

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估

黄静文^{1,2}, 刘磊³, 颜晓元^{1,2}, 遆超普^{1,2*}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 过量的氮沉降引起了一系列环境问题并导致生物多样性损失, 因此评估当前生态系统氮沉降临界负荷对区域氮管理及其污染控制至关重要. 利用稳态质量平衡法估算了当前我国自然生态系统的氮沉降临界负荷, 并与氮沉降数据对比, 获取了我国超过氮沉降临界负荷的生态系统空间分布情况. 结果表明, 6% 的地区氮沉降临界负荷大于 $56 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 67% 的地区氮沉降临界负荷在 $14 \sim 56 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 之间, 27% 的地区氮沉降临界负荷小于 $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 氮沉降临界负荷较高的区域主要分布在青藏高原东部、内蒙古东北部和南部部分地区. 氮沉降临界负荷较低的区域主要分布在青藏高原西部、西北地区和东南部分地区. 氮沉降超过临界负荷的区域约占我国的 21%, 主要分布在东南和东北部分地区. 东北、西北和青藏高原地区超临界负荷值普遍低于 $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 因此, 未来这些超过氮沉降临界负荷地区的氮素管理和控制更为值得关注.

关键词: 氮沉降; 临界负荷; 超临界负荷; 盐基阳离子沉降量; 稳态质量平衡法

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3321-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206236

Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China

HUANG Jing-wen^{1,2}, LIU Lei³, YAN Xiao-yuan^{1,2}, TI Chao-pu^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Excessive nitrogen (N) deposition causes a series of environmental problems, including biodiversity loss. Therefore, assessing current N deposition thresholds of natural ecosystems is critical for regional N management and pollution control. In this study, the critical loads of N deposition in mainland China were estimated using the steady-state mass balance method, and the spatial distribution of ecosystems that exceeded the critical load was evaluated. The results showed that areas with critical loads of N deposition higher than 56, in the range of 14–56, and lower than $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ accounted for 6%, 67%, and 27% of that in China, respectively. The areas with higher critical loads of N deposition were mainly distributed in the eastern Tibetan Plateau, northeastern Inner Mongolia, and parts of south China. Lower critical loads of N deposition were mainly distributed in the western Tibetan Plateau, northwest China, and parts of southeast China. Moreover, the areas where N deposition exceeded the critical loads accounted for 21% of that in mainland China, being mainly distributed in southeast and northeast China. The exceedances of critical loads of N deposition in northeast China, northwest China, and the Qinghai-Tibet Plateau were generally lower than $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. Therefore, the management and control of N in these areas that exceeded the critical load of deposition is more worthy of future attention.

Key words: nitrogen deposition; critical load; exceedances of critical load; base cations deposition; steady-state mass balance method

工业革命以来, 剧烈的人为活动产生了大量的活性氮, 改变了区域和全球尺度氮的供应与循环^[1]. 尤其是大量含氮化合物排放到大气中, 经过一系列的物理化学转化迁移过程之后会重新以干湿沉降的方式返回到陆地和水体, 引起生态系统生产力降低、土壤酸化、地表水富营养化、地下水硝酸盐增加、生物多样性损失和土壤及沿海水域 N_2O 排放增加等一系列环境问题, 并进一步危害人体和生态系统健康, 造成巨大的经济损失^[2–5]. 我国是世界上氮沉降量最大的国家, 约占全球氮沉降总量的近 20%^[6]. 尽管近年来随着“大气污染防治行动计划”、“化肥农药使用量零增长行动”和“打赢蓝天保卫战三年行动计划”等行动计划的推行与实施, 大气氮沉降量有所降低, 如 2016 ~ 2018 年间我国总氮沉降与 1996 ~ 2000 年间相比下降了 45%^[7], 但如何更好地管理和控制氮沉降, 降低其环境污染, 仍需进一步综合评价当前氮沉降对生态系统的影响.

目前通常利用临界负荷来衡量氮沉降对生态系统影响的差异. 根据 Nilsson^[8] 的研究, 临界负荷被定义为不会引起对最敏感的生态系统造成长期有害影响的化学变化的最高负荷. 早在 20 世纪 80 年代欧美国家就利用临界负荷对硫沉降和氮沉降进行了控制和减排, 并为《远距离越境空气污染公约》各缔约国提供科学的评估和减排方案^[9]. 随后, 我国也利用临界负荷的方法来评价酸沉降或氮沉降对生态系统的影响. 叶雪梅等^[10] 和谢绍东等^[11] 利用动态模型 MAGIC 分别计算了我国不同地区的酸沉降临界负荷; Liu 等^[12] 首次总结了我国部分森林和草地的经验临界负荷; 段雷^[13] 在系统研究土壤

收稿日期: 2022-06-21; 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(42061124001); 国家自然科学基金项目(42177313); 国家重点研发计划项目(2021YFD1700800)

作者简介: 黄静文(1998 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤氮循环, E-mail: huangjingwen@issas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: cpti@issas.ac.cn

风化速率以及植被对氮和盐基阳离子吸收速率等重要参数的基础上用稳态质量平衡法开展全国的酸沉降临界负荷区划. 近年来也有其他研究在陆地生态系统和水生生态系统展开了氮和硫的临界负荷估算, 为氮污染治理和酸沉降控制提供了科学依据^[14~17].

常用的临界负荷估算方法有动态模型法、经验法和稳态质量平衡法等^[9,18,19]. 其中稳态质量平衡法主要是通过数学方程将化学标准(临界限值)与最大沉降量联系起来, 从而确定对环境中特定敏感元素不产生显著影响的最大氮沉降量^[9]. 该方法只考虑生态系统在稳定状态下的情况, 而不考虑其动态过程, 因而计算过程简化, 所需参数相对较少, 被广泛用于陆地生态系统临界负荷的计算. 如前所述, 近年来我国持续加大空气环境质量治理力度, 有效地降低了氮沉降, 但缺乏当前条件下我国氮沉降临界负荷的研究, 目前我国氮沉降是否存在生态环境风险尚不清楚. 因此, 为了更好地评估当前减排政策和措施下我国氮沉降对生态系统的危害和临界负荷, 基于前人的基础, 本研究通过对盐基阳离子沉降量和氮沉降通量等数据进行更新, 估算了当前我国自然生态系统氮沉降临界负荷, 并分析了当前氮沉降情况下超过氮沉降临界负荷的生态系统分布情况, 以期为进一步控制氮污染提供参考.

1 氮沉降临界负荷估算方法

1.1 基本原理

本研究选用稳态质量平衡法估算我国自然生态系统氮沉降临界负荷, 该方法的基本原理是平衡氮沉降与暴露于氮沉降的生态系统对氮输入的缓冲能力从而保证不对生态系统内外产生有害影响^[9]. 用稳态质量平衡法估算酸化氮临界负荷和营养氮临界负荷, 其推导公式如下:

$$CL(S) + CL(N) = BC_{dep}^* + BC_w - BC_u + N_i + N_u + N_{de} - ANC_{le,crit} \quad (1)$$

$$CL_{max}(S) = BC_{dep}^* + BC_w - BC_u - ANC_{le,crit} \quad (2)$$

$$CL_{max}(N) = N_i + N_u + \frac{CL_{max}(S)}{1 - f_{de}} \quad (3)$$

$$CL_{nut}(N) = N_i + N_u + \frac{N_{le,crit}}{1 - f_{de}} \quad (4)$$

$$CL(N) = \min[CL_{max}(N), CL_{nut}(N)] \quad (5)$$

利用当前氮沉降(N_{dep})与氮沉降临界负荷差可以得到氮沉降超临界负荷, 它指示了氮沉降安全阈值的超标, 可能会对生态环境产生不利影响, 其计算式为:

$$E_x(N) = N_{dep} - CL(N) \quad (6)$$

式中, $CL_{max}(S)$ 、 $CL_{max}(N)$ 、 $CL_{nut}(N)$ 、 $CL(N)$ 和 $E_x(N)$ 分别为硫沉降临界负荷、酸化氮临界负荷、营养氮临界负荷、氮沉降临界负荷和氮沉降超临界负荷. N_{dep} 通过化学传输模型(GEOS-Chem)估算, 具体计算过程参见文献[6]; BC_{dep}^* ($BC = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+$) 为经过海盐校正后的盐基阳离子沉降量; BC_w 为土壤风化产生盐基阳离子的速率, BC_u ($Bc = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+$) 为植物吸收盐基阳离子的速率; f_{de} 为反硝化率; N_i 为氮矿化速率; N_u 为植物吸收氮的速率; N_{de} 为氮的反硝化速率; N_{dep} 为当前氮沉降; $N_{le,crit}$ 为临界氮淋溶速率; $ANC_{le,crit}$ 为临界碱度淋溶速率, 其计算式如下:

$$ANC_{le,crit} = \max \left[-Q^{2/3} \times \left(1.5 \times \frac{BC_{dep}^* + BC_w - BC_u}{K_{gibb} \times (Bc/Al)_{crit}} \right)^{1/3} - 1.5 \times \frac{BC_{dep}^* + BC_w - BC_u}{(Bc/Al)_{crit}} - 2 \times BC_w - Q^{2/3} \times \left(2 \times \frac{BC_w}{K_{gibb}} \right)^{1/3} \right] \quad (7)$$

式中, Q 为径流量, 单位为 $m^3 \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$, K_{gibb} 为水铝矿平衡常数, 单位为 $m^6 \cdot eq^{-2}$, $(Bc/Al)_{crit}$ 为临界 Bc 与 Al 的比值.

氮沉降的输入对生态系统造成的影响包括富营养化和养分失衡, 因此氮沉降临界负荷主要从这两方面进行考虑^[20]. 根据以上公式, 本研究中氮沉降临界负荷选取酸化氮临界负荷和营养氮临界负荷二者的最小值.

1.2 数据收集与整理

计算生态系统的氮沉降临界负荷需要的主要参数包括植被参数、土壤参数和沉降参数这3类. 由于缺乏相关数据, 本研究不包含中国香港特别行政区、澳门特别行政区和中国台湾省.

1.2.1 植被参数

所需的植被参数主要有植被对盐基阳离子和氮的吸收速率与临界化学值. 植被对氮和盐基阳离子的吸收速率是通过不同植被类型生产力乘以相应元素含量估算得出的. 段雷^[13]根据我国植被的初级生产力和植物的元素化学成分估算了我国主要植被类型的盐基阳离子和氮吸收速率. 根据已有的研究成果, 结合植被类型分布, 进而可以获取我国植被对盐基阳离子和氮的吸收速率.

生态系统的临界化学值是衡量酸沉降对生态系统中某种指示生物产生危害作用时的化学标准, 包括临界碱度淋溶速率($ANC_{le,crit}$)和临界氮淋溶速率

($N_{le,crit}$). 其中, 临界碱度淋溶速率可以通过盐基阳离子与铝离子的临界浓度比 (Bc/Al)_{crit} 或原生矿物风化产生铝的速率来计算, 其值主要参考已有研究的结果^[13]. 在本研究中, 临界碱度淋溶速率取盐基阳离子与铝离子的临界浓度比 (Bc/Al)_{crit} 和风化铝速率二者中的较大值. 而临界氮淋溶主要考虑到土壤氮素的流失, 土壤中过量的氮会通过淋溶流失到水体中, 引起水体富营养化. 我国不同植被临界氮淋溶速率参考文献^[13].

除此之外, 干沉降因子 f_{DD} 也与植被类型有关, 有研究表明^[21], 不同植被类型的干沉降因子不同. 根据我国之前的研究, 植被的干沉降因子: 阔叶林取 0.75; 针叶林取 1.55; 针阔叶混交林取 1.15; 开阔地 (除森林外的其他植被) 取 1.87^[22].

1.2.2 土壤参数

土壤参数包括氮矿化速率、水铝矿平衡常数、反硝化率和土壤风化速率. 本研究中以上参数主要参考经验值或文献^[13,17] 的值. 其中, 土壤风化速率由于受温度影响, 可以利用以下公式对其进行校正:

$$BC_w = BC_{w0} \cdot \exp\left(\frac{3\,600}{281} - \frac{3\,600}{273 + t}\right) \quad (9)$$

式中, BC_w 为土壤风化速率; BC_{w0} 为土壤风化速率初值, 由文献^[13] 给出; t 为年平均气温, 单位为 $^{\circ}C$.

1.2.3 沉降参数

盐基阳离子对酸沉降具有缓冲作用, 是临界负荷计算中一个重要部分. 本研究收集了 2015 年以来我国各个地区降水中盐基阳离子的浓度及其组分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 和 Na^{+} 的浓度. 共收集了 69 篇文献 91 条数据, 数据点分布情况如图 1 所示. 盐基阳离子的总沉降量是干沉降量和湿沉降量的总和, 计算公式如下:

$$BC_{WD} = p \cdot [BC]/10^5 \quad (10)$$

$$BC_{TD} = (1 + f_{DD}) \cdot BC_{WD} \quad (11)$$

式中, BC_{WD} 为盐基阳离子的湿沉降量; BC_{TD} 为盐基阳离子总沉降量; $[BC]$ 为降水中的盐基阳离子浓度, 单位为 $\mu eq \cdot L^{-1}$; p 为降雨量, 单位为 mm. 由于降水中有部分离子来自于海洋, 所以用 Cl^{-} 进行海盐校正. 表 1 显示了本研究获取的我国各地区盐基阳离子湿沉降浓度范围.

表 1 2015~2020 年间我国各地区盐基阳离子湿沉降浓度范围/ $\mu eq \cdot L^{-1}$

Table 1 Concentration range of wet base cation deposition in China mainland from 2015 to 2020/ $\mu eq \cdot L^{-1}$

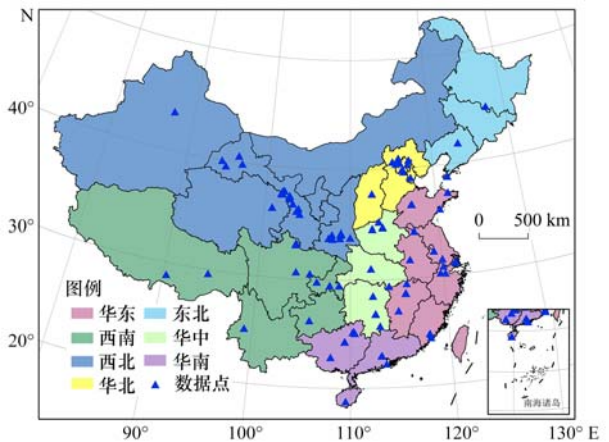
地区	数据点数量	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	BC
东北	3	57.32~97.17	8.00~66.86	14.20~39.91	6.20~15.04	85.70~418.98
华北	12	54.50~403.00	14.17~51.00	8.26~34.00	3.33~14.00	80.26~502.00
华中	8	16.00~134.50	4.50~16.10	3.04~18.30	1.79~15.40	25.33~184.30
华东	22	1.37~309.00	7.09~73.30	0.88~183.90	0.53~41.30	9.87~607.50
华南	12	7.48~199.10	2.00~9.20	7.18~12.20	1.91~3.50	7.97~13.60
西南	12	37.60~156.00	4.70~38.00	1.57~52.00	11.75~27.00	55.61~273.00
西北	22	21.91~737.30	1.92~97.10	9.47~95.70	2.30~70.30	35.60~1 000.40

1.2.4 其他参数

除以上 3 类参数外, 计算所需的气象数据, 如我国年平均气温和年平均降雨量数据来自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心; 径流数据来自国家青藏高原科学数据中心“一带一路”沿线国家径流系数和径流深数据 (2015 年)^[23].

1.2.5 数据处理

利用地理信息系统软件 ArcGIS10.8.0 (ESRI, Redlands, USA) 对输入参数进行处理. 将各土壤参数和植被参数作为属性分别连接到土壤类型分布图和植被类型分布图中. 土壤数据来源于国家科技基础条件平台: 国家地球系统科学数据中心土壤分中心 (<http://soil.geodata.cn>). 植被数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpdc.ac.cn>). 将沉降参数连接到中国省份区划图中. 为了便于数据运算, 首先将矢量数据转化成栅格数据, 得到各参数



本文出现的地图均基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作

图 1 盐基阳离子沉降数据点分布情况

Fig. 1 Sampling sites of base cation deposition in China

的栅格图层, 最后利用栅格计算器进行计算. 本研究中栅格图层空间分辨率均为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$.

2 结果与分析

2.1 盐基阳离子湿沉降量

2015~2020年间,我国盐基阳离子湿沉降量的平均值为 $1.63 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 和 K^{+} 的沉降量平均值分别为 1.07 、 0.23 、 0.21 和 $0.12 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 分别占盐基阳离子沉降总量的 66%、14%、13% 和 7%. 不同地区盐基阳离子沉降量有所差异. 如图 2 所示, 华中地区盐基阳离子沉降最高, 为 $2.84 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其次是华东地区 [$2.21 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 和华北地区 [$1.78 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 而西北和华南地区盐基阳离子沉降量较低, 分别是 $1.06 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $0.88 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 盐基阳离子各组分的空间分布格局也不同, Ca^{2+} 沉降较高的地区主要集中在华中和华北地区; 在我国东部和南部地区 Na^{+} 沉降最高; 而华东和华中地区 Mg^{2+} 沉降最高; 对 K^{+} 来说, 除了华东和华中地区外, 在西南地区的沉降也比较明显.

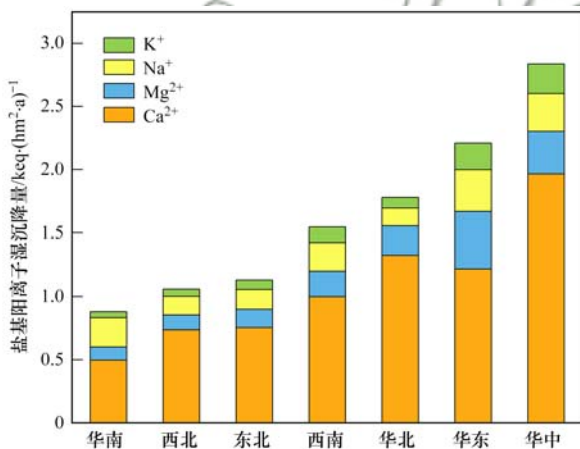


图2 2015~2020年间我国盐基阳离子湿沉降分布

Fig. 2 Distribution of deposition of wet base cations in China from 2015 to 2020

2.2 氮沉降临界负荷

根据以上方法计算得出我国自然生态系统酸化氮临界负荷和营养氮临界负荷. 营养氮临界负荷小于酸化氮临界负荷, 因此为了保证生态系统不受其中任何一种危害, 氮沉降临界负荷取营养氮临界负荷.

我国氮沉降临界负荷除青藏高原部分地区外都在 $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 以上, 大部分地区在 $14 \sim 56 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 之间 (图 3), 占我国面积的约 67%. 氮沉降临界负荷最高的区域 [高于 $56 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 主要分布在青藏高原东部、内蒙古东北部和南方部分地区, 占我国面积的约 6%. 除此之外, 塔里木盆地边缘的荒漠地区和部分高寒地区

氮沉降临界负荷也较高. 而氮沉降临界负荷较低的区域主要分布在我国青藏高原西部、西北地区 and 东南部分地区, 占我国面积的约 27%.

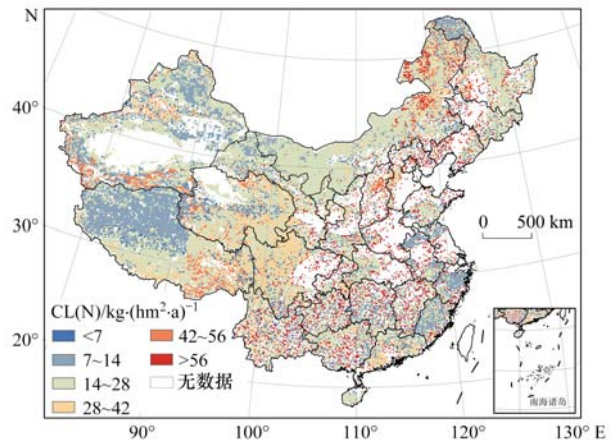


图3 我国自然生态系统氮沉降临界负荷

Fig. 3 Critical load of nitrogen deposition in natural ecosystems in China

2.3 氮沉降超临界负荷

当前我国总氮沉降分布 (2018 年) 如图 4 所示, 从中可以看出, 我国东南地区氮沉降高于西北地区. 通过当前氮沉降数据与氮沉降临界负荷相减, 可以获取当前超过氮沉降临界负荷的生态系统空间分布. 图 5 显示我国氮沉降超过临界负荷的地区主要在东南部, 部分分布在东北和西南地区, 以上地区主要包括湖南、贵州、江西、福建、浙江、广东和广西等. 超临界负荷值主要在 $14 \sim 28 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 范围内. 东北、西北和青藏高原地区虽有超临界负荷值零星分布, 但都不超过 $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 特别是青海, 绝大部分地区氮沉降低于临界负荷值.

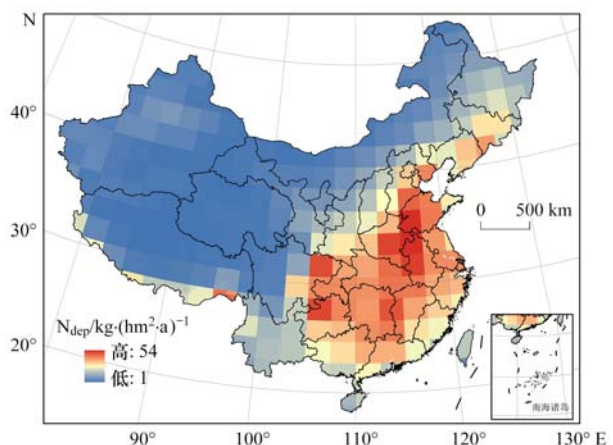


图4 当前我国总氮沉降

Fig. 4 Current nitrogen deposition in China

3 讨论

3.1 中国盐基阳离子湿沉降及其空间分布

2015~2020 年我国盐基阳离子湿沉降量的平

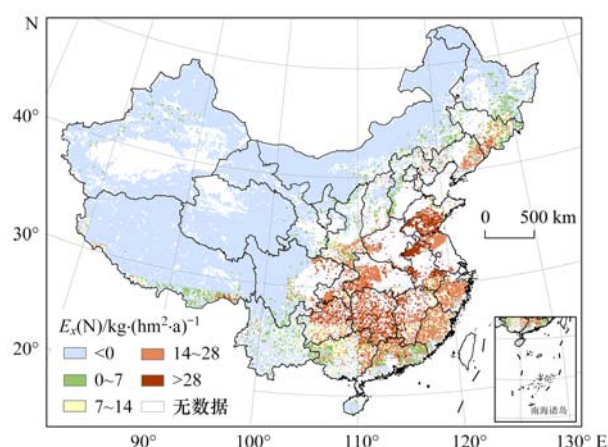


图5 我国自然生态系统氮沉降超临界负荷

Fig. 5 Critical load of exceedances of nitrogen deposition in natural ecosystems in China

均值为 $1.63 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 该结果与 Zhang 等^[24] 的研究结果相比略低, 根据他们的估算, 2000 ~ 2017 年盐基阳离子沉降量平均值为 $(2.12 \pm 0.46) \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 大气中的盐基阳离子是由自然源和人类活动共同作用形成的, 它们的主要来源有人为活动(包括工业排放、农业生产以及与建筑和交通运输有关的排放)、地壳物质风化和海盐气溶胶^[24,25]. 工业化的快速发展、城市化进程的推进、土地利用方式的改变以及大气污染防治政策和措施共同决定了大气盐基阳离子的排放和沉降空间格局^[26]. 一方面, 我国的北方和东南地区由于发达的城市建设和工业生产, 导致人类活动贡献了大部分的盐基阳离子沉降^[27]. Du 等^[26] 的研究也表明, 与干旱和半干旱地区相比, 中国东部和南部地区的盐基阳离子沉降较高. 这可能是干旱和半干旱地区的植被恢复以及东部和南部的人为排放造成的. 在所有组分中, Ca^{2+} 占的比例最大, 其次是 Mg^{2+} . Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源既有沙尘气溶胶的远距离运输, 也有城市化和工业化造成的人为源^[28]. Zhang 等^[24] 的研究表明, 水泥生产和其他工业过程是 Ca^{2+} 的主要人为来源, 其中水泥生产的贡献为 25%, 其他工业过程贡献为 61%. Na^+ 沉降在东南沿海地区较高, 这是由于海洋是 Na^+ 沉降的主要来源. 除了华中和华东地区, 西南地区也包含较多的 K^+ 沉降, 主要原因可能是该地区的生物质燃烧和盆地地形不利于大气流动.

另外, 盐基阳离子沉降的减少可能和近年来持续推进的大气污染防治计划有关, 如 2018 年国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》, 在重点行业重点区域对大气污染物, 特别是颗粒物进行治理计划执行期间空气质量持续改善. 以往的研究表明包括盐基阳离子在内的水溶性无机离子是颗粒物质量

浓度增加的重要因素^[29]. Zhang 等^[24] 指出, 盐基阳离子湿沉降的空间格局主要受 PM_{10} 和交换性盐基阳离子的影响. 根据文献[30,31], 2015 年全国 338 个地级以上城市 $\rho(\text{PM}_{10})$ 的年均值为 $87 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 2020 年 $\rho(\text{PM}_{10})$ 的年均值为 $56 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 下降了 36%, 这也间接证实了盐基阳离子沉降量降低的变化趋势.

3.2 氮沉降临界负荷的空间分布与影响因素

本研究显示高氮沉降临界负荷主要出现在青藏高原东部、内蒙古东北部和南方部分地区, 而低氮沉降临界负荷主要分布在青藏高原西部、西北地区和东南部分地区. 该空间分布格局与 Zhao 等^[27] 对我国 2015 年的氮沉降临界负荷研究结果比较接近, 但本研究中甘肃和内蒙古高原西部地区的氮沉降临界负荷更高, 长江中下游平原以南地区氮沉降临界负荷出现相对较低值. 前人对珠江三角洲硫和氮沉降临界负荷的研究表明^[32], 珠江三角洲大部分地区的氮沉降临界负荷为 $1.0 \sim 2.5 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 这与本研究中对对应区域的研究结果接近. 氮沉降临界负荷在我国东南地区的分布可能与植被对氮的吸收和地表径流有关. 该地区既有对氮沉降较敏感的针叶林和零星分布的草地, 也有较不敏感的灌丛和阔叶林. 这些植被对氮的吸收速率不同, 再加上地表径流的差异, 从而形成了不同的空间分布格局. 总体来说, 我国西北部地区由于较低的植被吸收、降雨和径流量导致其氮沉降临界负荷较低, 而东部和南部大部分地区降水丰富, 土壤反硝化速率也较高, 因而具有较高的氮沉降临界负荷^[15].

除此之外, 有研究表明盐基阳离子沉降对氮沉降临界负荷有显著影响^[33]. 高盐基阳离子沉降量通过增加土壤中的盐基阳离子汇来提高土壤碱度, 从而降低酸化的影响. 因此, 盐基阳离子沉降量减少会导致生态系统的酸沉降临界负荷降低^[24,34]. Watmough 等^[35] 在加拿大的一项研究也表明, 即便在该地区盐基阳离子风化率极低的情况下, 高盐基阳离子沉降也在很大程度上减轻了土壤酸化的风险. 然而, 出于保护人类健康的目的则必须控制颗粒物排放. 在当前严厉的空气污染控制措施下, 未来盐基阳离子沉降量可能会有所下降, 因此需要综合考虑盐基阳离子沉降量对生态系统带来的双重影响. 除此之外, Sun 等^[36] 的研究表明温度的升高会增加土壤中的盐基阳离子风化、植被对盐基阳离子的吸收和径流, 从而使氮沉降临界负荷升高, 这意味着在对氮沉降进行控制的过程中, 还应充分考虑温度因素.

3.3 不确定性分析

本研究在收集整理我国的植被、土壤和沉降数

据的基础上估算了氮沉降临界负荷,数据来源的不同可能会造成最终估算结果存在不确定性.如在本研究开展期间植被类型分布图数据尚未更新,这可能会影响氮沉降临界负荷的空间分布格局.除此之外,临界氮淋溶速率取决于临界氮浓度值,基于不同的保护对象选取的标准不同,可能会导致氮沉降临界负荷值有所差异.本研究中根据营养失衡造成的植被改变确定的临界氮沉降速率取值在 $0.56 \sim 2.94 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 范围内,但如果以保护地下水为目标,临界氮淋溶速率通常更高,从而导致营养氮临界负荷的高估.另外,在盐基阳离子沉降估算中,由于干沉降实测数据的缺乏,采用干沉降因子对盐基阳离子总沉降量进行了估算,这可能会使得盐基阳离子总沉降量计算结果存在一定的误差,进而影响氮沉降临界负荷值.

本研究未能涵盖对水生生态系统氮沉降临界负荷的评估.尽管进入水体的氮沉降会带来丰富的营养盐,提高浮游植物的初级生产力,但当氮沉降超过水体的临界负荷时,可能会造成水体酸化,富营养化,藻华和水生生物的缺氧死亡^[37].水生生态系统临界负荷值通常相对较小^[38],前人利用经验法、动态法和稳态法对我国不同区域都进行了相关的研究^[10,39-41],但国家尺度上的估算还比较缺乏,这可能引起氮沉降临界负荷总量估计的误差,因此在未来的研究中应加以考虑.

3.4 氮沉降减排与控制

有研究表明氮沉降的变化趋势与人为活性氮排放一致^[7],大量含氮化合物排放到大气中是造成氮沉降不断增加的主要原因.因此,减少氮沉降对生态系统的危害,尤其需要关注含氮化合物特别是 NO_x 和 NH_x 的有效控制.近年来在相关政策和措施的实施下, NO_x 的排放有所下降,但 NH_3 的排放尚未引起足够重视.Zhao 等^[42]的研究发现,62% 的氮沉降是来自于 NH_3 .相关预测结果也表明, NO_x 沉降减少对氮沉降的改善可能被增加的 NH_x 沉降抵消,因此对 NH_3 排放的控制将是未来氮沉降防治的关键因素^[36,43].

农业 NH_3 排放是我国 NH_3 排放的重要来源,其中氮肥施用对 NH_3 排放的贡献约为 30%,畜禽养殖的贡献约为 50%.本研究表明,不同的肥料来源、增效肥料的使用和田间施用方式对减少种植体系中的 NH_3 排放最为有效.施用硝酸铵、控释肥和深施化肥可分别减少 88.3%、56.8% 和 48.0% 的 NH_3 排放^[44].在畜禽养殖生产过程中,机械通风封闭化圈舍、堆肥发酵、低蛋白日粮、液态粪污覆盖和粪肥机械深施等,也都可以有效减少 NH_3 的排放^[45].除

此之外,在城市化和工业化进程下,汽车尾气、工业排放、城市绿地和湿润地表的 NH_3 蒸发可能是 NH_3 排放的重要源^[46-48].尽管近年来,我国采取了相当多严厉的政策和措施来控制 SO_2 和 NO_x 的排放^[20],但目前我国有关 NH_3 排放方面的法规与管理政策仍较为缺乏.

4 结论

(1) 当前我国盐基阳离子沉降量的平均值为 $1.63 \text{ keq} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 的沉降量分别占盐基阳离子沉降总量的 66%、14%、13% 和 7%.不同地区盐基阳离子沉降量有所差异.华中、华北和华东地区盐基阳离子沉降较高,西北和华南地区盐基阳离子沉降量较低.

(2) 当前我国 67% 的地区氮沉降临界负荷在 $14 \sim 56 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 范围内,27% 的地区小于 $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,6% 的地区大于 $56 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.氮沉降临界负荷较高的区域主要分布在青藏高原东部、内蒙古东北部和南方部分地区,而青藏高原西部、西北地区和东南部分地区较低.

(3) 我国氮沉降超过临界负荷的区域约占 21%,主要分布在我国东南部和东北部分地区.超过临界负荷的范围大部分在 $14 \sim 28 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 范围内.东北、西北和青藏高原地区超临界负荷值不超过 $14 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.

参考文献:

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [2] Liu X J, Xu W, Du E Z, *et al.* Environmental impacts of nitrogen emissions in China and the role of policies in emission reduction[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2020, **378**(2183), doi: 10.1098/rsta.2019.0324.
- [3] Han W J, Cao J Y, Liu J L, *et al.* Impacts of nitrogen deposition on terrestrial plant diversity: a meta-analysis in China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2019, **12**(6): 1025-1033.
- [4] Shou W W, Zong H B, Ding P X, *et al.* A modelling approach to assess the effects of atmospheric nitrogen deposition on the marine ecosystem in the Bohai Sea, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, **208**: 36-48.
- [5] Gao Y, Zhou F, Ciais P, *et al.* Human activities aggravate nitrogen-deposition pollution to inland water over China[J]. *National Science Review*, 2020, **7**(2): 430-440.
- [6] Liu L, Xu W, Lu X K, *et al.* Exploring global changes in agricultural ammonia emissions and their contribution to nitrogen deposition since 1980[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, **119**(14), doi: 10.1073/pnas.2121998119.
- [7] Wen Z, Xu W, Li Q, *et al.* Changes of nitrogen deposition in China from 1980 to 2018[J]. *Environment International*, 2020,

- 144**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106022.
- [8] Nilsson J. Critical loads for sulphur and nitrogen [A]. In: Mathy P (Ed.). *Air Pollution and Ecosystems* [M]. Dordrecht: Springer, 1988. 85-91.
- [9] Spranger T, Lorenz U, Gregor H D. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends [M]. Berlin: Umweltbundesamt, 2004.
- [10] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 等. 应用动态模型确定酸沉降临界负荷的探讨[J]. 环境科学, 2002, **23**(4): 18-23.
Ye X M, Hao J M, Duan L, *et al.* Calculating critical load of acid deposition with dynamic model[J]. *Environmental Science*, 2002, **23**(4): 18-23.
- [11] 谢绍东, 郝吉明, 周中平. 柳州地区酸沉降临界负荷的确定[J]. 环境科学, 1996, **17**(5): 1-4.
Xie S D, Hao J M, Zhou Z P. Assessment of critical loads for acid deposition in Liuzhou area [J]. *Environmental Science*, 1996, **17**(5): 1-4.
- [12] Liu X J, Duan L, Mo J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2251-2264.
- [13] 段雷. 中国酸沉降临界负荷区划研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
Duan L. Study on mapping critical loads of acid deposition in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
- [14] Lv D W, Yu Q, Xie D N, *et al.* Critical loads of headwater streams in China using SSWC model modified by comprehensive F-factor[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **802**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149780.
- [15] Posch M, Duan L, Reinds G J, *et al.* Critical loads of nitrogen and sulphur to avert acidification and eutrophication in Europe and China[J]. *Landscape Ecology*, 2015, **30**(3): 487-499.
- [16] Xie D N, Zhao B, Wang S X, *et al.* Benefit of China's reduction in nitrogen oxides emission to natural ecosystems in East Asia with respect to critical load exceedance [J]. *Environment International*, 2020, **136**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105468.
- [17] 徐光仪. 东北亚酸沉降临界负荷区划研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
Xu G Y. Mapping critical loads of acid deposition for northeast Asia [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [18] Bobbink R, Braun S, Nordin A, *et al.* Updating and reviewing procedures for empirical critical loads of nitrogen [A]. In: Bobbink R, Hettelingh J P (Eds.). *Review and Revision of Empirical Critical Loads and Dose-Response Relationships* [C]. Noordwijkerhout: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), 2011.
- [19] Posch M, De Vries W, Sverdrup H U. Mass balance models to derive critical loads of nitrogen and acidity for terrestrial and aquatic ecosystems [A]. De Vries W, Hettelingh J P, Posch M (Eds.). *Critical Loads and Dynamic Risk Assessments* [M]. Dordrecht: Springer, 2015. 171-205.
- [20] 余倩, 段雷, 郝吉明. 中国酸沉降: 来源、影响与控制[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 731-746.
Yu Q, Duan L, Hao J M. Acid deposition in China: sources, effects and control [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 731-746.
- [21] De Vries W, Reinds G J, Posch M. Assessment of critical loads and their exceedance on European forests using a one-layer steady-state model [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1994, **72**(1-4): 357-394.
- [22] 谢绍东, 郝吉明, 周中平. 应用稳态酸化模型计算酸沉降临界负荷[J]. 环境科学, 1997, **18**(5): 6-9.
Xie S D, Hao J M, Zhou Z P. Calculation of critical loads for acid deposition with steady state acidification model [J]. *Environmental Science*, 1997, **18**(5): 6-9.
- [23] 贾绍凤. “一带一路”沿线国家径流系数和径流深数据 (2015) [DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, <http://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/5d6c3095-edd7-46f5-a71f-772e17c0af38/>, 2020.
- [24] Zhang Q Y, Wang Q F, Zhu J X, *et al.* Spatiotemporal variability, source apportionment, and acid-neutralizing capacity of atmospheric wet base-cation deposition in China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114335.
- [25] Vet R, Artz R S, Carou S, *et al.* A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **93**: 3-100.
- [26] Du E Z, De Vries W, McNulty S, *et al.* Bulk deposition of base cationic nutrients in China's forests: annual rates and spatial characteristics [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **184**: 121-128.
- [27] Zhao W X, Zhao Y, Ma M R, *et al.* Long-term variability in base cation, sulfur and nitrogen deposition and critical load exceedance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **289**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117974.
- [28] Li R, Cui L L, Zhao Y L, *et al.* Wet deposition of inorganic ions in 320 cities across China: spatio-temporal variation, source apportionment, and dominant factors [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(17): 11043-11070.
- [29] Liu H X, Zheng J R, Qu C K, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM₁₀ in a typical mining city, central China [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(12), doi: 10.3390/atmos8040074.
- [30] 中华人民共和国生态环境部. 2015 年环境统计年报 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2017.
- [31] 中华人民共和国生态环境部. 2020 年中国生态环境统计年报 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2022.
- [32] 孙成玲, 谢绍东. 珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究 [J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1250-1255.
Sun C L, Xie S D. Study on critical loads of sulfur and nitrogen in the Pearl River Delta [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1250-1255.
- [33] Zhao Y, Duan L, Larssen T, *et al.* Simultaneous assessment of deposition effects of base cations, sulfur, and nitrogen using an extended critical load function for acidification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(6): 1815-1820.
- [34] Lövlblad G, Tarrasón L, Tørseth K, *et al.* EMEP assessment Part 1 European perspective [R]. Oslo, Norway: Norwegian Meteorological Institute, 2004.
- [35] Watmough S A, Whitfield C J, Fenn M E. The importance of atmospheric base cation deposition for preventing soil acidification in the Athabasca Oil Sands Region of Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 1-11.
- [36] Sun J, Fu J S, Lynch J A, *et al.* Climate-driven exceedance of total (wet + dry) nitrogen (N) + sulfur (S) deposition to forest soil over the conterminous U. S [J]. *Earth's Future*, 2017, **5**(6): 560-576.
- [37] Heffernan J B, Liebowitz D M, Frazer T K, *et al.* Algal blooms and the nitrogen - enrichment hypothesis in Florida springs:

- evidence, alternatives, and adaptive management[J]. *Ecological Applications*, 2010, **20**(3): 816-829.
- [38] 陆晨东, 张六一, 夏利林, 等. 大气活性氮沉降临界负荷研究进展[J]. *地球与环境*, 2021, **49**(6): 750-756.
- Lu C D, Zhang L Y, Xia L L, *et al.* Research progress on critical load of nitrogen deposition[J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(6): 750-756.
- [39] Xu W, Zhao Y H, Liu X J, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in the Yangtze River basin: Spatial pattern and source attribution[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **232**: 546-555.
- [40] 郭平. 三峡库区酸沉降特征及其对森林土壤的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- Guo P. Characteristics of acid deposition and its effects on forest soil in the Three Gorges Reservoir area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [41] 周立峰. 大气氮沉降对白溪水库饮用水源水质影响研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
- Zhou L F. Research on the effect of atmospheric nitrogen deposition on the drinking water's quality of Baixi reservoir[D]. Ningbo: Ningbo University, 2012.
- [42] Zhao Y H, Zhang L, Chen Y F, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition to China: a model analysis on nitrogen budget and critical load exceedance[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **153**: 32-40.
- [43] Dentener F, Drevet J, Lamarque J F, *et al.* Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, **20**(4), doi: 10.1029/2005GB002672.
- [44] Ti C P, Xia L L, Chang S X, *et al.* Potential for mitigating global agricultural ammonia emission: a meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 141-148.
- [45] 王文林, 杜薇, 韩宇捷, 等. 我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(11): 2305-2316.
- Wang W L, Du W, Han Y J, *et al.* Ammonia emission characteristics and construction of an emission reduction system for livestock and poultry farming in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(11): 2305-2316.
- [46] Sun K, Tao L, Miller D J, *et al.* Vehicle emissions as an important urban ammonia source in the United States and China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(4): 2472-2481.
- [47] Teng X L, Hu Q J, Zhang L M, *et al.* Identification of major sources of atmospheric NH₃ in an urban environment in northern China during wintertime [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 6839-6848.
- [48] Wang S S, Nan J L, Shi C Z, *et al.* Atmospheric ammonia and its impacts on regional air quality over the megacity of Shanghai, China [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1), doi: 10.1038/srep15842.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)