value of nitrate nitrogen leaching in the maize season of 2013 (dry year), 2015 (normal year), and 2016 (wet year) accounted for 9%, 10%, and 20% for the  $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  of nitrogen fertilizer applied, respectively. However, the value of nitrate nitrogen leaching in the maize season of 2013 (dry year), 2015 (normal year), and 2016 (wet year) accounted for 11%, 17% and 30% of the  $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  of nitrogen fertilizer applied. These results show that extreme precipitation events not only greatly recharge the groundwater, but also increase the leaching of accumulated nitrate nitrogen and potential nitrate contamination in the groundwater.

**Key words:** hilly area of Taihang Mountain; root zone water quality model (RZWQM); nitrate nitrogen leaching; nitrogen application rate; extreme precipitation

硝酸盐是无机氮肥在土壤中的主要形式之一, 对作物的生长发育起着重要作用<sup>[1]</sup>, 硝酸盐极易溶

收稿日期: 2018-09-03; 修订日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471028, 41530859); 国家重点研发计划项目(2016YFD0800100); 中国科学院百人计划项目

作者简介: 郑文波(1988~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向水文循环与地下水环境, E-mail: wbzheng@sjziam.ac.cn

\* 通信作者, E-mail: sqwang@sjziam.ac.cn

于水, 当施肥量超过植物需要及土壤反硝化能力时, 氮素就会在降雨或灌溉作用下随土壤溶液运移, 通过淋溶进入含水层污染地下水<sup>[2, 3]</sup>. 氮素的淋失不仅造成农业水资源严重浪费, 化肥和农药等的大量流失, 也导致了地下水水质的退化, 成为引起地下水污染最常见、分布最广泛的农业非点源污染物之一<sup>[4, 5]</sup>. 如何在保护地下水水质和防控非点源污染的同时合理进行农业施肥成为国内外学者研究的热点问题<sup>[6-8]</sup>.

太行山低山丘陵区是华北平原的生态屏障也是华北平原地下水补给区, 属于典型的农林交错地带, 人类活动频繁、土地利用类型多样. 该地区土壤结构不良, 石砾含量大, 且多属粗骨土, 易侵蚀. 土壤风化层薄, 土层厚度在 20 ~ 50 cm 之间, 土壤保肥保水能力差, 具有较高的渗透性能<sup>[9]</sup>. 近年来低山丘陵区农业活动如经济林和农田面积大幅度增加, 氮肥过度施用以及人类污染物的排放造成该区域地下水硝酸盐浓度逐年升高<sup>[10]</sup>. 因此研究太行山低山丘陵区典型农田土壤氮淋溶过程对保护补给区地下水具有重要意义<sup>[11]</sup>.

目前, 计算和评估农田氮淋溶的方法包括直接测定法和其它模型法: 前者包括淋溶盘或土水势法, 由于其仅能测定点上数据, 区域代表性差; 后者在国内正在推广和改进, 同时在应用时需要针对国内某些特殊的区域环境进行耦合调整来提高模拟的精度<sup>[12, 13]</sup>. 模型模拟法因具有操作简单、模拟准确和代表性广等优点而成为评估和预测淋溶的核心方法, 目前应用较多的模型有 GLEAMS (groundwater loading effects of agricultural management systems)<sup>[14, 15]</sup>、SWAT (soil water assessment

tool)<sup>[16, 17]</sup>等, 其在综合分析作物生产和土壤氮素运移方面还有待加强<sup>[18, 19]</sup>. 而根区水质模型 (root zone water quality model, RZWQM) 耦合了农业生产管理以及环境影响的模块, 成为预测和评估农田氮素淋溶较为普遍的工具<sup>[20, 21]</sup>.

因此, 本文利用 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区冬小麦-夏玉米农田轮作系统土壤硝态氮和水分运移状况, 并且通过模拟 3 种不同施氮量以及不同降水年型的情景下, 分析土壤硝态氮淋溶状况. 本研究对于预测山区农田氮淋溶量对地下水的影响以及合理控制山区农田施肥保护地下水环境等方面具有一定意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

冬小麦-夏玉米试验在中国科学院太行山山地生态试验站 (114°15'50"E, 37°52'44"N) 进行. 该地区属于暖温带半干旱大陆性气候, 年平均气温 13°C (-1.6°C ~ 26.3°C), 年平均降水量 513.2 mm, 其中春季降水量较少, 6 ~ 9 月降水量占全年降水量的 75%, 年平均蒸发量为 1 598 mm, 海拔为 49 ~ 812 m<sup>[22]</sup>. 图 1 为 2015 ~ 2016 太行山降水量变化特征, 其中 2015 年降水量为 469.4 mm, 2016 年降水量为 927.1 mm, 2016 年 7 月 19 ~ 20 日降水量为 504.2 mm. 利用太行山站过去 30 年的降水数据进行统计分析, 表明 2015 年为平水年, 2016 年为丰水年, 同时根据降水划分标准判定 2016 年 7 月 19 ~ 20 日降水属于大暴雨即极端降水<sup>[23, 24]</sup>.

该地区上游为石质山区地质结构为前寒武系滹沱群变质岩组, 出露的岩石主要为花岗岩片麻岩, 在

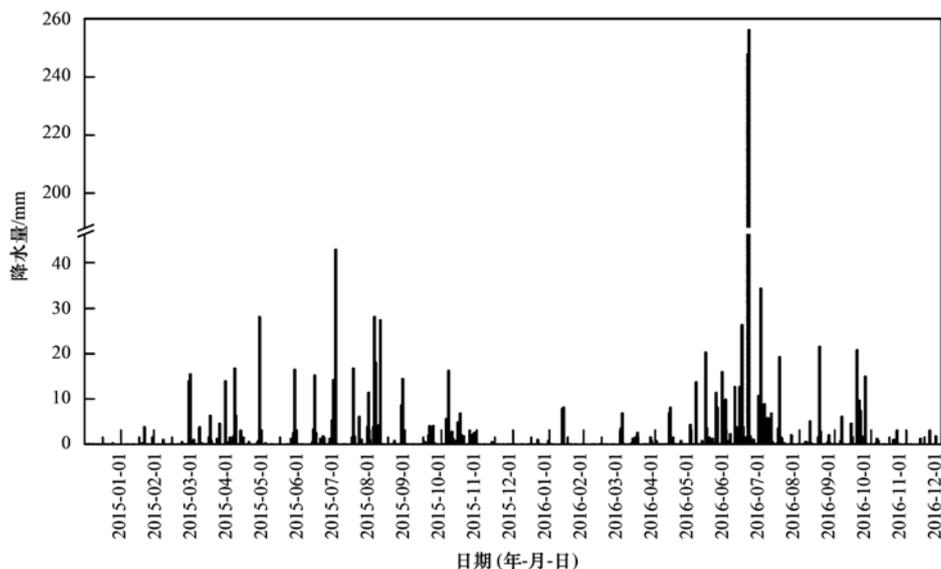


图 1 2015 ~ 2016 年太行山站降水量变化特征

Fig. 1 Precipitation at Taihang Station during 2015 and 2016

其表层覆盖有 0.5 ~ 10 m 厚的风化层. 土壤主要为褐土, 土层薄, 角砾石含量大, 易侵蚀, 具有较高的渗透性能. 该试验小区自 1986 年建站以来施肥

灌溉措施与山区农民施肥灌溉相一致, 小区土壤理化性质基本稳定. 土壤剖面基本理化性质和土壤机械组成见表 1.

表 1 研究点土壤基本理化性状和机械组成特征<sup>1)</sup>

Table 1 Basic physical and chemical properties and mechanical characteristics of the soil in the study

土壤深度/cm	土壤理化性质					机械组成/%		
	土壤容重 /g·cm <sup>-3</sup>	饱和导水率 /cm·h <sup>-1</sup>	田间持水率 /cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup>	土壤温度 /°C	初始硝态氮 /μg·g <sup>-1</sup>	黏粒	粉粒	砂粒
0 ~ 10	1.25 ± 0.02	4.80 ± 0.2	25.72 ± 1.2	20.5 ± 0.5	9.16 ± 1.0	2.3 ± 0.1	37.1 ± 2.1	60.6 ± 3.8
10 ~ 20	1.27 ± 0.03	4.52 ± 0.1	23.39 ± 1.5	19.1 ± 0.3	11.49 ± 1.3	2.0 ± 0.2	36.8 ± 1.8	61.2 ± 3.2
20 ~ 30	1.30 ± 0.05	4.25 ± 0.4	21.52 ± 1.7	18.0 ± 0.2	4.69 ± 0.9	2.3 ± 0.1	34.7 ± 2.2	63.0 ± 2.8
30 ~ 50	1.32 ± 0.02	4.13 ± 0.3	17.62 ± 1.1	17.4 ± 0.4	8.32 ± 0.7	2.1 ± 0.3	36.9 ± 2.3	61.0 ± 3.1
50 ~ 70	1.50 ± 0.04	3.88 ± 0.2	18.11 ± 1.9	17.0 ± 0.5	16.22 ± 1.8	2.4 ± 0.2	37.4 ± 1.9	60.2 ± 3.5
70 ~ 100	1.56 ± 0.03	2.18 ± 0.2	14.75 ± 1.6	15.1 ± 0.3	20.01 ± 2.1	2.4 ± 0.1	39.5 ± 2.4	58.1 ± 2.9

1) 表内数值表示平均值 ± 标准差 (n = 3)

## 1.2 试验设计和指标测定方法

冬小麦-夏玉米耕作方式为常规翻耕. 冬小麦-夏玉米轮作的施氮量如下: 冬小麦施氮量(以 N 计)为 300 kg·hm<sup>-2</sup>, 小区面积为 310 m<sup>2</sup>(长 22.6 m, 宽 13.7 m), 同时在小区四周设置宽度为 1m 的保护行, 氮肥于小麦播种前和返青期分 2 次施用, 底追各半, 玉米季不施肥. 冬小麦灌溉 2 次分别在种植前和返青期, 灌溉方式采用当地农民大水漫灌的灌溉方式, 玉米季无灌溉.

土壤水动态监测利用含水量反射传感器(Water Content Reflectometer, Model CS615, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)监测, 每个传感器由两根 20 cm 的波导管(waveguides)组成. 埋设深度分别为 10、20、30、50、70 和 100 cm, 传感器探针水平放置, 每 30 min 监测一次, 所得土壤含水量为体积含水量.

土壤硝态氮含量分别在作物生长期(冬小麦生长初期、返青期和收获期; 夏玉米生长初期和收获期)利用剖面采样和负压法抽提土壤水测定. 剖面采样测土壤硝态氮含量利用离心萃取法, 即称取风干土样品 10 g, 用超纯水按 1:5 浸提, 测定上清液的 EC, 用 0.25 μm 的醋酸纤维素滤膜过滤, 采用离子色谱仪(ICS-2100, Dionex, 美国)测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量.

## 1.3 RZWQM 模型

### 1.3.1 模型介绍

RZWQM 模型是美国农业部大平原系统研究所(USDA-ARS, Great Plain System Research Unit)于 1992 年推出的农业系统作物和环境管理模型. 该模型整合了作物根区所有影响作物生长的物理、生物和化学过程, 主要应用到我国平原地区, 能够准确模拟土壤剖面、土壤表层, 浅层或者深层渗漏过

程中的硝酸盐含量<sup>[25, 26]</sup>. RZWQM 主要由物理、化学、养分、杀虫、作物和管理这 6 个模块构成, 其中包括“日”和“时”两个时间尺度, 以“日”为尺度计算离子、肥料、灌溉水、耕地措施, 以及潜在蒸散发和蒸腾量<sup>[27]</sup>. 水分迁移及营养化学过程以“时”尺度计算, 包括土壤水分的再分配、营养盐的迁移转化、渗滤等.

### 1.3.2 模型参数输入

模型初始输入数据包括当地全年的气象数据和土壤基本数据(如表 1). 其中气象数据包括模拟期间日降水、日最高温、日最低温、风速、相对空气湿度等; 土壤基本数据包括土层容重、田间持水量、土壤 pH、土壤含水率、剖面硝态氮和铵态氮初始含量.

本文以 2015 年田间种植的冬小麦实测数据输入 RZWQM 模型进行模型参数率定, 以 2016 年夏玉米模型输出数据与实测值进行比较, 然后进行 RZWQM 模型参数验证. 模型参数的率定包括水分、养分和作物模块.

### 1.3.3 RZWQM 模型评价指标

模型率定效果的评价是判定参数优化的关键, 不同统计指标各有优缺点<sup>[28]</sup>, 本文在模型参数率定过程中采用归一化误差(均方根差/平均值)进行参数优化. 公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{RE}_i = \frac{P_i - Q_i}{Q_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{RE}_i| \quad (3)$$

式中, RMSE 表示均方误差; RE<sub>i</sub> 表示第 i 个实测值的相对误差; MRE 表示平均相对误差; N 表示物理量实测总个数; P<sub>i</sub> 表示模拟值; Q<sub>i</sub> 表示实测值. 率

定结果标准主要通过 RMSE 和 MRE 表示, 表现为 RMSE 达到最小值, 而 MRE 趋近于 0.

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤水分参数率定与验证

利用 2015 年冬小麦整个生育期土壤剖面实测水分数据进行模型参数的率定, 以夏玉米剖面实测数

据进行模型的参数验证. 将实测的土壤饱和含水率、残留含水率、田间持水率、饱和导水率、水分特征曲线等土壤水力参数作为初始输入条件, 然后根据实测值与模拟值的比较分析, 相应地调整各土壤剖面水力参数的取值, 主要是饱和含水率、田间持水率、饱和导水率, 从而保证模型结果符合率定准则. 小区各层土壤水力参数实测值与调整值见表 2.

表 2 土壤水力参数实测值与率定后调整值

Table 2 Observed and simulated values of the soil hydraulic parameters

土壤深度/cm	饱和含水率/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$		田间持水率/ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$		饱和导水率/ $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	
	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
0 ~ 10	0.36	0.357	24.59	25.723	4.85	4.796
10 ~ 20	0.39	0.382	21.92	23.395	4.59	4.516
20 ~ 30	0.43	0.419	20.81	21.521	4.20	4.253
30 ~ 50	0.44	0.432	17.01	17.626	4.05	4.125
50 ~ 70	0.49	0.514	17.93	18.114	3.58	3.881
70 ~ 100	0.46	0.475	13.82	14.755	2.02	2.175

从图 2 冬小麦土壤剖面含水量模型率定实测值与模拟值的比较可以发现, 实测值与模拟值变化趋势一致. 其中, 土壤剖面表层土壤含水率受降水或灌溉影响明显, 而模拟结果都大致呈现出表层含水率较大的波动过程. 下层 70 cm 土壤含水率波动过程明显不如表层强烈, 底层 100 cm 土壤含水率较为稳定, 模拟结果体现了不同土层含水率的变化特征. 2015 年冬小麦在 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 70 和 70 ~ 100 cm 土层的含水量率定结果 RMSE 分别为 0.017、0.014、0.015、0.010、0.011

和  $0.004 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , MRE 分别为 8.81%、8.50%、6.43%、8.26%、6.42% 和 2.64%.

利用率定调整后的参数, 验证 2016 年夏玉米土壤含水量及硝酸盐分布. 夏玉米土壤含水量验证结果见图 3. 从中可以看出, 模拟值反映了实测值的变化过程且方差分析结果表明, 实测值与模拟值之间差异不显著, 对土壤剖面土壤含水量模拟效果可以接受. 2016 年夏玉米在 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 70 和 70 ~ 100 cm 土层的含水量验证结果 RMSE 分别为 0.031、0.022、0.020、

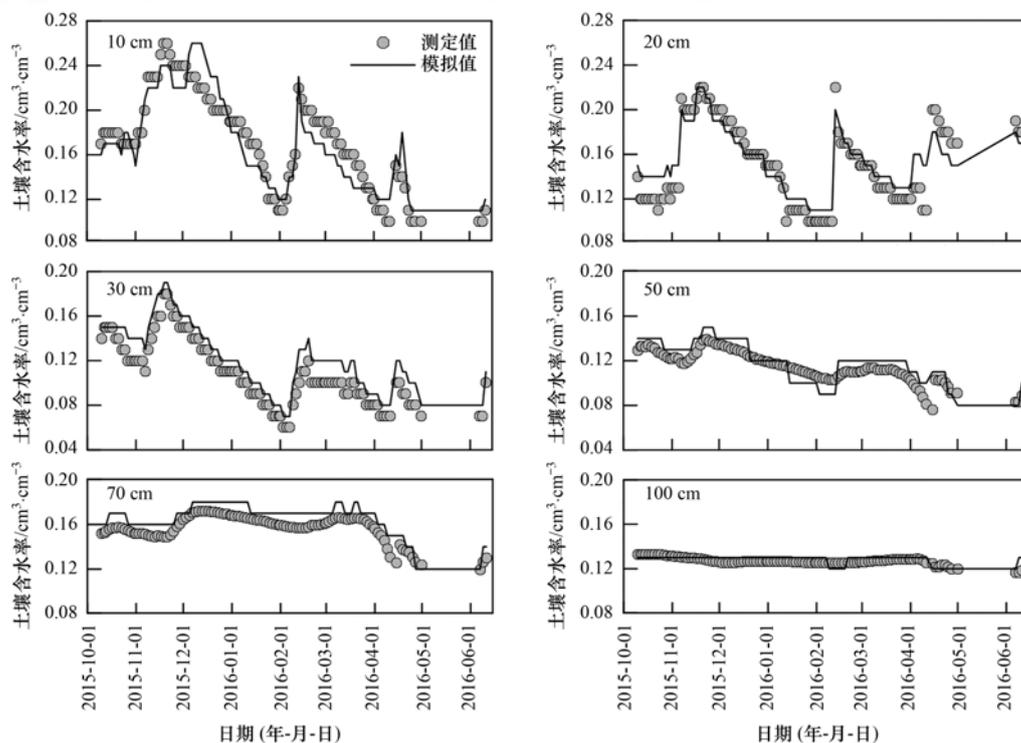


图 2 冬小麦土壤剖面含水量模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of the simulated and measured soil water contents in the winter-wheat season

0.025、0.019 和 0.013  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , MRE 分别为 7.3%、6.1%、5.6%、7.3%、4.9% 和 5.36%。方差分析结果表明,下部土层含水率实测值和模拟值能够较好地拟合,效果优于上部土层,这主要是由

于上层水分受到地表水分蒸散量与水分下渗相互作用的影响变化较大。但整体上实测值与模拟值之间差异不显著,模型水分模块可以较好地反映土壤实际含水率。

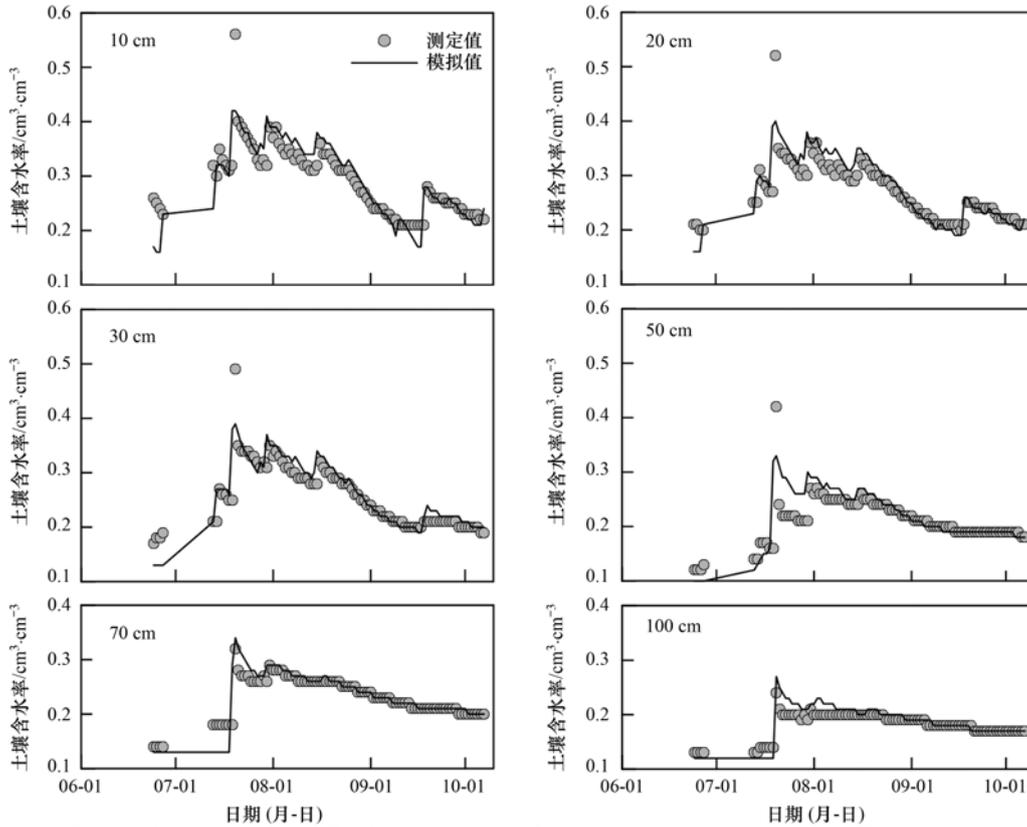


图3 夏玉米土壤剖面含水率模拟值与实测值对比(2016年)

Fig. 3 Comparison of the simulated and measured soil water contents in the summer-maize season (2016)

### 2.2 土壤硝态氮参数率定与验证

图4为2015年冬小麦不同生长期土壤硝态氮模拟值与实测值拟合结果。从图2中可以看出,模拟值均反映了硝态氮随小麦生长期的变化趋势,生长前期上层硝态氮含量低,下层高,收获前期体现出表层含量较高,下层土壤硝态氮含量逐步降低的特点,从时间上也大致体现出硝态氮先升高后降低的趋势。另外,总体上,下层土壤硝态氮模拟结果优于土壤表层,这也是由于上层土壤受施肥、灌

水、降雨等因素影响较大的原因。2015年冬小麦在0~10、10~20、20~30、30~50、50~70和70~100 cm土层不同时期的土壤硝态氮率定结果平均RMSE值分别为3.60、4.48、5.75、3.14、3.39和2.68  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , MRE平均值分别为8.9%、4.5%、2.2%、1.9%、3.5%和0.9%。

利用2016年夏玉米土壤硝态氮实测值对模型参数进行了验证。夏玉米土壤硝态氮模拟值与实测值变化趋势相似(图5),2016年夏玉米在0

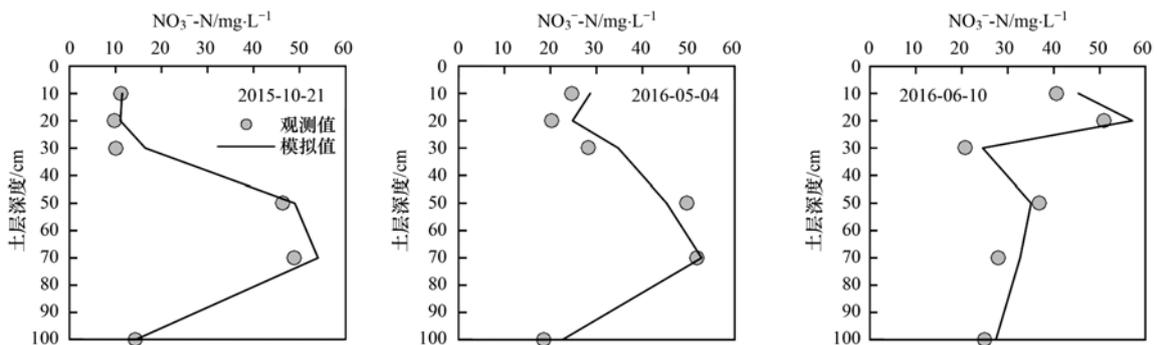


图4 2015年冬小麦土壤硝态氮率定

Fig. 4 Calibration of the soil nitrate nitrogen content in the winter-wheat season of 2015

~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 70 和 70 ~ 100 cm 土层不同时期的土壤硝态氮验证结果平均 RMSE 值分别为 5.64、5.75、6.54、6.59、1.77 和 4.47 mg·kg<sup>-1</sup>，MRE 平均值分别为 6.3%、2.6%、3.6%、3.3%、2.3% 和 0.8%。

且方差分析结果表明，实测值与模拟值之间差异不显著，对土壤剖面硝态氮含量模拟效果可以接受。统计分析结果表明，模型可以模拟不同氮肥施用量条件下土壤剖面硝态氮含量以及硝态氮淋滤量。

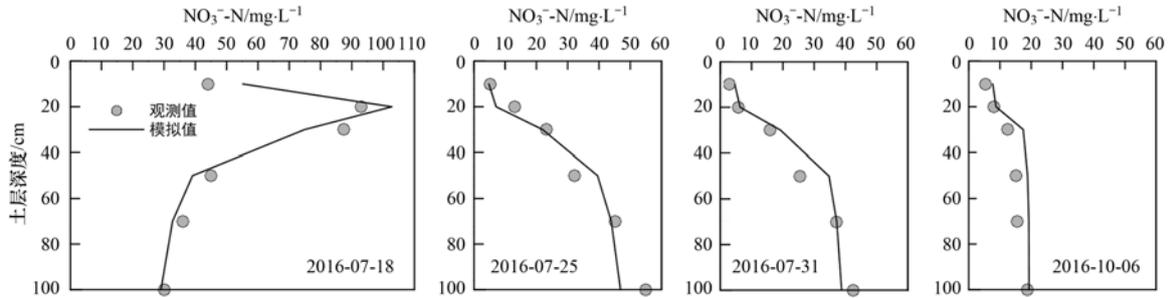


图 5 夏玉米土壤剖面硝态氮模拟值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of the simulated and measured soil nitrate contents in the summer-maize season

2.3 冬小麦-夏玉米轮作期内土壤剖面硝态氮变化

图 6 显示了 2015 年冬小麦生育期内土壤剖面硝态氮含量变化。小麦季 0 ~ 30 cm 土层内土壤硝态氮在生育期内存在显著变化，总体上 0 ~ 30 cm 土层硝态氮含量明显高于当季冬小麦初始硝态氮含量且该土层内出现硝态氮浓度峰值，其峰值大小随冬小麦生育期的推进而增加(即峰值随着氮肥的施入次数增加而增加)。冬小麦返青灌溉前(2016 年 4 月 16 日)30 cm 以下土层土壤硝态氮浓度与当季冬小麦初始值相近，说明小麦季返青前 30 cm 土层以下土壤硝态氮含量基本维持稳定状态。这表明冬小麦返青期之前降水、施氮肥和作物吸氮等主要影响 0 ~ 30 cm 土层内土壤硝态氮浓度，未影响到 30 cm

以下土层土壤硝态氮含量。冬小麦返青期进行灌溉施肥措施后，30 cm 以上土层土壤硝态氮含量会继续升高，而 30 cm 以下土壤硝态氮含量会急剧降低。研究发现土壤硝态氮的淋溶是随着土壤水分的排出而出现<sup>[29]</sup>，本研究中由于返青期灌溉水以及小麦后期(5 ~ 6 月)的几次降水入渗补给到 30 cm 以下土层(图 2)，因此 30 cm 以下土层部分土壤硝酸盐会随着降水的入渗而淋失进入地下水。

图 7 显示了 2016 年夏玉米生育期内土壤硝态氮剖面分布。从中可以看出夏玉米生育期内土壤硝态氮分布变化规律与冬小麦不同(图 6)，冬小麦生育期内 0 ~ 30 cm 土层土壤硝态氮发生变化，30 cm 以下在小麦返青期之前没有变化，小

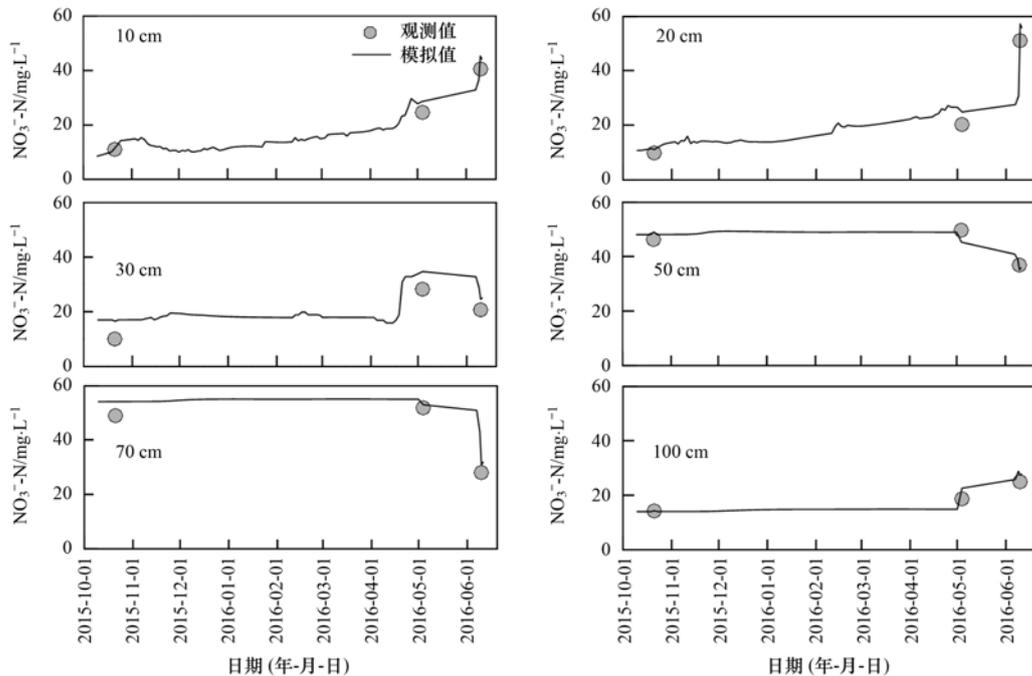


图 6 冬小麦生育期内土壤剖面硝态氮分布

Fig. 6 Concentrations of nitrate nitrogen in the soil profile in the winter wheat season

麦返青期后随着降雨量增加, 30 cm 以下有部分硝态氮淋滤出 100 cm 土层; 而夏玉米季 30 cm 以上土层和 30 cm 以下土层土壤硝态氮均显著变化, 30 cm 以上土层土壤硝态氮先随着施氮肥增加而增加, 而后由于大暴雨引起的淋滤而降低, 30 cm 以下土层土壤硝酸盐总体上在玉米季初期保持不变, 而后受上层硝态氮随降水淋滤作用而导致下层增加, 最后随着降水淋滤到地下水

而导致土壤硝态氮含量降低。

分别通过模型计算 2015 ~ 2016 年冬小麦和夏玉米季土壤硝态氮淋滤量, 本研究发现小麦季施氮量为  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 小麦季土壤硝态氮淋滤量仅为  $2.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 而玉米季土壤硝态氮淋滤量却达到了  $59.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 因此在太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮淋滤主要发生在玉米季(雨季), 小麦季硝态氮淋滤量较少。

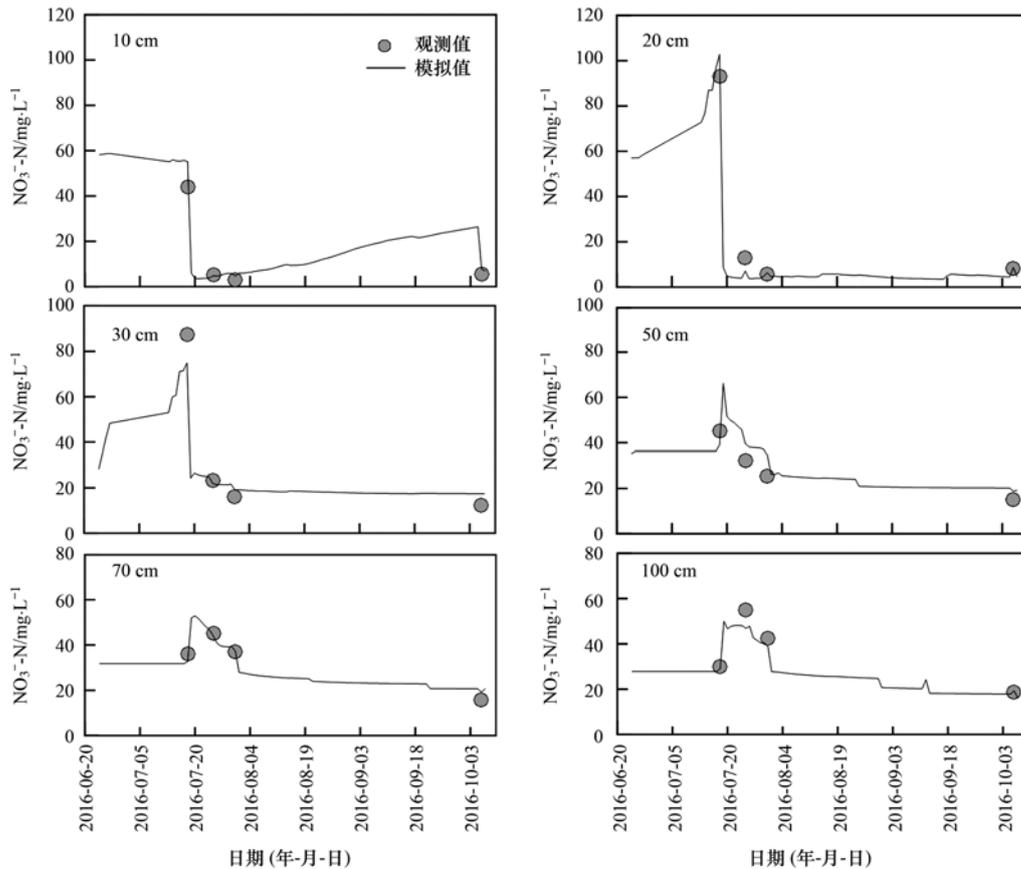


图 7 夏玉米生育期内土壤剖面硝态氮分布(2016 年)

Fig. 7 Concentrations of nitrate nitrogen in the soil profile in the summer maize season(2016)

#### 2.4 土壤硝态氮淋溶预测

对土壤剖面水分和硝态氮等参数率定和验证后, 利用 RZWQM 模型开展不同灌溉量或降水量、不同施氮量水平下土壤硝态氮淋滤的预测研究. 通过以上模拟发现, 2015 ~ 2016 冬小麦-夏玉米季土壤硝态氮淋滤主要发生在夏玉米季(雨季), 在冬小麦季淋滤量仅为  $2.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 所以本研究只模拟预测玉米季土壤硝态氮淋溶. 通过太行山低山丘陵区农田施氮量调查可知, 当地农田施氮量主要有 3 种情况: 全年不施肥 ( $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 当地冬小麦平均施氮量 ( $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 当地冬小麦较高施氮量 ( $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). 另外由于该区域农田灌溉较少, 仅在小麦种植前和返青期灌溉, 而玉米季无灌溉. 因此本研究只模拟不同施氮量和不同降水年型对土壤硝态氮淋溶量的影响. 通过模拟太行山区农田 3

种不同施氮和不同降水年型情景下土壤硝态氮淋溶量, 以期选择更加合理的山区农田施氮量. 轮作周期内全年施氮量分别为  $0$ 、 $300$  及  $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和不同降水年情景时, 玉米季土壤剖面 1 m 以下硝态氮淋溶预测结果见图 8.

可以看出, 2013(枯水年)、2015(平水年)和 2016(丰水年)年土壤剖面硝态氮淋滤量随施氮量的增加而增加. 2013 年不同施氮量处理土壤硝态氮淋滤量最低, 这是由于 2013 年全年降水量为  $382 \text{ mm}$ , 玉米生长期降水量为  $336 \text{ mm}$ , 均小于 2015 和 2016 年降水量, 同时也说明土壤硝态氮淋滤与降水量密切相关.

通过对土壤硝态氮淋滤的模拟表明, 玉米季土壤硝态氮淋滤量随施氮量下降而呈显著降低. 通过对比太行山低山丘陵区 3 种施氮水平, 当施氮量低

于  $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时可显著减少土壤硝态氮的淋溶损失, 而施氮量较高时其硝态氮淋滤量也显著增加, 尤其是在丰水年特别是受强降水的影响淋滤量增加更显著. 如模拟结果显示施氮量为  $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 在 2013 和 2015 年玉米季平均硝态氮淋滤量为  $63.35 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 但是在 2016 年夏玉米季发生强降水(7月19日 247 mm, 7月20日 256 mm) 导致其硝态氮淋滤量增加到了  $136.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , Asadi 等<sup>[30]</sup> 和夏梦洁等<sup>[31]</sup> 同样发现较强的降水导致较多的硝态氮淋滤量. 当轮作周期施氮量分别为  $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 2013(枯水年)、2015(平水年) 和 2016(丰水年) 年玉米季硝态氮淋溶量均值分别占轮作周期总施氮量的 13.20% ~ 19.63% 和 14.58% ~ 21.96%. 表现出玉米季硝态氮淋滤量较大, 而相对前茬小麦作物当季玉米施氮量却较低或者不施氮. 本研究发现虽然前茬小麦施氮量大于玉米季, 反而玉米季淋溶量较大. 这是因为华北太行山低山丘陵区降水主要集中在 6~9 月, 麦季土壤存留的大量硝态氮在玉米季随降水下渗和淋失.

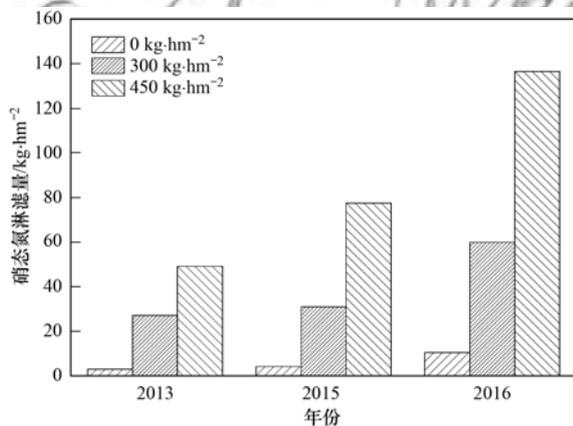


图 8 RZWQM 模拟不同降水年和不同施氮量条件下 1 m 以下土层硝态氮淋溶情况

Fig. 8 Predicted nitrate nitrogen leaching below 1 m in different nitrogen applications in 2013, 2015, and 2016 using RZWQM

由以上结果可见, 在太行山低山丘陵区应进一步降低施氮量和灌溉量, 可以减少土壤硝态氮的淋溶损失, 而 RZWQM 模型可以有效模拟作物氮素迁移和淋溶, 在实测数据参数验证基础上, 为太行山低山丘陵区合理有效控制硝态氮淋滤提供依据.

### 3 结论

针对太行山低山丘陵区农田氮淋失引起的地下水硝酸盐浓度上升问题, 本研究通过典型小麦-玉米轮作农田土壤水分、土壤硝态氮观测, 利用 RZWQM 模型模拟预测了不同施氮水平在不同降水年型下 1m 土壤剖面硝态氮淋失量. 取得的主要结

论有: 土壤硝态氮淋溶主要发生在夏玉米季(雨季), 土壤硝态氮淋失量与施氮量和降水量有显著关系, 平水年和枯水年在当地中等施氮水平下 ( $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 氮的淋失量无显著变化, 高施氮水平 ( $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 受降水的影响氮的淋失量显著升高; 受特大暴雨的影响, 使得土壤氮的淋失量呈非线性增长的趋势, 表明大降水事件不仅对地下水形成大量补给, 很大程度上也增加了累积在农田土壤中的硝态氮的淋溶损失, 增加了对区域地下水硝态氮潜在污染威胁.

### 参考文献:

- [1] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- [2] Peña-Haro S, Pulido-Velazquez M, Sahuquillo A. A hydro-economic modelling framework for optimal management of groundwater nitrate pollution from agriculture [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **373**(1-2): 193-203.
- [3] 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 等. 小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2411-2418.  
Ouyang W, Cai G Q, Huang H B, et al. Temporal-spatial distribution of agricultural diffuse nitrogen pollution and relationship with soil respiration and nitrification [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- [4] Li Y, Liu H J, Huang G H, et al. Nitrate nitrogen accumulation and leaching pattern at a winter wheat: summer maize cropping field in the North China Plain [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(2): 118.
- [5] 丁晓雯, 沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 4025-4032.  
Ding X W, Shen Z Y. Spatial distribution and pollution source identification of agricultural non-point source pollution in Fujiang watershed[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(11): 4025-4032.
- [6] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**(2-3): 117-127.
- [7] Li X X, Hu C S, Delgado J A, et al. Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in north China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, **89**(1-2): 137-147.
- [8] Mack U D, Feger K H, Gong Y S, et al. Soil water balance and nitrate leaching in winter wheat-summer maize double-cropping systems with different irrigation and N fertilization in the North China Plain [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, **168**(4): 454-460.
- [9] Wang Y Q, Zhou L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(9): L09707.
- [10] 曹建生, 刘昌明, 张万军, 等. 太行山区坡地水文地质特性与渗流集蓄技术研究[J]. *水科学进展*, 2005, **16**(2): 216-221.  
Cao J S, Liu C M, Zhang W J, et al. Slope hydrogeology and collecting seepage water techniques in gneiss area in the Taihang mountains [J]. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(2): 216-221.

- [11] 赵焕, 王仕琴, 孔晓乐, 等. 华北低山丘陵区潜龙河流域地下水水质特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, **43**(2): 17-24.  
Zhao H, Wang S Q, Kong X L, *et al.* A study of the water quality characteristics and factors in the Zhulong river basin in the hilly region of North China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, **43**(2): 17-24.
- [12] Dechmi F J, Burguete J, Skhiri A. SWAT application in intensive irrigation systems: Model modification, calibration and validation[J]. Journal of Hydrology, 2012, **470-471**: 227-238.
- [13] Lam Q D, Schmalz B, Fohrer N. Modelling point and diffuse source pollution of nitrate in a rural lowland catchment using the SWAT mode [J]. Agricultural Water Management, 2010, **97**(2): 317-325.
- [14] Knisel W G, Turtola E. Gleams model application on a heavy clay soil in Finland[J]. Agricultural Water Management, 2000, **43**(3): 285-309.
- [15] 王吉莘, 曹文志. 应用 GLEAMS 模型评估我国东南地区农业小流域硝态氮的渗漏淋失[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(1): 28-32.  
Wang J P, Cao W Z. Assessing nitrate leaching with GLEAMS model in an agricultural small catchment in Southeast China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, **23**(1): 28-32.
- [16] Farida D, Javier B, Ahmed S. SWAT application in intensive irrigation systems: model modification, calibration and validation [J]. Journal of Hydrology, 2012, **470-471**: 227-238.
- [17] 韩宁, 陈维梁, 高扬, 等. 基于 SWAT 与 DNDC 模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2317-2325.  
Han N, Chen W L, Gao Y, *et al.* Comparative study of SWAT and DNDC applied to N leach and export from subtropical watershed[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2317-2325.
- [18] 李发东, 宋帅, 蔡文静, 等. 陆地生态系统水体中硝酸盐行为过程模拟原理、进展及存在问题[J]. 南水北调与水利科技, 2013, **11**(2): 86-93.  
Li F D, Song S, Cai W J, *et al.* Review of process-based models of nitrate fate and their developments and limitations in terrestrial ecosystems [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, **11**(2): 86-93.
- [19] Han J G, Li Z B, Li P, *et al.* Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed[J]. Agricultural Water Management, 2010, **97**(5): 757-762.
- [20] Cameira M R, Fernando R M, Ahuja L R, *et al.* Using RZWQM to simulate the fate of nitrogen in field soil-crop environment in the Mediterranean region [J]. Agricultural Water Management, 2007, **90**(1-2): 121-136.
- [21] Hu C, Saseendran S A, Green T R, *et al.* Evaluating nitrogen and water management in a double-cropping system using RZWQM[J]. Vadose Zone Journal, 2006, **5**(1): 493-505.
- [22] 肖登攀, 韩淑敏, 杨艳敏, 等. 太行山低山丘陵区不同地表类型降雨入渗产流规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, **16**(5): 35-39.  
Xiao D P, Han S M, Yang Y M, *et al.* Study on rainfall-infiltration-runoff under typical ground surfaces conditions in the hilly regions of Taihang mountain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, **16**(5): 35-39.
- [23] Wang H J, Sun J Q, Chen H P, *et al.* Extreme climate in China: facts, simulation and projection [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2012, **21**(3): 279-304.
- [24] Zhang D B, Yao P W, Na Z, *et al.* Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach [J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 26856.
- [25] Fang Q X, Malone R W, Ma L, *et al.* Modeling the effects of controlled drainage, N rate and weather on nitrate loss to subsurface drainage[J]. Agricultural Water Management, 2012, **103**: 150-161.
- [26] Li Y, White R, Chen D L, *et al.* A spatially referenced water and nitrogen management model (WNMM) for (irrigated) intensive cropping systems in the North China Plain [J]. Ecological Modelling, 2007, **203**(3-4): 395-423.
- [27] 房全孝. 根系水质模型中土壤与作物参数优化及其不确定性评价[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(10): 118-123.  
Fang Q X. Optimizing and uncertainty evaluation of soil and crop parameters in root zone water quality model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(10): 118-123.
- [28] Constantin J, Beaudoin N, Launay M, *et al.* Long-term nitrogen dynamics in various catch crop scenarios: test and simulations with STICS model in a temperate climate [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **147**: 36-46.
- [29] Perego A, Basile A, Bonfante A, *et al.* Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy) [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, **147**: 57-65.
- [30] Asadi M E, Clemente R S, Gupta A D, *et al.* Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in an acid - sulphate soil in Thailand [J]. Agricultural Water Management, 2002, **52**(3): 197-213.
- [31] 夏梦洁, 马乐乐, 师倩云, 等. 黄土高原旱地夏季休闲期土壤硝态氮淋溶与降水年型间的关系 [J]. 中国农业科学, 2018, **51**(8): 1537-1546.  
Xia M J, Ma L L, Shi Q Y, *et al.* The relationship of  $\text{NO}_3^-$ -N leaching and rainfall types during summer fallow in the Loess Plateau dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, **51**(8): 1537-1546.

## CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area .....	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Xi'an .....	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During Winter in Taiyuan .....	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou .....	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in a Suburb of Zhuhai City .....	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean .....	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM <sub>2.5</sub> in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism .....	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei .....	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017 .....	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region .....	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions .....	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station .....	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing .....	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM <sub>2.5</sub> Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City .....	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization .....	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators .....	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days .....	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days .....	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting .....	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO <sub>2</sub> Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities .....	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing .....	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay .....	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay .....	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring .....	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis .....	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin .....	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model .....	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs .....	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn .....	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers .....	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis .....	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water .....	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution .....	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake .....	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide .....	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals .....	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles .....	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater .....	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor .....	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test .....	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System .....	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System .....	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics .....	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process .....	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions .....	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature .....	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China .....	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou .....	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River .....	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH <sub>4</sub> Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia .....	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application .....	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China .....	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region .....	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land .....	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry .....	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)