

三峡库区氮素收支估算及环境影响

潘星睿 张帅 王浩铮 张六一* 李廷真*

重庆三峡学院 三峡库区水环境演变与污染防治重庆市重点实验室

DOI:10.12238/eep.v8i2.2508

[摘要] 本研究基于2021年三峡流域化肥用量、人口数量及工业排放等数据,估算了氮素输入、输出及盈余量,并预测了氮减排情景的影响。研究结果显示,三峡流域氮素输入总量为196.12万t,主要来源为化肥施用(40.2%)和工业排放(18.9%)。农业活动(化肥、生物固氮、秸秆返田)占总氮输入的50%。氮素输出总量为171.70万t,主要输出方式为水体流失(20.5%)和禽畜产品(27.6%)。流域氮素总体表现为盈余,盈余总量为24.42万t,可能导致土壤酸化、水体富营养化等环境问题。通过不同情景预测,若不采取干预措施(BAU情景),2035年氮素盈余将达至29.46万t。而在化肥减量(FR)和综合政策(S2+S3+S4)情景下,氮素盈余将显著减少,最终在2035年达到相对平衡状态。研究表明,化肥减量是最有效的管理措施,综合政策对控制氮素污染效果显著。研究建议进一步加强化肥减量、节能减排等措施,以实现氮素收支平衡,改善生态环境和促进农业可持续发展。

[关键词] 三峡库区; 氮污染; 氮素盈余; 情景预测

中图分类号: TV697.4+4 **文献标识码:** A

Estimation of Nitrogen Balance in Three Gorges Reservoir Area and Environmental Impacts

Xingrui Pan Shuai Zhang Haozheng Wang Liuyi Zhang* Tingzhen Li*

Chongqing Key Laboratory of Water Environment Evolution and Pollution Prevention and Control in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Three Gorges University

[Abstract] This study estimated nitrogen(N) inputs, outputs, and surpluses and predicted the impacts of N reduction scenarios based on data on fertilizer use, population size, and industrial emissions in the Three Gorges Area(TGRA) in 2021. The results show that the total N input to the Three Gorges Area is 196.12×10^4 t, with the main sources being fertilizer application (40.2%) and industrial emissions (18.9%). Agricultural activities (fertilizer, biological N fixation, straw return to the field) accounted for 50% of the total N input. The total N output was 1,717,000 t, with the main export modes being water loss (20.5%) and livestock products (27.6%). The overall performance of N in the watershed is a surplus, with a total surplus of 24.42×10^4 t, which may lead to environmental problems such as soil acidification and eutrophication of water bodies. The different scenarios predicted that without intervention (BAU scenario), the N surplus would reach 294,600 t in 2035, while under the scenarios of Fertilizer Reduction (FR) and Comprehensive Policies (S2+S3+S4), the N surplus would be significantly reduced, and ultimately reach a relative equilibrium state in 2035. The study shows that fertilizer reduction is the most effective management measure and the integrated policy is effective in controlling N pollution. The study recommends further strengthening measures such as fertilizer reduction, energy conservation and emission reduction to achieve N balance and improve ecological environment and sustainable agricultural development.

[Key words] three gorges reservoir area; nitrogen pollution; nitrogen budget; scenario prediction

引言

氮是生态系统中不可或缺的元素,是植物营养的重要成分,集约、高产的农业生产活动很大程度依赖于氮肥的使用^[1]。人类活动显著影响了全球氮循环^[2]。随着人口的增长和人类社会

的进步,氮素已成为提高粮食产量、养殖家禽家畜以及改善生活条件的重要原料。同时,氮素也是影响水体和陆地生态系统净初级生产力的关键物质^[3]。过度施肥、化石燃料燃烧等人类活动也加剧了流域中氮素的积累^[4],人类活动对生态环境系统中氮

素循环有显著影响^[5]。

20世纪70年代以来,由于城市化进程加快、人口增长、工业化程度提高、化石燃料燃烧增加以及化肥的大量使用,长江流域氮素输入量显著增加^[6]。三峡流域涵盖了长江上游地区,是中国最大的水文系统之一。氮的输入主要来自农业化肥、工业和交通排放^[7]。流域氮素可通过农田径流、工业排放、大气沉降等进入水体,过多的氮输入会导致水质污染和生态系统破坏。三峡水库蓄水和移民安置工作对本来就脆弱的山区农业生态系统造成了不平衡的威胁,同时也改变了氮循环的初始特征^[8]。

研究和量化一个区域尺度氮素收支,对于该地区的氮素评估和管理尤为重要。郭劲松等^[9]计算了三峡库区忠县石宝镇新政坡耕地小流域氮素盈余,林杉等^[10]分析了三峡库区秭归县张家冲小流域不同农户农田氮素循环。Wang等^[11]研究了整个三峡库区人为氮素净输入,输入量为 $12399.35\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。因此,本研究以整个三峡库区流域为研究对象,估算了区域氮素输入、氮素输出和盈余。再参考“中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划”和“2035年远景目标”氮素减排情景,预测不同氮素管理措施下区域的氮素收支。本研究可为三峡流域氮素管理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

文中数据选用2021年三峡流域20个行政区统计年鉴,主要有《重庆市统计年鉴》、《宜昌统计年鉴》、《重庆数据》、《长江三峡工程生态与环境监测公报》、《2021年重庆市生态环境统计公报》、各行政区统计年鉴、重庆市生态环境检测中心网站等。

1.2 氮素输入计算方法

1.2.1 化肥施用氮

基于2021年统计年鉴各行政区化肥种类统计氮折纯量,得到化肥施用氮量。

1.2.2 大气氮沉降

三峡库区大气氮沉降数据来自参考文献,为 $19.3\text{kgNha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ ^[12]。

1.2.3 生物固氮

利用作物(大豆和花生)收获面积以及旱地和水田面积乘以其固氮参数得到生物固氮量。本文大豆和花生固氮参数^[13]分别取 $105\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $115\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;旱地和水田固氮参数^[14]分别取 $15\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $45\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

1.2.4 食品饲料消费氮

区域人均氮消费量为 $3.65\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$ 。禽畜消耗饲料量为在饲养中所摄入的氮含量,牛、猪、羊、家禽饲料消耗氮摄入量分别每头每年为51.3、8.7、5.97、0.21 kg ^[15,16]。

1.2.5 秸秆返田氮

将秸秆/种子率、秸秆返回到土壤的比例、单位质量秸秆中的含氮量^[17]、作物年产量四者相乘得到秸秆返田氮量^[18]。

1.2.6 人畜排泄氮

文献显示^[19,20],猪、牛、羊和家禽的排泄含氮量分别为每头每年8 kg 、42 kg 、7 kg 和0.3 kg 。每年人均排泄物含氮量为4 kg 。

通过人畜排泄含氮量乘以人畜的数量即可得到人畜排泄氮输入量。

1.2.7 工业排放氮

三峡库区工业污水中氨氮排放量来自《重庆生态环境统计公报》和《湖北省生态环境统计公报》,以100%排入水体进行估计^[21]。

1.3 氮素输出计算方法

1.3.1 水体流失氮

水体流失氮为化肥、生物固氮和工业排泄氮总和的30%,再加上通过水体损失的人类排泄氮^[19];通过排入水体废弃物的单位损失量(约为3.3 $\text{kg}/\text{人}/\text{年}$)来计算水体损失的人类排泄氮^[22]。

1.3.2 氨气挥发氮

本文采用IPCC^[23]推荐的默认值(20%)来计算人畜粪便的氨挥发流失氮量;采用化肥的氨挥发因子(0.22 kgN/kgN)和碳酸氢铵的氨挥发因子(0.28 kgN/kgN)^[17,19],来计算氮肥的挥发量。

1.3.3 农作物收获氮

由于不同种类作物摄取的氮量不同,将作物产量乘以单位产量的氮的摄取量,即可得到每种作物收获氮量^[24,25]。

1.3.4 反硝化脱氮

根据中国主要流域农田硝化和反硝化研究结论,采用进入三峡流域中的化肥氮量乘以24%计算获得,24%为氮素反硝化损失转化系数^[19]。

1.3.5 禽畜产品输出氮

参考中国食物成分含氮量,通过禽畜产品产量乘以其含氮量来计算禽畜产品输出氮。

1.3.6 生活垃圾输出氮

长江流域居民的生活垃圾排放量为2.7 $\text{kg}/\text{月}$,含氮量为2.39%^[26]。通过人口数量乘以人均生活垃圾产氮量来计算生活垃圾输出氮。

1.3.7 生物质燃烧

秸秆燃烧氮的排放系数来自研究^[27],其中油菜、大豆作为农用燃烧,稻谷、小麦、玉米则直接在农田中燃烧。

1.4 情景预测

在“十四五”规划和2035年远景目标背景下,本研究以2035年为节点,模拟了六种不同管理措施下三峡库区氮素的输入、输出及盈余情况。情景一(BAU)假设2035年化肥使用、工业排放及食物饲料消耗方式与2021年相同,人口年均增长0.03%;情景二(FR)在《2025年化肥减量化行动方案》下,化肥用量年均减少2.3%;情景三(EER)根据《“十四五”节能减排综合工作方案》,到2025年氨氮排放总量比2020年下降8%;情景四(RND)假设大气氮沉降维持在临界负荷范围内^[28];情景五为情景二与情景三的结合;情景六为情景二、情景三与情景四的结合。无环境管理政策时,重庆人口年均增加26.80万人,年均增速0.9%。根据《重庆市农业经济作物发展“十四五”规划》农产品年均增长4.32%。根据《重庆市畜牧业发展“十四五”规划》肉类、禽蛋、牛奶、

猪、牛、羊、家禽年均增长率分别为2.78%、1.88%、11.25%、5.1%、1.62%、2.23%、6.08%。根据《重庆市农业面源污染防治工作情况报告》得知化肥使用量年均下降率为1.62%。研究指出^[29]三峡库区工业排放年均减少15.1%，生活污水增长5.6%。文献显示^[30]大气氮沉降每年平均增长为0.41kg ha^{-1} ，预测2035年大气氮沉降数值。

1.5结果与讨论

表1 2021年氮输入和输出估算

输入	总量($\times 10^4$ t)	通量(kg hm^{-2})
化肥施用	78.83	137.48
工业排放	37.16	64.81
大气沉降	15.81	27.57
食品饲料消耗	22.07	38.49
人畜排泄	27.02	47.13
生物固氮	13.90	24.25
秸秆返田氮	1.30	2.13
合计	196.12	342.03
输出		
畜牧产品	47.36	82.60
水体流失	35.21	61.42
氨气挥发	25.11	43.80
农产品	22.91	39.96
反硝化	18.92	33.00
生物质燃烧	17.63	30.75
生活垃圾输出	4.53	7.91
合计	171.70	299.44
氮收支	24.42	42.59

1.5.1氮素输入

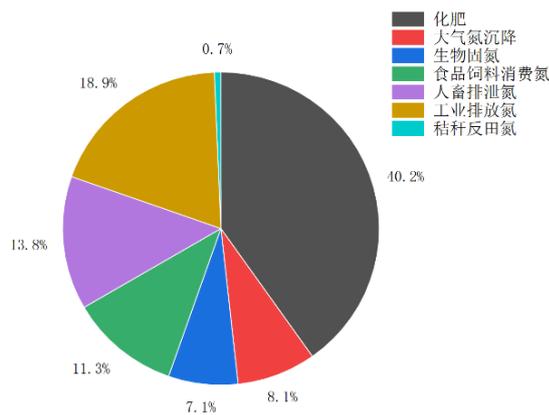


图1 氮素输入源百分比

三峡流域主要的氮素输入为化肥施用和工业排放。流域氮素输入总量为196.12 $\times 10^4$ t，输入通量为342.03kg ha^{-1} （如图1所示）。输入源的贡献依次为化肥施用（40.2%）、工业排放（18.9%）、人畜排泄（13.8%）、食品/饲料消费（11.3%）、大气沉降（8.1%）、生物固氮（7.1%）、秸秆返田（0.7%）（如图1所示）。三

峡流域化肥施用氮量为78.83万t。库区生态脆弱，60%以上耕地为坡耕地，中低产田占70%以上，人均耕地仅0.06hm²（万州不足0.03hm²），多数依赖化肥等外部投入。农业活动（化肥、生物固氮、秸秆返田）输入94.03万t，约占总氮输入的50%。人畜排泄氮量为47.13kg $Nha^{-1}a^{-1}$ ，是全国（19kg $Nha^{-1}a^{-1}$ ）的约2.5倍^[19]。库区工业废水占全市的68%，工业源和生活源占排放总量的81%。大气氮沉降占8.1%，主要来自化石燃料燃烧和城市交通排放^[31]。

1.5.2氮素输出

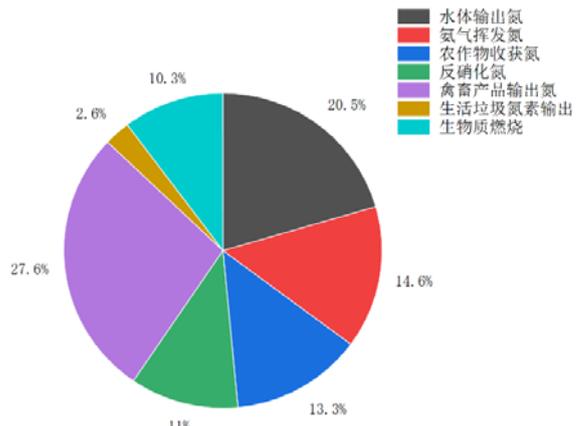


图2 氮素输出方式百分比

三峡流域氮素输出总量为171.70万t，输出通量为299.44kg $ha^{-1}a^{-1}$ （如表1所示），氮输出贡献从高到低分别为禽畜产品（27.6%）、水体流失（20.5%）、氨气挥发（14.6%）、农作物收获（13.3%）、反硝化（11%）、生物质燃烧（10.3%）和生活垃圾输出（2.6%）（如图2所示）。禽畜产品和农作物产品输出氮占输出总量是主要输出方式。三峡库区耕地保有量高于147.13 $\times 10^4$ hm²^[32]，牧业占农业总产值的25.51%，农牧业为主导的产业模式导致农作物和禽畜产品输出较高。氨气挥发占14.6%，高化肥使用量和禽畜业发展增加了氨气挥发风险，未安全处理的850万吨有机废弃物进一步加剧了这一问题。水体氮素流失占20.5%，年均降雨量1000-1300mm^[33]亚热带气候使降雨径流携带NO₃⁻-N和NH₄⁺-N，湿热天气尤其是夏季为反硝化提供了有利条件，促进了氮素挥发。此外，秸秆燃烧等生物质燃烧也是氮素排放的重要原因。

1.5.3氮素收支

三峡库区氮素总体表现为盈余，盈余总量为24.42万t，盈余通量为42.59kg $ha^{-1}a^{-1}$ 。氮素盈余在土壤中将转化成环境污染^[34]，导致流域土壤酸化、水体富营养化、空气污染等。本研究氮素盈余低于九龙江流域^[35]（约52.7kg $ha^{-1}a^{-1}$ ）、珠三角地区^[36]（约51.92kg $ha^{-1}a^{-1}$ ）、开普敦Zeekoevlei流域^[37]（47kg $ha^{-1}a^{-1}$ ），高于意大利Po Valley流域^[38]（处于氮素平衡）。

1.5.4不同情景下氮素收支预测

在BAU情景下，2035年三峡流域氮素输入总量为238.16万t，输出总量为208.7万t，盈余总量为29.46万t。若不加以干预，氮素盈余将随人口、工业排放及农牧产品增加而持续上升。在FR

情景下, 氮素输入总量为221.52万t, 输出总量为209.93万t, 盈余总量为11.59万t, 较BAU减少17.87万t, 表明化肥减量是最有效的管理措施。在EER情景下, 氮素盈余为27.88万t, 略低于BAU; RND情景下, 盈余为19.45万t。在S2+S3情景下, 2035年氮素盈余降至7.55万t, 通量为 $13.15\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 。在综合政策(S2+S3+S4)情景下, 氮素将在2035年前达到相对平衡状态, 表明综合措施对控制氮素污染效果显著。

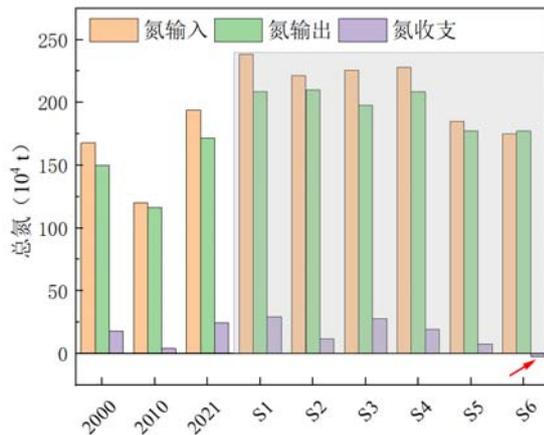


图3 2021年和不同情景下2035年氮素收支情况

在情景六控制条件下, 氮素盈余将在2034年达到平衡。到2035年, 氮素输入将减少63.36万t, 输出减少31.44万t, 国家政策推动下, 氮输入量下降主要得益于化肥使用量的减少。当前三峡流域化肥用量逐年降低, 若进一步加强减量措施, 将加速氮素排放的下降。到2035年, 化肥仍然是区域氮输入的最主要贡献者。虽然三峡流域化肥的使用量逐渐减少, 但是这种减少的趋势并无显著效果。三峡流域仍然将面临着氮素的过剩问题。根据以上情景预测, 随着国家化肥减量、节能减排等措施的实施, 预计到2035年, 氮素盈余将显著减少, 最终实现氮素收支平衡, 对生态环境和农业发展极为有利(如图3所示)。

2 结束语

三峡流域氮素输入总量为196.12万t, 输入通量为 $342.02\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 主要来源为化肥氮(35.7%)和工业排放氮(24%)。氮素输出总量为171.70万t, 输出通量为 $299.44\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 主要输出方式为农牧产品(40.9%)及水体输出(20.5%)。区域氮盈余量为24.42万t, 单位面积盈余量为 $42.59\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 表明氮素污染较为严重。在无环境管理措施下, 2035年氮素盈余将加剧。综合实施化肥减量、节能减排和降低大气氮沉降是最佳减排措施, 预计2034年可实现氮素平衡。

[参考文献]

- [1] TILMAN D, CASSMAN K G, MATSON P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices [J]. *Nature*, 2002, 418(6898): 671–7.
- [2] SOCOLOW R. Fitting on the Earth: Challenges of Carbon and Nitrogen Cycle to Preserve the Habitability of the Planet

[J]. *Engineering*, 2016, 2(1): 21–2.

[3] GU B, CHANG J, MIN Y, et al. The role of industrial nitrogen in the global nitrogen biogeochemical cycle [J]. *Sci Rep*, 2013, 3: 2579.

[4] HALE R L, GRIMM N B, VÖRÖSMARTY C J, et al. Nitrogen and phosphorus fluxes from watersheds of the northeast US from 1930 to 2000: Role of anthropogenic nutrient inputs, infrastructure, and runoff [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(3): 341–56.

[5] CHEN D, HUANG H, HU M, et al. Influence of lag effect, soil release, and climate change on watershed anthropogenic nitrogen inputs and riverine export dynamics [J]. *Environmental science & technology*, 2014, 48(10): 5683–90.

[6] LIU K-K, YAN W, LEE H-J, et al. Impacts of increasing dissolved inorganic nitrogen discharged from Changjiang on primary production and seafloor oxygen demand in the East China Sea from 1970 to 2002 [J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 141: 200–17.

[7] SU Y, CHANG H, XIE M, et al. Urban Ecological Risk Analysis Based on Anthropogenic Nitrogen Inputs in Shenzhen (2000–2014) [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 5.

[8] LIU S M, ZHANG J, CHEN H, et al. Nutrients in the Changjiang and its tributaries [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 62(1): 1–18.

[9] GUO J, 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*, 2011, 34(11): 141–7.

[10] LIN S, FENG M, HU R, et al. Characteristics of Nitrogen Cycling in Farm Systems in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 632–8.

[11] WANG Z, WANG Y, DING X, et al. Evaluation of net anthropogenic nitrogen inputs in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 139.

[12] WANG J. Characterization of atmospheric nitrogen deposition and source analysis in typical functional areas of Wanzhou section of the Three Gorges reservoir area [D]. Chongqing Three Gorges University, 2023.

[13] YAN W, YIN C, ZHANG S. Nutrient budgets and biogeochemistry in an experimental agricultural watershed in Southeastern China [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 45: 1–19.

[14] ZHU Z. Nitrogen balance and cycling in agroecosystems of China [J]. *Nitrogen in soils of China*, 1997: 323–38.

[15] HAN Y, FAN Y, YANG P, et al. Net anthropogenic nitrogen inputs (NANI) index application in Mainland China [J]. *Geoderma*,

2014,213:87-94.

[16]BOYER E W,GOODALE C L,JAWORSKI N A,et al.Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern USA [J]. Biogeochemistry, 2002, 57: 137-69.

[17]XING G, YAN X. Direct nitrous oxide emissions from agricultural fields in China estimated by the revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gases[J].Environmental Science & Policy,1999,2(3):355-61.

[18]赵中华,邱祖民.桃江流域农业区氮平衡及时空差异性[J].水电能源科学,2012,30(5):83-6.

[19]XING G, ZHU Z.Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds[J].Biogeochemistry,2002,57/58:405-7.

[20]XING G X, YAN X Y. Direct nitrous oxide emissions from agricultural fields in China estimated by the revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gases[J].Environmental Science & Policy,1999,2(3):355-61.

[21]CHEN F, JIA G. Nitrogen Budgets of the Beijiang River Basin[J].TROPICAL GEOGRAPHY,2009,29(1):11-5.

[22]HONG B,SWANEY D P,HOWARTH R W.A toolbox for calculating net anthropogenic nitrogen inputs (NANI)[J].Environmental Modelling & Software,2011,26(5):623-33.

[23]HUANG Y,LIN S,JIANG G,et al.Characteristics of Nitrogen and carbon contents in plants and soils in the HaiHe river basin[J].Acta Ecologica sinica,1994,14(3):225-34.

[24]肖新成,谢德体,何丙辉.基于农业面源污染控制的三峡库区种植业结构优化[J].农业工程学报,2014,30(20):219-27.

[25]丁雪坤,王云琦,韩玉国.三峡库区人类活动净氮输入量估算及其影响因素[J].中国环境科学,2020,40(1):206-16.

[26]ZHENG Y, WANG X, YIN J, et al. Feature of rural solid waste from various types villages in sources water protection area[J].Journal of Agro-Environment Science,2008,27(4): 1-5.

[27]ANDREAE M,MERLET P.Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J].Global biogeochemical cycles,2001, 15(4):955-66.

[28]HUANG J-W,LIU L, YAN X-Y, et al. Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China [J].Huan Jing ke Xue=Huanjing Kexue,2023,44(6):3321-8.

[29]LI Y, HUANG S, QU X. Water pollution prediction in the

three gorges reservoir area and countermeasures for sustainable development of the water environment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2017,14 (11):1307.

[30]LIU X,ZHANG Y,HAN W,et al.Enhanced nitrogen deposition over China [J].Nature,2013,494(7438):459-62.

[31]ZHANG L,WANG J,WANG S, et al. Chemical characteristics of long-term acid rain and its impact on lake water chemistry: A case study in Southwest China [J]. Journal of Environmental Sciences,2024,138:121-31.

[32]XIAO X, XIE D, HE B. Planting structure optimization based on agricultural non-point source pollution control in Three Gorges Reservoir Region [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(20):219-27.

[33]ZHANG T,GUI S,YANG R,et al.Assessment of Precipitation in the Three Gorges Reservoir Area with TRMM and CMORPH Satellite Data[J].Meteorological Monthly,2020,46(8):1098-112.

[34]MAMO M, GUPTA S, ROSEN C, et al. Phosphorus leaching at cold temperatures as affected by wastewater application and soil phosphorus levels[J].Journal of environmental quality,2005,34(4):1243-50.

[35]CHEN N,HONG H,ZHANG L.Preliminary results concerning the spatio-temporal pattern and mechanism of nitrogen sources and exports in the Jiu long River watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2009,29(4):830-9.

[36]XIE L, CHEN J. Nitrogen Budgets of the Pearl River Delta and Its Regional Differences during the Past Decade [J]. Journal of Natural Resources,2014,29(2):237-48.

[37]ATKINS J F,ANDERSON P M,BOULAND C.The nitrogen budget of an urban watershed: Zeekoevlei, Cape Town [J]. Landscape and Urban Planning,2022,227:104540.

[38]VENTURA M, SCANDELLARI F, VENTURA F, et al. Nitrogen balance and losses through drainage waters in an agricultural watershed of the Po Valley (Italy)[J].European Journal of Agronomy,2008,29(2-3):108-15.

作者简介:

潘星睿(1999--),男,汉族,四川达州人,硕士研究生,主要研究方向为环境生态氮循环。