

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

近40年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估

陈中星^{1,2}, 邱龙霞^{1,2}, 陈瀚阅^{1,2}, 范协裕^{1,2}, 毋亭^{1,2}, 沈金泉³, 邢世和^{1,2}, 张黎明^{1,2*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福州 350002; 3. 福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福州 350003)

摘要: 水稻土磷素流失引起的水体富营养化等生态风险已受到普遍关注, 而明确其动态变化和富集效应是制定合理防控措施的基础. 以福建省 1.8×10^6 hm^2 水稻土为研究对象, 以 1982 年全国第二次土壤普查 1 471 个、2008 年农业农村部测土配方施肥项目 215 534 个和 2018 年农业农村部耕地质量监测项目 2 895 个表层水稻土样点建立的 1:5 万三期大比例尺土壤数据库为基础, 分析全省水稻土有效磷含量近 40 年来的富集效应及潜在生态风险. 结果表明, 1982 ~ 2018 年间福建省水稻土有效磷含量增加了 $47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 富集面积达到 1.65×10^6 hm^2 , 占全省水稻土总面积的 91%; 其中, 1982 ~ 2008 年福建省水稻土有效磷含量增加了 $28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 富集面积为 1.47×10^6 hm^2 , 占全省水稻土总面积的 82%; 2008 ~ 2018 年福建省水稻土有效磷含量增加了 $19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 富集面积为 1.22×10^6 hm^2 , 占全省水稻土总面积的 69%. 进一步的潜在生态风险评估表明, 2008 ~ 2018 年全省处于磷素富集生态风险的水稻土面积呈逐增加趋势, 且主要分布于坡度低于 2° 的渗育和潜育水稻土, 今后应根据不同水稻土亚类和地形地貌区制定有效的磷施肥管理措施, 以防止水体富营养化等环境问题发生.

关键词: 有效磷; 磷素富集; 生态风险; 1:5 万土壤数据库; 时空演变

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3741-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202108140

Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years

CHEN Zhong-xing^{1,2}, QIU Long-xia^{1,2}, CHEN Han-yue^{1,2}, FAN Xie-yu^{1,2}, WU Ting^{1,2}, SHEN Jing-quan³, XING Shi-he^{1,2}, ZHANG Li-ming^{1,2*}

(1. College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. University Key Laboratory of Soil Ecosystem Health and Regulation in Fujian, Fuzhou 350002, China; 3. Fujian Crop Land Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The ecological risks such as water eutrophication caused by soil phosphorus loss have attracted extensive attention, and its dynamic changes and enrichment effects are the basis for formulating reasonable control measures. In this study, based on the paddy soils of 1.8×10^6 hm^2 in Fujian province, the dynamic changes and ecological risks of available phosphorus in paddy soils over the past 40 years were analyzed using a soil database of 1:50 000. The soil database contained 1 471, 215 534, and 2 895 paddy soil samples in different periods, respectively. The paddy soil samples were derived from the 1982 Second National Soil Census, the 2008 Ministry of Agriculture and Rural Areas Soil Testing and Formulated Fertilization Project and the 2018 Ministry of Agriculture, and the Rural Areas Arable Land Quality Monitoring Project, respectively. The results showed that from 1982 to 2018, the content of available phosphorus in paddy soils increased by $47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the enriched area reached 1.65×10^6 hm^2 , accounting for 91% of the total paddy soils in Fujian province. From 1982 to 2008, the available phosphorus content of paddy soils in Fujian province increased by $28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with the enriched area reaching 1.47×10^6 hm^2 , accounting for 82% of the total paddy soils in Fujian province. From 2008 to 2018, the available phosphorus content of paddy soils in Fujian province increased by $19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, with the enriched area reaching 1.22×10^6 hm^2 , accounting for 69% of the total paddy soils in Fujian province. Further ecological risk assessment showed that from 2008 to 2018, the area of paddy soil with ecological phosphorus enrichment risk in the province gradually increased, mainly distributed in percologenic paddy soils and hydromorphic paddy soils with a slope of less than 2° . In the future, effective phosphorus fertilizer management measures should be formulated for different types of paddy soil to prevent the occurrence of environmental problems such as water eutrophication.

Key words: available phosphorus; phosphorus enrichment; ecological risk; 1:50 000 soil database; spatiotemporal variability

磷素(P)作为植物生长必需元素,一方面是土壤肥力的决定因子,另一方面也是水体富营养化的主要来源^[1~3].农业生产中为了提高作物产量往往会大量施用磷肥,但其施入农田后很容易被土壤颗粒表面或土壤中的铁铝氧化物等吸附转化成作物难以吸收的难溶性磷酸盐,导致磷肥当季利用率较低,约为10%~25%^[4~6].随着磷素在土壤中的累积,大量盈余的磷素可通过径流、渗透和淋溶等途径向水体迁移,从而造成水体富营养化等一系列环境问题^[7~10].因此,明确土壤中磷素的动态变化及其环境效应对于合理制定施肥管理措施具有重要意义.

近些年来国内外学者基于大量实测数据对土壤有效磷时空变化进行了研究^[11~20].通过国内外研究可以看出,第二次土壤普查以来,随着我国经济和农业生产的发展,农户在习惯性施肥过程中磷肥的投入常常超出作物实际需磷量,造成土壤中磷素累积量逐年增加,农田土壤有效磷含量呈明显上升趋势.

收稿日期: 2021-08-14; 修订日期: 2021-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971050); 福建省自然科学基金项目(2019J01660); 福建农林大学国际科技合作与交流项目(KXGH17017)

作者简介: 陈中星(1992~),男,博士研究生,主要研究方向为土壤磷素的环境效应. E-mail: miruo1203@163.com

* 通信作者, E-mail: fjaulmzhang@163.com

在这种情况下,明确我国不同区域的土壤磷素时空演变趋势及盈亏平衡,以便更好地提高磷肥利用率和降低环境生态风险是当务之急.但是我国目前的土壤磷素动态变化研究大多基于两期数据,且集中于中小比例尺土壤数据库,而在大区域上使用大比例尺土壤数据库进行多期研究的较少^[21,22].有学者指出由于不同制图比例尺数据库对土壤类型的概化程度不同,导致土壤属性估算过程中的误差会随比例尺减小而增大^[23,24].因此,有必要在省域等大区域尺度建立多期大样本实测样点数据支撑的高精度土壤数据库,以提高土壤磷素的时空表达准确度.水稻是我国最重要的粮食作物之一,在中国已有7 000多年的种植历史,面积为 $46 \times 10^6 \text{ hm}^2$,产量约占我国粮食总产量的一半以上^[24].福建省素有“八山一水一分田”的地貌特征,水稻土是该省最重要的农业土壤,占耕地总面积的80%以上.据估算,2019年全省水稻产量达到粮食总产量的80%,但是磷肥施用量也高达15.5万t,这在该地区高温多雨的气候条件下有可能造成土壤磷素大量淋失,进而产生水体富营养化等环境问题^[25].为此,本研究基于1982年全国第二次土壤普查1 471个、2008年农业农村部测土配方施肥项目215 534个和2018年农业农村部耕地质量监测项目2 895个表层水稻土样点建立的福建省三期1:5万大比例尺土壤数据库,分析全省水稻土有效磷含量在1982~2008年和2008~2018年间的时空动态变化规律,揭示近40年来全省水稻土有效磷含量的富集效应,并评估其潜在的生态风险,以期为我国亚热带地区稻田土壤的磷肥管理措施制定和环境生态风险防控提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省($23^{\circ}33' \sim 28^{\circ}20' \text{ N}$, $115^{\circ}50' \sim 120^{\circ}40' \text{ E}$)地处我国东南沿海,辖厦门一个副省级市和福州、莆田、龙岩、三明、漳州、泉州、南平和宁德这8个地级市,属于暖热湿润的亚热带海洋性季风气候(图1).根据1973~2003年福建省66个气象站点统计表明,全省年均气温在 $14.6 \sim 21.3^{\circ} \text{ C}$ 之间,年均降水量 $1\,037 \sim 2\,051 \text{ mm}$,气候温暖,雨量充沛.基于本研究最新建立的福建省1:5万大比例尺土壤数据库统计结果,全省土壤类型以红壤面积最大,占全省土壤总面积的71.4%;水稻土则是全省分布最广的耕作土壤,占全省土壤总面积的14.9%,其它土壤类型(滨海盐土、潮土、风沙土、山地草甸土、石灰土和新积土等)的面积相对较小^[23].

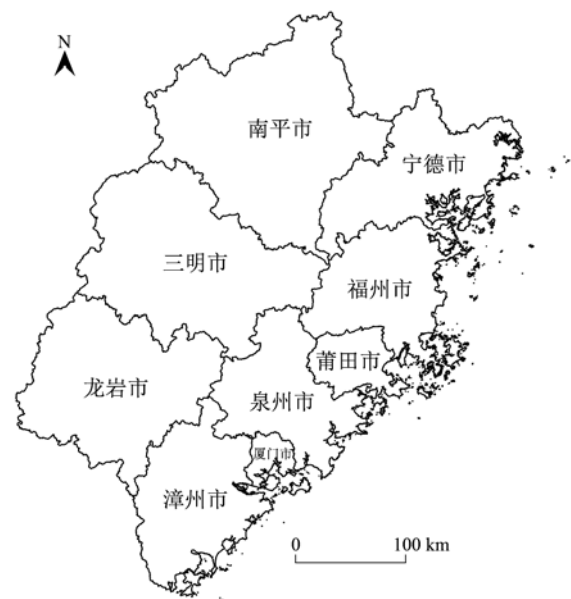


图1 福建省地理信息

Fig. 1 Map of Fujian province

1.2 数据来源

本研究中的1:5万大比例尺土壤数据库由空间和属性数据库两部分组成.空间数据库来源于1982年全国第二次土壤普查的福建省各个县(市、区)1:5万土壤纸质图,通过扫描、配准和数字矢量化等过程建立而成,共计水稻土图斑181 756个.水稻土土壤图的基本分类单元为土种,共计49个土种,分别归属7个亚类和17个土属,所有土壤图的制图单元均采用中国土壤发生分类系统(genetic soil classification of china, GSCC).属性数据库包括水稻土样点理化性质信息,如样点位置描述、土层深度、容重、pH、全磷、全氮和全钾含量等字段;其中,土壤有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定^[26].1982年1 471个水稻土表层样点资料来自于第二次土壤普查福建省各个县(市、区)土种志中记录的土壤剖面数据[图2(a)].2008年215 534个表层水稻土样点数据来自于农业农村部福建省测土配方项目[图2(b)].2018年2 895个表层水稻土样点数据来自于农村农业部福建省耕地质量监测项目[图2(c)].土壤属性数据和空间数据的连接采用Shi等^[27]提出的“PKB (pedological knowledge based method)”法.该方法主要借助ArcGIS软件,将土壤剖面点位置与其分布区相邻或相同、成土母质相近或一致、以及土壤类型名称相似或一致作为基本原则,以“县”为基本控制单元将土壤剖面点属性信息连接到空间数据库中相对应图斑上.年均气温和降雨量数据主要来自福建省66个国家气象局站点记录的1973~2003年共31 a气候数据资料,本研究基于反距离权重插值方法建立全省年均气温和年降

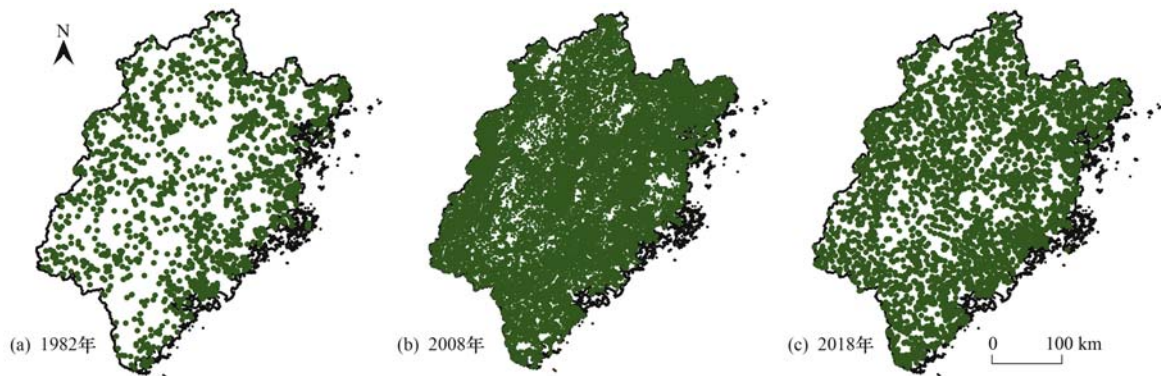


图 2 1982、2008 和 2018 年福建省地区水稻土样点分布

Fig. 2 Distributions of paddy soil sampling sites in Fujian province in 1982, 2008, and 2018

水量分布.

1.3 福建省水稻土有效磷富集程度计算

整个地区 and 不同水稻土亚类、行政区面积加权平均有效磷含量 (available phosphorous content, AP, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、水稻土有效磷富集量 (variation of available phosphorous, VAP, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和水稻土有效磷富集率 (variability of available phosphorous content, VAPC, %) 和水稻土有效磷面积变化量 (area variation of available phosphorous, AVAP, m^2) 计算公式如下^[26]:

$$\text{APS} = \sum_{i=1}^n \text{APS}_i \quad (1)$$

$$\text{AP}_f = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{AP}_i \times \text{APS}_i)}{\sum_{i=1}^n \text{APS}_i} \quad (2)$$

$$\text{VAP} = \text{AP}_{f_1} - \text{AP}_{f_2} \quad (3)$$

$$\text{VAPC} = \frac{\text{VAP}_{(f_1-f_2)}}{\text{AP}_{f_2}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{AVAP} = (\text{AP}_{f_1} - \text{AP}_{f_2}) \times \text{APS}_i \quad (5)$$

式中, APS 为研究区水稻土或各水稻土亚类的总面积 (m^2), APS_i 为第 i 个土壤图斑的面积 (m^2), AP_i 为第 i 个土壤图斑表层水稻土 (0 ~ 20 cm) 中有效磷含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), n 为图斑数. AP_f 为水稻土 1982、2008 或 2018 年土壤磷含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), f 为年份 (f_1 为 2008 年或 2018 年; f_2 为 1982 年或 2008 年).

1.4 福建省水稻土有效磷潜在生态风险评价

本研究采用相对风险系数评价福建省水稻土磷富集的潜在生态风险程度^[28]:

$$\text{相对风险系数} = \frac{\text{水稻土有效磷实际值}}{\text{水稻土有效磷生态风险临界值}} - 1 \quad (6)$$

由于福建省有关水田土壤有效磷含量生态风险临界值的研究至今少见报道, 仅有章明清等^[29]的研究认为全省菜地土壤 ω (有效磷) 临界值为 42.8

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 故式 (6) 中临界值参考鲁如坤等^[30] 在相同气候带的研究: 我国南方红壤区水田土壤有效磷含量生态风险临界值为 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 本研究首先将福建省 2008 年和 2018 年有效磷含量富集量 $\leq 0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的水田土壤划分为无风险区, 然后采用 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为临界值, 借助 ArcGIS 软件计算出全省 2008 年和 2018 年有效磷含量富集量 $> 0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤的相对风险系数, 并采用 SPSS 统计软件中的动态聚类分析模型 (dynamical clustering methods) 对相对风险系数进行自动分区, 根据分区范围将全省水稻土有效磷含量富集生态风险划分为低风险区 (0 ~ 0.515)、中风险区 (0.515 ~ 2.090) 和高风险区 (2.090 ~ 4.084)^[28].

1.5 数据分析与处理

本研究中 1982、2008 和 2018 年福建省 3 个时期水稻土有效磷含量数据库建立和相关图件制作均在 ArcGIS 10.2 中完成. 基于 ArcGIS 10.2 绘图模块, 绘制出 3 个时期的水稻土有效磷含量空间分布, 然后对不同时期水稻土有效磷含量进行空间叠加分析, 得到 1982 ~ 2008、2008 ~ 2018 和 1982 ~ 2018 年的水稻土有效磷含量富集分布. 不同时期水稻土有效磷含量低风险区、中风险区和高风险区的相对风险系数划分采用 SPSS 22.0 软件的动态聚类分析模型 (DCM), 水稻土有效磷含量、富集率和风险区面积等统计均在 Excel 2019 中完成, 相关柱状和折线图利用 Origin 2018 软件绘制.

2 结果与分析

2.1 福建省 40 年来水稻土有效磷富集时空变化特征

2.1.1 有效磷富集总体变化特征

从福建省目前最详细的 1:5 万大比例尺土壤数据库统计来看, 全省共有水稻土图斑 181 756 个, 总面积为 $1.80 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 1982、2008 和 2018 年这 3 个时期的水稻土表层 (0 ~ 20 cm) 面积加权平均值

所得 ω (有效磷) 分别为 9.55、37.50 和 56.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 进一步从水稻土有效磷含量空间分布来看(图 3), 1982 年福建省水稻土有效磷总体呈由西向东递减的趋势; 其中, ω (有效磷) 较高 ($>50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻土主要分布在西部和西南部地区, 面积为 $4.37 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 2.42%; ω (有效磷) 较低 ($<10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻土主要分布在福建省南部和东部地区, 面积为 $1.26 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 70.05%. 2008 年全省水稻土有效磷含量空间分布格局与 1982 年差异较大, 总体呈由南到北、由东到西递减的趋势;

ω (有效磷) 较高 ($>50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻土主要分布在福建省南部, 面积为 $4.15 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 23.01%; ω (有效磷) 较低 ($<10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻土主要分布在福建省北部和中部地区, 面积为 $4.35 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 24.11%. 2018 年 ω (有效磷) 较高 ($>50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻土主要分布在福建省南部和东南部, 面积为 $7.59 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 45.10%; ω (有效磷) 较低 ($<10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻土主要分布在福建省北部和中部地区, 面积为 $1.31 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 7.24%.

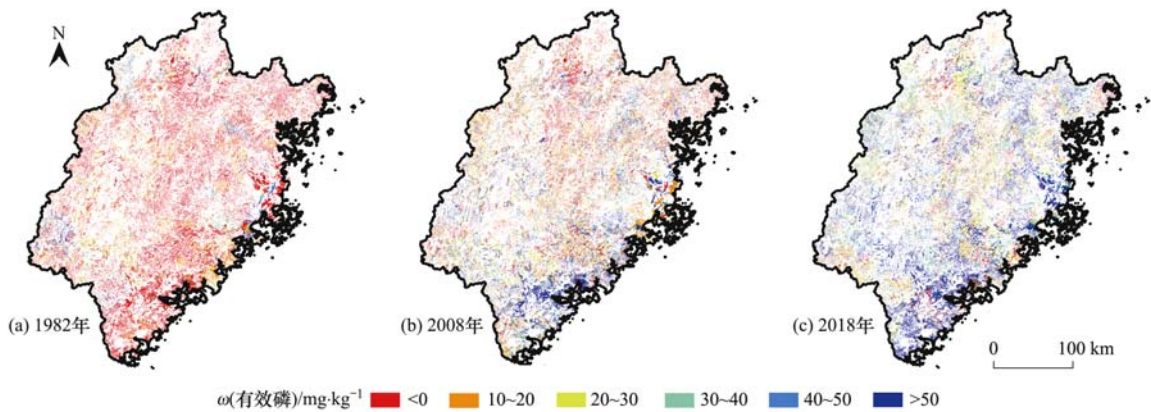


图 3 1982、2008 和 2018 年福建省不同时期水稻土有效磷含量 (AP) 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of available phosphorus content of paddy soil in Fujian province in 1982, 2008, and 2018

从图 4 可以看出, 近 40 年来福建省水稻土有效磷含量呈明显的富集趋势. 进一步统计表明, 1982 ~ 2018 年间福建省水稻土 ω (有效磷) 共增加了 47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 富集面积达到 $1.65 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占全省水稻土总面积的 91%; 其中, 1982 ~ 2008 年间全省水稻土 ω (有效磷) 增加了 28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 富集面积约为 $1.47 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占全省水稻土总面积的 82%; 2008 ~ 2018 年间全省水稻土 ω (有效磷) 增加了 19 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 富集面积为 $1.22 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占全省水稻

土总面积的 69%. 从空间分布来看, 1982 ~ 2008 年间福建省水稻土有效磷富集量大部分集中于 0 ~ 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 约占全省水稻土总面积的 23%, 主要分布于东部和东北部; 2008 ~ 2018 年间福建省水稻土有效磷富集量大部分集中于 20 ~ 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 约占全省水稻土总面积的 22%, 主要分布于北部和中部. 1982 ~ 2018 年近 40 年间福建省水稻土有效磷富集量大部分集中于 20 ~ 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 约占全省水稻土总面积的 28%, 主要分布于中部和北部.

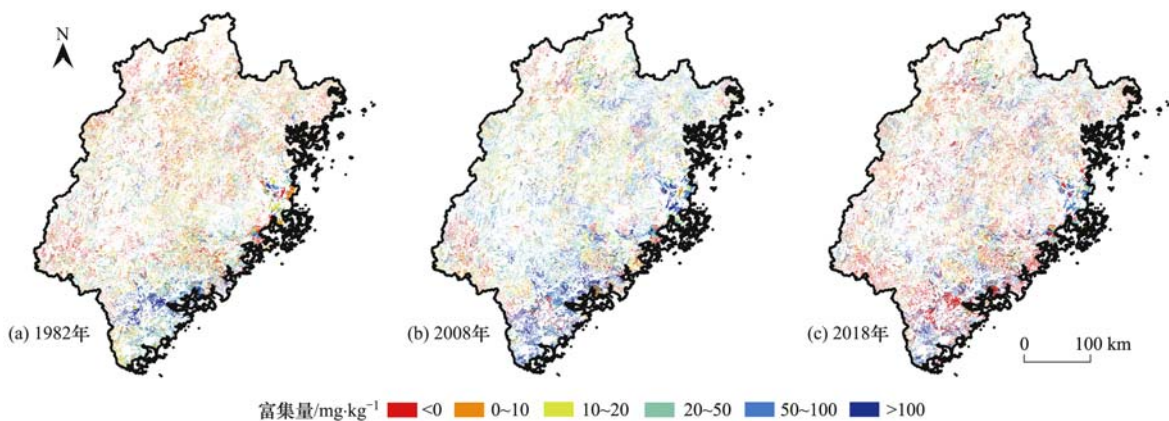


图 4 1982、2008 和 2018 年福建省不同时期水稻土有效磷富集量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of enrichment of paddy soil available phosphorus in Fujian province in 1982, 2008, and 2018

2.1.2 水稻土类型对有效磷富集时空变化的影响

不同时期福建省水稻土各亚类的有效磷含量差异很大(图 5). 1982 年全省 ω (有效磷)最高的是潜育水稻土和渗育水稻土,分别达到 $10.29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而 ω (有效磷)最低的是咸酸水稻土和淹育水稻土,分别仅为 $3.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 其余水稻土亚类的 ω (有效磷)介于 $6.33 \sim 8.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 2008 年全省 ω (有效磷)最高的是淹育水稻土和潜育水稻土,分别达到 $95.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $48.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而 ω (有效磷)最低的是咸酸水稻土和潜育水稻土,分别仅为 $16.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $22.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其余水稻土亚类的 ω (有效磷)介于 $31.70 \sim 43.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 2018 年全省 ω (有效磷)最高的是咸酸水稻土和盐渍水稻土,分别为 $78.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $67.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而淹育水稻土和潜育水稻土的 ω (有效磷)相对较低,分别为 $40.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $43.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其余水稻土亚类的 ω (有效磷)介于 $45.05 \sim 63.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间.

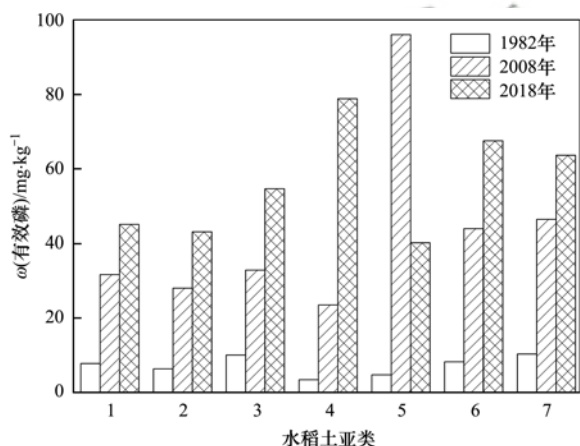


图 5 1982、2008 和 2018 年福建省不同水稻土亚类有效磷含量分布

Fig. 5 Distribution of available phosphorus content of different paddy soil subgroups in Fujian province in 1982, 2008, and 2018

由图 6 可以看出, 1982 ~ 2018 年近 40 年来福建省水稻各土亚类有效磷含量均呈现出明显的富集趋势. 1982 ~ 2008 年间淹育水稻土和潜育水稻土的 ω (有效磷)富集量最大,分别增加了 $90.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $38.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其余亚类 ω (有效磷)富集量介于 $20.13 \sim 23.92 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 2008 ~ 2018 年间咸酸水稻土和盐渍水稻土 ω (有效磷)富集量最大,分别增加了 $62.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $28.80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 除了淹育水稻土,其余亚类 ω (有效磷)富集量介于 $14.97 \sim 22.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6). 从水稻土亚类有效磷含量富集面积来看, 1982 ~ 2018 年渗育水稻土富集面积最

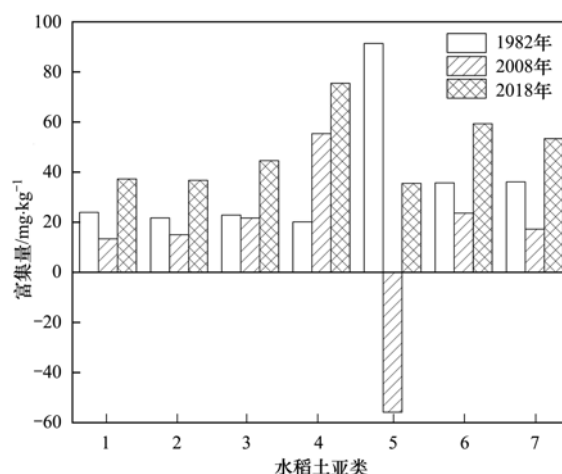


图 6 1982、2008 和 2018 年福建省不同水稻土亚类有效磷富集量分布

Fig. 6 Enrichment of available phosphorus of paddy soil subgroups in Fujian province in 1982, 2008, and 2018

大,达到 $5.68 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占该亚类水稻土总面积的 65.69%,而富集面积最小的是咸酸水稻土,仅为 93 hm^2 ,但占该亚类水稻土总面积的 95.31%.

2.1.3 坡度对有效磷富集时空变化的影响

不同时期各个坡度下福建省水稻土有效磷含量差异很大,但总体呈现出随坡度上升而下降的趋势(图 7). 进一步由图 8 可知, 1982 年分布在坡度 $2^\circ \sim 6^\circ$ 范围内的水稻土有效磷含量最高,平均值达到 $10.28 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,面积为 $0.28 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全省水稻土总面积的 15.79%,主要土壤类型为比较肥沃的潜育水稻土和渗育水稻土;而分布在坡度 $>25^\circ$ 范围内的水稻土 ω (有效磷)最低,平均值为 $8.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,面积为 $0.02 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全省水稻土总面积的 1.31%,主要土壤类型为渗育型水稻

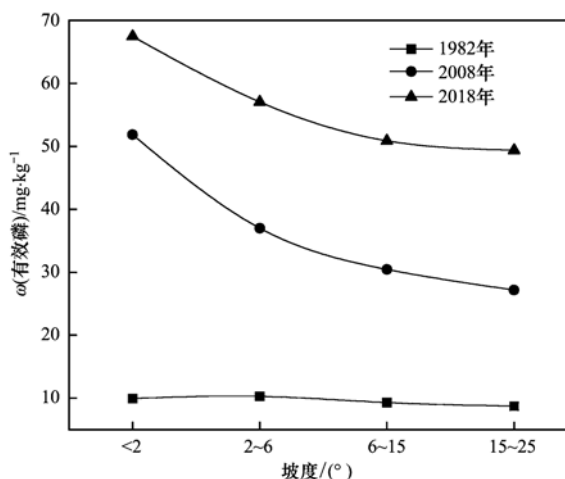


图 7 不同时期各个坡度下水稻土有效磷含量分布

Fig. 7 Distribution of available phosphorus content under different slopes

土和潜育型水稻土. 2008 年分布在坡度小于 2° 以下的水稻土 ω (有效磷) 最高, 平均值为 $51.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 面积为 $0.56 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 30.88%, 主要土壤类型为淹育水稻土和潜育水稻土, 而分布在坡度 $15^\circ \sim 25^\circ$ 范围内的水稻土 ω (有效磷) 最低, 平均值为 $27.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 面积为 $0.31 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 17.33%, 主要土壤类型为渗育型水稻土和潜育型水稻土. 2018 年福建省也是分布在 2° 以下的水稻土 ω (有效磷) 最高, 平均值为 $67.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 面积为 $0.56 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 30.88%, 主要土壤类型为淹育水稻土和潜育水稻土, 而分布在坡度 $>25^\circ$ 范围内的水稻土 ω (有效磷) 最低, 平均值为 $48.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 面积为 $0.02 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的 1.31%, 主要土壤类型为渗育型水稻土和潜育型水稻土.

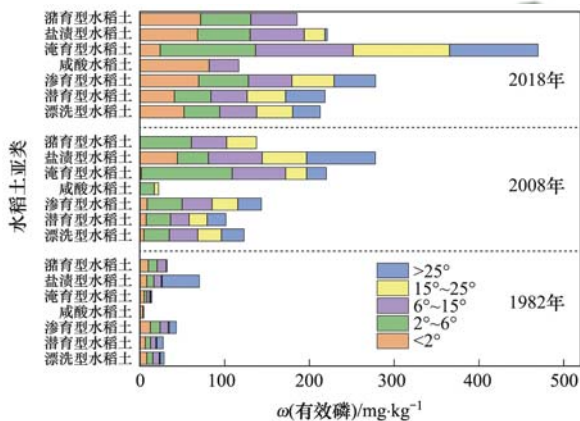


图8 不同时期各个坡度下水稻土亚类有效磷含量分布

Fig. 8 Distribution of available phosphorus content of paddy soil subgroups under different slopes

2.2 福建省有效磷生态风险时空变化特征

2.2.1 有效磷生态风险总体变化特征

福建省 1982 ~ 2008 年和 1982 ~ 2018 年的水稻土磷素富集潜在生态风险面积分别为 $5.48 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $9.10 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省水稻土总面积的

30.38% 和 50.58%. 从空间分布来看(图9), 福建省水稻土磷素富集低风险区主要位于西部及北部, 中、高风险区主要位于闽南和闽东南的沿海. 从不同地级市来看, 漳州市水稻土的磷素富集风险面积最大, 且以高风险区为主, 2008 年和 2018 年该市磷素富集风险面积分别达到 $1.66 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $2.24 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全省磷素富集风险总面积的 30.29% 和 24.61%.

2.2.2 水稻土类型对有效磷生态风险的影响

由图 10 可以看出, 福建省 2008 ~ 2018 年各水稻土亚类的磷素富集潜在风险面积总体呈增加趋势; 其中 2008 年渗育水稻土在低风险和中风险级别中分布面积均最大, 潜育水稻土在高风险级别中分布面积最大; 而 2018 年渗育水稻土在低风险和高风险级别中分布面积均最大, 潜育水稻土在中风险级别中分布面积最大. 可见, 2008 年和 2018 年福建省水稻土中存在磷素生态风险的主要是渗育和潜育. 因此, 福建省未来应重点加强渗育和潜育水稻土的磷素富集生态风险防控. 福建省 2008 年咸酸水稻土无磷素富集生态风险面积, 而由于沿海开发 2018 年该亚类有 87 hm^2 呈现出磷素富集状态.

2.2.3 坡度对有效磷生态风险的影响

由图 11 可知, 福建省水稻土磷素富集潜在生态风险区主要分布在坡度低于 2° 的范围内, 2008 年和 2018 年的面积分别为 $2.42 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $3.49 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 分别占全省水稻土磷素富集生态风险总面积的 44.19% 和 38.37%, 这主要是因为在该坡度下水稻土亚类主要为潜育水稻土和渗育水稻土. 其中, 潜育水稻土 2008 年和 2018 年的面积分别为 $1.40 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 和 $2.01 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 分别占该坡度下水稻土磷素富集生态风险总面积的 57.84% 和 57.60%; 渗育水稻土 2008 年和 2018 年的面积分别为 $5.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $8.86 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 分别占该坡度下水稻土磷素富集生态风险总面积的 22.37% 和 24.78%. 进

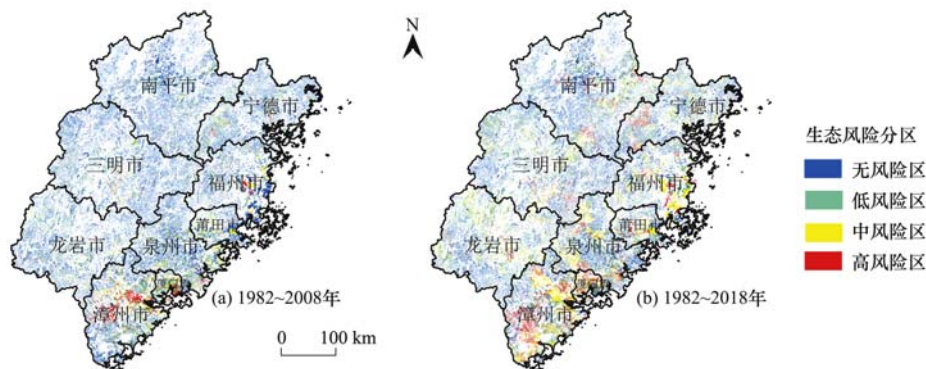
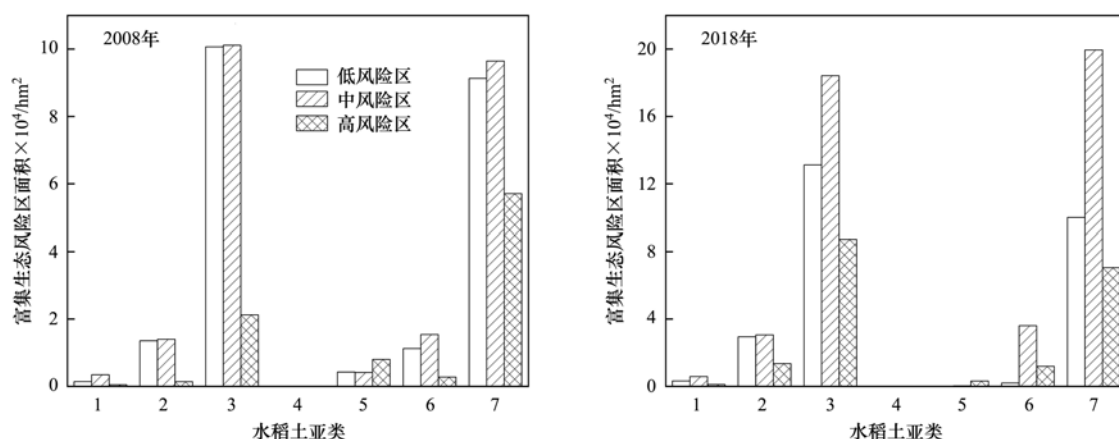


图9 福建省水稻土磷素富集生态风险分区

Fig. 9 Ecological risk zoning map of available phosphorus enrichment in paddy soils in Fujian province



1. 漂洗型水稻土; 2. 潜育型水稻土; 3. 渗育型水稻土; 4. 咸酸型水稻土; 5. 淹育型水稻土; 6. 盐渍型水稻土; 7. 潜育型水稻土

图 10 水稻土亚类磷素富集生态风险分区面积分布

Fig. 10 Area of ecological risk zone of available phosphorus enrichment in paddy soil subgroups

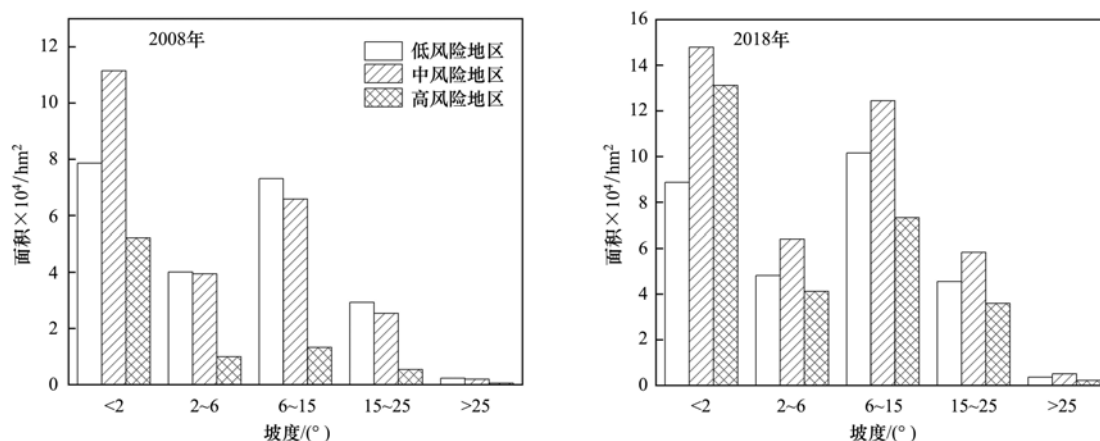


图 11 水稻土坡度磷素富集生态风险分区面积分布

Fig. 11 Area of ecological risk zone of available phosphorus enrichment in paddy soils of slopes

一步统计表明,福建省地形坡度 $<2^\circ$ 和 $6^\circ \sim 15^\circ$ 的水稻土面积合计占全省水稻土总面积的 21.85% 和 36.96%,故坡耕地在一定程度上加大了磷素的流失风险。

3 讨论

3.1 福建省水稻土有效磷富集时空变化的影响因素

1982 ~ 2018 年近 40 年来福建省水稻土的有效磷含量总体呈明显增加趋势,增幅达到 493%,这与已有研究认为的“第二次土壤普查以来我国表层土壤有效磷含量呈上升趋势”的结果相一致^[31]。福建省水稻土有效磷含量上升的主要原因是该地区磷肥和复合肥施用量大幅度增加(图 12)。据统计,1982、2008 和 2018 年福建省磷肥折纯施用量分别为 66、125 和 115 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,复合肥折纯施用量分别为 11、230 和 235 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,磷肥和复合肥的逐年增加可显著提高土壤有效磷含量^[32]。

从空间分布来看,1982 年土壤有效磷含量较高的水稻土主要分布在福建省西部和西南部地区是由

于这些区域温度低 ($18.5 \sim 19.5^\circ\text{C}$) 且降雨量小 ($1649 \sim 1673 \text{ mm}$),低温干燥的气候不易于枯枝落叶等含磷有机物质被微生物分解,有利于磷素积累^[33];另外,这些有机物质也可以络合 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,促进沉淀态磷的溶解,从而提高土壤有效磷含量^[33,34]。1982 年土壤有效磷含量较低的水稻土主要分布在福建省南部、东北部和东南部地区,这主要是因为该区域温度高 ($19.3 \sim 21.0^\circ\text{C}$) 且降水量大 ($1522 \sim 1743 \text{ mm}$),高的温度和降雨加速了土壤矿物脱硅富铁铝化过程,而铁铝氧化物能促进磷素固定,降低土壤有效磷含量^[35]。2008 年土壤有效磷含量较高的水稻土主要分布在福建省南部是由于该地区年均施肥量较大 ($5.32 \times 10^4 \text{ t}$),远高于其他区域。2008 年土壤有效磷含量较低的水稻土主要分布在福建省北部和中部是因为这些区域年均磷肥施用量比较小 ($1.67 \times 10^4 \text{ t}$)。2018 年福建省水稻土有效磷含量空间分布格局与 2008 年基本相似,总体呈由南到北、由东到西递减的趋势,且南北差异明显。本研究所得的研究结果也与刘占军^[36]认为我

国南方低产水稻土有效磷整体呈东南高、西南低的趋势相一致。

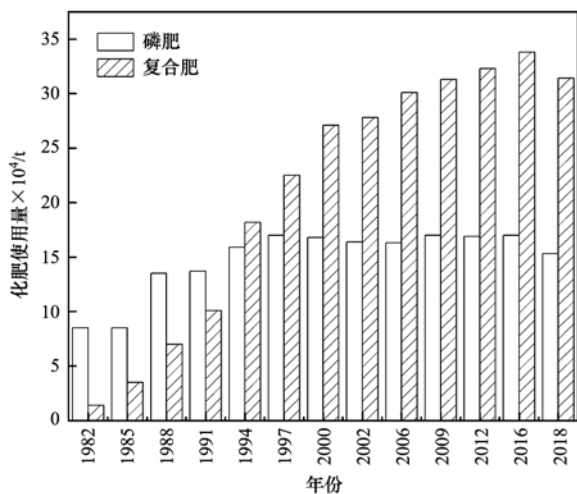


图 12 1982~2018 年福建省磷肥和复合肥
施用量(折纯)的年际变化

Fig. 12 Inter-annual variation in P- and C-fertilizer
application rates from 1982 to 2018

从不同土壤亚类来看,1982 年福建省有效磷含量最高的是潴育水稻土和渗育水稻土,这是因为前者多发育于沉积母质,一般分布在河谷平原,耕作历史悠久,长期的施肥导致土壤有机物质含量丰富;后者主要分布于丘陵和山地,高海拔地区不利于有机物质的微生物分解,易于有效磷含量的积累^[37]. 1982 年咸酸水稻土有效磷含量最低是因为该亚类多为沿海地区酸性硫酸盐土经人为围垦种植水稻后形成的,一般分布在河口附近,土壤呈现酸性,当 pH 低于 5.5 时,PO₄³⁻ 易与 Al³⁺ 和 Fe²⁺ 结合,形成难溶性磷酸盐,不利于有效磷含量的积累. 1982 年淹育水稻土的有效磷含量也较低是由于该亚类垦殖时间短,水耕的影响常限于表层,物质淋溶较弱,有机物质积累少,土壤中有效磷含量低^[38]. 2008 年淹育水稻土的有效磷含量最高是因为该亚类黏粒和粉粒含量之和介于 34%~45%,明显高于其他亚类. 有研究表明,土壤中黏粒和粉粒含量越高,其有效磷含量也越高^[39]. 2008 年潴育水稻土有效磷含量也较高是由于该亚类是高产土壤,长期大量施肥导致其有效磷含量积累多. 2008 年潜育水稻土有效磷含量低是因为该亚类有机质从 1982 年的 46.56 g·kg⁻¹ 下降到 2008 年的 29.15 g·kg⁻¹,有效磷含量与有机质含量呈显著正相关^[33]. 2018 年咸酸水稻土有效磷含量最高是因为近 10 多年来国家加强了福建省沿海地区该类土壤的开发,磷肥大量施加后导致其有效磷含量发生了很大变化^[40]. 2018 年盐渍水稻土有效磷含量也较高是由于该亚类初期土壤不易脱盐,地下水不易淡化,导致营养元素匮乏,但随水稻长期

种植和肥料的大量施加,利用稻田淹水特性,水分将盐分下压,改良了土壤环境,导致其有效磷含量增加^[41].

有研究表明,坡度与土壤磷素流失量之间存在密切的相关性,而福建省具有“八山一水一分田”的地貌特点,地形对该地区水稻土有效磷含量的再分配起着重要支配作用^[42]. 从本研究来看,随着坡度的增大,由于易发生水土流失和农业管理困难,福建省不同时期水稻土有效磷含量总体呈下降趋势,尤其是 2008 年和 2018 年有效磷含量明显比 1982 年下降,这主要与各个时期有效磷含量本底含量大小有关. 在 1982 年福建省不同坡度水稻土磷肥施用量皆普遍较低,导致各个坡度有效磷含量都较小且差异不大,即使在不同坡度发生水土流失程度不一样的情况下也没有明显差异;而随着我国经济和农业生产发展,2008 年和 2018 年福建省水稻土磷肥施用量明显增大,且由于不同坡度的交通便利和农业管理难易程度不一样,导致磷肥施用量也有很大差异,在发生水土流失的情况下,坡度大的地区有效磷含量淋失多,而坡度小的地区有效磷含量淋失少,造成了各个坡度下有效磷含量差异明显.

3.2 福建省水稻土有效磷生态风险的影响因素

由图 4 可知,福建省水稻土磷素富集量最高的区域主要分布在沿海,这些地区的有效磷含量有可能通过土壤侵蚀、地表径流等途径流失进入水体中,进而诱发水体富营养化等环境问题,这与很多学者的研究结论相吻合. 如黄东风等^[43]对福建省面源污染事件分析统计发现,2002 年以来全省重要水域的水质持续恶化,其中农业化学肥料的过量施用和水土流失是主要因素;谢丽云^[44]的研究认为,福建省湄洲湾周边地区农业化肥污染源所排放的氨氮和全磷分别占污染总排放量的第一位和第二位;陈奇亮^[45]对福建省近岸海域水体氮磷分析表明,宁德市和厦门市附近海域活性磷酸盐超标率较高,水质较差. 进一步从本研究来看(图 9),福建省水稻土磷素富集低风险区主要位于西部及北部,这主要由于该区域(南平市、龙岩市和三明市)具有全省 80% 以上的森林. 有研究表明,耕地土壤磷素流失较高,而林地土壤磷素流失较低^[46]. 福建省水稻土磷素富集中、高风险区主要位于闽南和闽东南的沿海,这主要与该区域经济高速发展下农业集约化程度高和耕地施肥量大有关. 从不同地级市来看,漳州市水稻土有效磷含量富集风险区最大且以高风险区为主,这主要是因为该市为福建省农业大市,2016 年全市农作物播种面积达 2.65 × 10⁶ hm²,化肥施用量高达 4.03 × 10⁸ kg,导致磷素流失风险高^[47].

从不同亚类来看(图 10), 2008 年和 2018 年全省存在磷素生态风险的主要是渗育和潜育水稻土, 这一方面是由于这两个土壤类型在福建省分布面积最广, 分别占全省水稻土总面积的 47.90% 和 33.76%; 另一方面近 40 年来全省耕地施肥量明显增加, 导致这两种亚类的磷素风险面积也增大。2018 年福建省有部分咸酸水稻土出现磷素富集状态, 主要是由于近年来国家加大了该亚类的开发利用, 增加的农业投入, 提高了其有效磷含量^[40]。

从不同坡度来看(图 11), 福建省水稻土磷素富集潜在生态风险区主要分布于平坦地带或河流沿岸低于 2° 的区域, 土壤类型大多为潜育和渗育水稻土。但是随着坡度升高, 水稻土磷素富集生态风险面积呈现出“降-升-降”的趋势, 主要的原因是福建省位于亚热带湿润气候区, 降雨强度大且降雨量多, 容易发生土壤侵蚀和地表径流, 而坡度与它们密切相关, 尤其在坡度 6° ~ 12° 范围内的磷素流失量急剧增大, 15° 以后磷流失量增加减缓, 这也进一步说明地形对该地区有效磷含量有明显的再分配作用。

4 结论

基于不同时期 20 多万个实测样点数据建立的三期 1:5 万大比例尺土壤数据库, 分析福建省水稻土有效磷含量近 40 年来的富集效应及潜在生态风险。结果表明, 1982 ~ 2018 年间福建省水稻土 ω (有效磷) 增加了 $47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 富集面积占全省水稻土总面积的 91%, 主要分布于中部和东北部。从不同水稻土类型来看, 1982 ~ 2018 年间福建省水稻土各亚类中咸酸水稻土有效磷含量上升得最多, 增加了 $75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他亚类介于 $36 \sim 59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。潜在生态风险评估表明, 2008 年和 2018 年福建省水稻土磷素富集生态风险区主要分布于闽南和闽东南沿海, 其中漳州市是最主要的生态风险区, 且以中高风险区为主; 在水稻土亚类中, 2008 年和 2018 年存在磷素富集潜在生态风险的主要是坡度低于 2° 的渗育和潜育水稻土。今后的农业管理中, 应根据不同水稻土类型、地形地貌区和行政区的磷素富集程度适当控制化肥施用量, 以防止水体富营养化等环境问题发生是非常必要的。

参考文献:

- [1] Alewell C, Ringeval B, Ballabio C, *et al.* Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2020, **11** (1), doi: 10.1038/s41467-020-18326-7.
- [2] Nishigaki T, Tsujimoto Y, Rakotoson T, *et al.* Soil phosphorus retention can predict responses of phosphorus uptake and yield of rice plants to P fertilizer application in flooded weathered soils in the central highlands of Madagascar [J]. *Geoderma*, 2021, **402**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115326.
- [3] 刘鑫, 史斌, 孟晶, 等. 白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征[J]. *环境科学*, 2020, **41** (5): 2127-2136.
Liu X, Shi B, Meng J, *et al.* Spatio-temporal variations in the characteristics of water eutrophication and sediment pollution in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (5): 2127-2136.
- [4] Hansel F D, Amado T J C, Diaz D A R, *et al.* Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance [J]. *Agronomy Journal*, 2017, **109** (6): 2936-2944.
- [5] 都江雪, 柳开楼, 黄晶, 等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应 [J]. *土壤学报*, 2021, **58** (2): 476-486.
Du J X, Liu K L, Huang J, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to phosphorus balance in paddy soil in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58** (2): 476-486.
- [6] Gong H Q, Meng F L, Wang G H, *et al.* Toward the sustainable use of mineral phosphorus fertilizers for crop production in China: From primary resource demand to final agricultural use [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **804**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150183.
- [7] 许晓光, 李裕元, 孟岑, 等. 亚热带区稻田土壤氮磷淋失特征试验研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32** (5): 991-999.
Xu X G, Li Y Y, Meng C, *et al.* The characteristics of nitrogen and phosphorus leaching in a paddy soil in subtropics [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32** (5): 991-999.
- [8] Yang H Q, He K K, Lu D P, *et al.* Removal of phosphate by aluminum-modified clay in a heavily polluted lake, Southwest China: effectiveness and ecological risks [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135850.
- [9] 张雷, 曹伟, 马迎群, 等. 大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 [J]. *环境科学*, 2016, **37** (5): 1677-1684.
Zhang L, Cao W, Ma Y Q, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in the tidal reach and estuary of the Daliao river and analysis of potential eutrophication [J]. *Environmental Science*, 2016, **37** (5): 1677-1684.
- [10] Isiuku B O, Enyoh C E. Pollution and health risks assessment of nitrate and phosphate concentrations in water bodies in South Eastern, Nigeria [J]. *Environmental Advances*, 2020, **2**, doi: 10.1016/j.envadv.2020.100018.
- [11] Sattari S Z, Bouwman A F, Giller K E, *et al.* Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109** (16): 6348-6353.
- [12] MacDonald G K, Bennett E M, Taranu Z E. The influence of time, soil characteristics, and land-use history on soil phosphorus legacies: A global meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18** (6): 1904-1917.
- [13] Reijneveld J A, Ehler P A I, Termorshuizen A J, *et al.* Changes in the soil phosphorus status of agricultural land in the Netherlands during the 20th century [J]. *Soil Use and Management*, 2010, **26** (4): 399-411.
- [14] Li H, Huang G, Meng Q, *et al.* Integrated soil and plant phosphorus management for crop and environment in China. A review [J]. *Plant and Soil*, 2011, **349** (1-2): 157-167.
- [15] Ma J C, He P, Xu X P, *et al.* Temporal and spatial changes in

- soil available phosphorus in China (1990-2012) [J]. *Field Crops Research*, 2016, **192**: 13-20.
- [16] 武红亮, 王士超, 闫志浩, 等. 近 30 年我国典型水稻土肥力演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, **24**(6): 1416-1424.
- Wu H L, Wang S C, Yan Z H, *et al.* Evolution characteristics of fertility of typical paddy soil in China in recent 30 years [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(6): 1416-1424.
- [17] 黄继川, 彭智平, 徐培智, 等. 广东省水稻土有机质和氮、磷、钾肥力调查[J]. *广东农业科学*, 2014, **41**(6): 70-73.
- Huang J C, Peng Z P, Xu P Z, *et al.* Investigation on organic matter, nitrogen, phosphorus and potassium of paddy soil in Guangdong Province [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, **41**(6): 70-73.
- [18] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征—变异函数与 Kriging 插值分析[J]. *地理学报*, 2000, **1**(5): 555-566.
- Guo X D, Fu B J, Chen L D, *et al.* The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province: Semivariogram and Kriging analysis [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **1**(5): 555-566.
- [19] 李春林, 陈敏旺, 王寅, 等. 吉林省农田耕层土壤速效磷、钾养分的时空变化特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2019, (4): 16-23.
- Li C L, Chen M W, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial variability of available phosphorus and potassium in cropland topsoil of Jilin Province [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, (4): 16-23.
- [20] 陈睿, 丁安娜, 施加春. 浙江省温岭市土壤 pH 及氮磷钾养分时空动态变化特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, **47**(4): 517-526.
- Chen J, Ding A N, Shi J C. Spatio-temporal variation characteristics of soil pH, nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in Wenling City of Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2021, **47**(4): 517-526.
- [21] Lin J S, Shi X Z, Lu X X, *et al.* Storage and spatial variation of phosphorus in paddy soils of China [J]. *Pedosphere*, 2009, **19**(6): 790-798.
- [22] 张黎明, 李加加, 于东升, 等. 不同制图比例尺土壤数据库对旱地磷储量估算的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(11): 1626-1633.
- Zhang L M, Li J J, Yu D S, *et al.* Map scale effects on soil total phosphorus storage for uplands of China [J]. *Ecology and Environment*, 2011, **20**(11): 1626-1633.
- [23] 陈中星, 张楠, 张黎明, 等. 福建省土壤有机碳储量估算的尺度效应研究[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(3): 606-619.
- Chen Z X, Zhang N, Zhang L M, *et al.* Scale effects of estimation of soil organic carbon storage in Fujian Province, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(3): 606-619.
- [24] Zhang L M, Zhuang Q L, Zhao Q Y, *et al.* Uncertainty of organic carbon dynamics in Tai-Lake paddy soils of China depends on the scale of soil maps [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **222**: 13-22.
- [25] 国家统计局. 2019 福建统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [26] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [27] Shi X Z, Yu D S, Warner E D, *et al.* Cross-reference system for translating between genetic soil classification of China and soil taxonomy [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(1): 78-83.
- [28] 张瑜, 张黎明, 周碧青, 等. 基于 GIS 技术的耕地有效磷富集与生态风险评价——以福建省泰宁县为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(2): 326-336.
- Zhang Y, Zhang L M, Zhou B Q, *et al.* Enrichment and ecological risk assessment of available phosphorus in farmland soils by GIS technology—a case study of Taining county in Fujian [J]. *Journal of agro-Environment Science*, 2015, **34**(2): 326-336.
- [29] 章明清, 姚宝全, 李娟, 等. 福建菜田氮、磷积累状况及其淋失潜力研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(1): 148-155.
- Zhang M Q, Yao B Q, Li J, *et al.* N and P accumulation status and their leaching potential in vegetable fields in Fujian Province [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(1): 148-155.
- [30] 鲁如坤, 时正元. 退化红壤肥力障碍特征及重建措施Ⅲ. 典型地区红壤磷素积累及其环境意义 [J]. *土壤*, 2001, **33**(5): 227-231, 238.
- Lu R S, Shi Z Y. Fertility restoration of degraded red soilⅢ. Accumulation of phosphorus in red soil and its possible effect on environment [J]. *Soils*, 2001, **33**(5): 227-231, 238.
- [31] Chen S, Lin B W, Li Y Q, *et al.* Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China [J]. *Geoderma*, 2020, **357**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113937.
- [32] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1921-1929.
- Zhu H Y, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1921-1929.
- [33] 钟聪, 李小洁, 何园燕, 等. 广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究 [J]. *地理科学*, 2020, **40**(3): 478-485.
- Zhong C, Li X J, He Y Y, *et al.* Spatial variation of soil organic matter and its influencing factors in Guangxi, China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(3): 478-485.
- [34] Fink J R, Inda A V, Tiecher T, *et al.* Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability [J]. *Ciência e Agrotecnologia*, 2017, **40**(4): 369-379.
- [35] Neufeldt H, Da Silva J E, Ayarza M A, *et al.* Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **31**(1): 30-37.
- [36] 刘占军. 我国南方低产水稻土养分特征与质量评价 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- Liu Z J. Nutrient characteristics and quality assessment of low-yield paddy soils in South China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [37] 沈金泉. 基于高精度土壤数据库的福建省耕地磷储量估算研究 [J]. *土壤通报*, 2020, **51**(1): 79-88.
- Shen J Q. Estimation of soil phosphorus storage in the cropland of Fujian Province based on high-resolution soil database [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(1): 79-88.
- [38] 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 等. 生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 914-921.
- Zhou H H, Yuan X Y, Xiong Y T, *et al.* Effects of biochar input on changes of available nutrient elements in riparian soils with different landuse types [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**

- (2): 914-921.
- [39] 周利军, 武琳, 林小兵, 等. 土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5098-5106.
Zhou L J, Wu L, Lin X B, *et al.* Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5098-5106.
- [40] Zhang W, Zhang Y W, An Y L, *et al.* Phosphorus fractionation related to environmental risks resulting from intensive vegetable cropping and fertilization in a subtropical region [J]. Environmental Pollution, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116098.
- [41] 刘占军, 艾超, 徐新朋, 等. 低产水稻土改良与管理研究策略[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(2): 509-516.
Liu Z J, Ai C, Xu X P, *et al.* Research strategy of reclamation and management for low-yield rice paddy soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, **21**(2): 509-516.
- [42] 张乃明, 余扬, 洪波, 等. 滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素[J]. 环境科学, 2003, **24**(3): 155-157.
Zhang N M, Yu Y, Hong B, *et al.* Factors influencing phosphorus loss by runoff process from farmlands in the Dianchi watershed [J]. Environmental Science, 2003, **24**(3): 155-157.
- [43] 黄东风, 王果, 陈超. 福建省农业面源污染问题及防治对策的研究[J]. 中国农学通报, 2006, **22**(11): 371-377.
Huang D F, Wang G, Chen C. Research of agricultural non-point source pollution issue and prevention and cure countermeasures in Fujian Province [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, **22**(11): 371-377.
- [44] 谢丽云. 福建省湄洲湾海域环境容量研究[J]. 海峡科学, 2017, (9): 3-5, 17.
- [45] 陈奇亮. 福建省近岸海域水体氮磷时空分布特征[J]. 渔业研究, 2019, **41**(2): 130-139.
Chen Q L. The spatial-temporal distribution of the nitrogen and phosphorus in the nearshore area of Fujian Province [J]. Journal of Fisheries Research, 2019, **41**(2): 130-139.
- [46] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 251-262.
Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Characteristics of soil nitrogen and phosphorus losses under different land-use schemes in the Shipanqiu watershed [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 251-262.
- [47] 康智明, 张荣霞, 叶玉珍, 等. 基于 GIS 的福建农田氮磷地表径流流失与污染风险评估[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(12): 1887-1897.
Kang Z M, Zhang R X, Ye Y Z, *et al.* GIS-based pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff in farmlands in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(12): 1887-1897.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)