

目次

“大气十条”实施期间南京市PM_{2.5}化学组成与来源的演变特征 陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位PM_{2.5}组分差异 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)

天津市采暖季不同气团来向PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 邓文博, 刘文娟 (38)

北京市PM_{2.5}-O₃复合污染数值响应解析 刘添强 (48)

长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李旻, 王鑫, 黄成 (58)

南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)

广西柳城县VOCs组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)

城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)

华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)

WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式中的应用 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)

西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 魏文淑, 祁建华, 常成 (127)

中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)

长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金宇辰, 李鑫 (158)

人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共线性 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)

我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 何姝, 董慧峰, 任南琪 (180)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 王思瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)

长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)

渭河微塑料污染现状与风险评价 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)

苦草叶表附和浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)

基于16S rRNA测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)

基于eDNA的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)

三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)

自然降雨下蔬菜土壤侵蚀及氮素流失特征 宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重, 张文龙, 李华林 (303)

基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)

2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)

青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)

四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)

宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进福, 梁翔宇 (356)

铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)

外源Cd在不同类型土壤中的稳定化特征 王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)

基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)

贵州省旱地土壤和玉米As含量特征及其种植安全性评估 黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)

1株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄蔚铭, 张朴心, 铁柏清 (436)

黄土陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (444)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)

优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)

黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)

红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)

半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)

基于QMEC分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)

中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析 于滨杭, 姬建梅, 王丽宇, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)

生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的Meta分析 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)

不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)

中国县城碳排放时空演变与异质性 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)

近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)

中国1991~2018年突发环境事件时空特征及影响因素 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)

季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素

方兵¹, 陈林¹, 王阳¹, 祝亚飞¹, 王瑞², 宋桂芳¹, 刘俊¹, 杨斌², 张世文^{1*}

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001; 2. 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院, 淮南 232001)

摘要: 为了科学合理施用磷肥, 减小对设施农业环境带来的污染风险, 以北京市大兴区设施农业集中区为研究对象, 通过对不同种植年限设施农业剖面土壤(0~100 cm)磷素含量的测定分析, 探究磷素累积与迁移转化特征. 结果表明, 设施农业表层土壤全磷和有效磷含量变化范围大, 显著高于周边粮田土壤, 主要跟不同种植年限农户的施磷量相关, 随着土层深度的增加, 全磷和有效磷含量逐渐减小, 呈现表聚特征, 其中土壤 ω (全磷) 范围在 0.38~2.58 g·kg⁻¹, ω (有效磷) 范围在 1.60~256.00 mg·kg⁻¹. 随着种植年限的增加, 土壤全磷和有效磷含量呈现先增加后减小的趋势, 在 15 a 左右达到峰值, 随后逐渐减少, 趋于稳定, 总体处于较高水平. 无机磷主要集中在设施农业表层土壤, 其中 Ca-P 占无机磷的比例最大, 达到了 98.38%, Ca₁₀-P 是最主要的 Ca-P 形态, 含量占 Ca-P 的 78.70%, Ca₂-P 占比最小, 仅占 9.50%. 不同形态无机磷含量呈现表层土壤富集, 向下减少的垂直分布特征; 不同土层深度, 不同形态无机磷占全磷比例变化存在差异, 其中 Ca-P 变化差异明显, 而 Fe-P 和 O-P 变化不显著, 表明设施农业土壤 Fe-P 和 O-P 迁移转化性差, 无机磷迁移转化主要以 Ca-P 为主. 由相关性和通径分析可知, Ca₂-P 对有效磷的直接通径系数最大(0.787), 是土壤有效磷的主要来源, 也是无机磷迁移转化的主要形态. 设施栽培条件下, 土壤磷素呈现大量累积的趋势, Ca₁₀-P 有效性低且累积量大, 如何提高这部分磷源的利用率, 是设施土壤磷素管理的关键.

关键词: 设施农业; 磷素累积; 迁移转化; 无机磷形态; 种植年限; 通径分析

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0452-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201022

Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors

FANG Bing¹, CHEN Lin¹, WANG Yang¹, ZHU Ya-fei¹, WANG Rui², SONG Gui-fang¹, LIU Jun¹, YANG Bin², ZHANG Shi-wen^{1*}

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. College of Surveying and Mapping, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The aim of this study was to apply phosphorus fertilizer scientifically and reasonably and reduce the pollution risk to the facility agricultural environment. Taking the facility agriculture concentration area in Daxing District of Beijing as the research object, the phosphorus content in soil (0-100 cm) of the facility agriculture profile with different planting years was measured and analyzed to explore the characteristics of phosphorus accumulation, migration, and transformation. The results showed that the contents of total phosphorus and available phosphorus in the surface soil of facility agriculture varied widely, which was significantly higher than that in the surrounding grain field soil, which was mainly related to the amount of phosphorus applied by farmers in different planting years. With the increase in soil depth, the contents of total phosphorus and available phosphorus decreased gradually, showing surface aggregation ω (total phosphorus) ranging from 0.38 to 2.58 g·kg⁻¹ and ω (available phosphorus) ranging from 1.60 to 256.00 mg·kg⁻¹. With the increase in planting years, the contents of soil total phosphorus and available phosphorus first increased and then decreased, reached a peak in approximately 15 years, then gradually decreased, tended to be stable, and generally remained at a high level. Inorganic phosphorus was mainly concentrated in the surface soil of the facility agriculture, in which Ca-P accounted for the largest proportion of inorganic phosphorus, up to 98.38%; Ca₁₀-P was the main form of Ca-P, up to 78.70% of Ca-P, and Ca₂-P accounted for the smallest proportion, only 9.50% of Ca-P. The contents of different forms of inorganic phosphorus showed the vertical distribution characteristics of enrichment in the surface soil and a decrease downward. There were differences in the proportion of different forms of inorganic phosphorus to total phosphorus in different soil depths, in which the change in Ca-P was obvious, whereas the change in Fe-P and O-P was not significant, indicating that the migration and transformation of Fe-P and O-P in the facility agricultural soil was poor, and the migration and transformation of inorganic phosphorus was mainly Ca-P. According to the correlation and path analysis, the direct path coefficient of Ca₂-P to available phosphorus was the largest (0.787), which was not only the main source of soil available phosphorus but also the main form of inorganic phosphorus migration and transformation. Under the condition of protected cultivation, soil phosphorus showed a large accumulation trend, the availability of Ca₁₀-P was low, and the accumulation was large. How to improve this portion of phosphorus sources is the key to the management of protected soil phosphorus.

Key words: facility agriculture; P accumulation; migration and transformation; inorganic phosphorus from; planting years; path analysis

设施农业能充分利用土地资源, 挖掘土壤、气温、水分和生物潜能, 在耕地资源稀缺的前提下获得高产和优质产品的现代化农业, 在我国发展迅速^[1]. 设施农业结构复杂, 改变了以往传统种植模式, 具有常年高温、养分投入大和环境密闭等特点^[2], 容易造成土壤板结和盐渍化等现象发生^[3], 不仅会危害作物的生长, 还会对周边环境造成污染风险^[4].

磷是作物生长所必需元素, 合理施用磷肥可以提高作物产量, 对于保障粮食安全至关重要^[5, 6], 但是磷肥的当季利用率很低^[7], 仅为施入量 10%~

收稿日期: 2022-01-04; 修订日期: 2022-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1908601); 第三次新疆综合科学考察项目(SQ2021xjkk03300)

作者简介: 方兵(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤磷素环境影响, E-mail: 332441530@qq.com

* 通信作者, E-mail: mamini190@126.com

20%, 绝大部分会以无效态的形式长期或暂时滞留在土壤中^[8]. 设施栽培过程中, 农户为了获得高产量和效益, 往往会投入大量养分^[9]. 张怀志等^[10]通过调查津冀地区设施农业集中县养分投入现状, 结果表明: 设施农业养分投入过量, N、P₂O₅ 和 K₂O 平均投入量分别超出了作物正常需求的 2.5、10.4 和 2.5 倍. 王蓉等^[11]实地调查了江苏连云港市 500 个温室大棚的养分投入情况, 结果表明大多数温室大棚农户采用高氮、极高磷和高钾的生产模式, 养分投入极不平衡. 此外磷素如何在设施土壤中迁移转化, 引起了学者的关注^[12~14]. 张大庚等^[15]的研究表明, 设施农业土壤磷素积累以 Ca₈-P 形态为主, Ca₂-P 和 Fe-P 是磷素淋失的主要形态. 田怡等^[16]的研究表明长期不施磷肥土壤磷素处于亏缺状态, Ca₈-P、Al-P 可转化为 Ca₂-P, 当年施 P₂O₅ 超过 50 kg·hm⁻² 时, 磷素主要以 Ca₂-P、Al-P 和 Ca₈-P 在土壤中积累. 余海英等^[17]分析了不同使用年限温室土壤剖面全磷及无机磷各组分含量, 结果表明 Al-P 和 Fe-P 是温室栽培耕层土壤(0~20 cm) 磷素养分的主要累积形态.

目前针对设施农业养分高投入下土壤磷素循环与磷素有效性研究还鲜有报道, 本研究以北京市大兴区设施农业集中区为研究对象, 通过野外问卷调查和分析不同种植年限剖面土壤(0~100 cm) 全磷、有效磷和无机磷含量分布特征, 探究磷素迁移转化规律并分析影响因素, 以期为指导农户科学利用磷肥和降低磷素流失污染风险提供一定的理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地势自西向东南缓倾, 海拔处于 14~52 m 之间, 土壤类型分为褐土、沼泽土、潮土和风砂土 4 类, 其中潮土所占比例最大, 超过全区土地面积 80% 以上. 研究区主要以设施农业为主, 主要种植瓜果蔬菜类.

1.2 土壤采集和测定方法

对研究区的设施农业展开采样调查, 按照“S 形”采集设施农业表层土壤, 并选择周边相连粮田表层土壤作为对照, 同时对所在农户进行问卷调查, 调查的内容主要包括种植年限、肥料投入量、肥料种类和作物产量等内容. 考虑到设施农业结构复杂, 具有高投入、高复种指数以及棚内种植作物、轮作方式和灌溉方式差异大的特点. 在采样调查的过程中选取种植作物、轮作方式、养分投入方式和灌溉方式基本相同的设施农业(以冷棚为主), 按照一定

的年限梯度(a) 进行土壤剖面样品(每 20 cm 一层使用土钻采集 0~100 cm 剖面土壤) 的采集. 所有采集的土样在实验室内进行自然风干, 剔除里面的杂质后用球磨粉碎机磨碎, 过 100 mm 筛备用.

实验室样品测试严格按照国家规定的土壤农化分析方法进行. 土壤 pH 采用 HI98121 酸度计测定(土水比 1:5); 土壤电导率在土水比 1:5 条件下, 采用便携式电导率仪测定(DDBJ-350); 土壤有效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法测定; 土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消化-钼锑抗比色法测定. 采用鲁如坤^[18]提出的土壤无机磷分级测试方式, 根据石灰性土壤不同组成 Ca-P 化合物在性质和有效性存在的差异性, 通过配制相应的浸提剂, 从而将它们分离出来, 以达到测试的要求. 称取 1 g 过筛的样品, 加入 50 mL 碳酸氢钠溶液 [$c(\text{NaHCO}_3) = 0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH7.5] 浸提, 使土壤中活性较强的磷酸二钙(Ca₂-P) 中的 Ca²⁺ 生成 CaCO₃ 沉淀, 将磷酸根浸提出来, 同时也包括水溶性磷等. 然后继续用配制好的乙酸铵溶液 [$c(\text{CH}_3\text{COONH}_4) = 0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH4.2] 浸提磷酸八钙(Ca₈-P). 对于磷酸铁(Fe-P) 浸提, 采用配制的氢氧化钠-碳酸钠混合溶液 [$c(\text{NaOH}) = 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $c(1/2 \text{ Na}_2\text{CO}_3) = 0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$] 做浸提剂, 闭蓄态磷(O-P) 由柠檬酸钠-氢氧化钠溶液 [$c(\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}) = 0.3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $c(\text{NaOH}) = 0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$] 浸提, 磷灰石(Ca₁₀-P) 由硫酸溶液 [$c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$] 浸提. 为了避免实验误差, 测定土样设置 3 组重复, 测定结果取平均值进行分析. 采用钼锑抗比色法测定磷浓度.

1.3 数据分析和处理

运用 SPSS 软件进行数据相关性分析, 运用 R 语言和 Origin2018 软件进行绘图.

2 结果与分析

2.1 设施农业养分投入现状分析

如表 1 所示, 研究区设施农业 N、P₂O₅ 和 K₂O 平均投入量分别为 457.55、251.71 和 345.52 kg·hm⁻² (所有养分投入折合纯养分进行计算), 投入比为 1:0.55:0.76, 已经超过了作物所需的正常投入量^[19]. 不同种植年限设施农业养分投入差异较大, 其中 1~5 a 养分平均投入量最大, N、P₂O₅ 和 K₂O 投入量分别为 594.74、326.26 和 394.24 kg·hm⁻², 投入比达到了 1:0.55:0.66; 随着种植年限的增加, 养分投入逐渐降低, 无机肥占肥料总投入比例呈现上升的趋势, 1~5 a 占总投入比例最小, 仅为 26.97%, 11~20 a, 占比最高, 为 34.48% (图 1).

表1 不同种植年限设施农业养分投入量¹⁾

Table 1 Nutrient input of facility agriculture in different planting years

种植年限/a	样本数/个	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
		投入量/ kg·hm ⁻²	变异系数/%	投入量/ kg·hm ⁻²	变异系数/%	投入量/ kg·hm ⁻²	变异系数/%
1~5	5	594.74 ± 44.76	15.05	326.26 ± 1.56	13.22	394.24 ± 3.27	6.73
6~10	5	460.85 ± 65.69	28.51	222.14 ± 25.14	22.63	266.04 ± 27.38	20.58
11~20	6	431.87 ± 37.18	19.25	251.22 ± 26.43	23.52	380.23 ± 4.73	14.33
>20	6	366.17 ± 75.77	46.27	214.71 ± 15.07	15.70	336.44 ± 21.93	14.58

1) 数据均为平均值标准误差

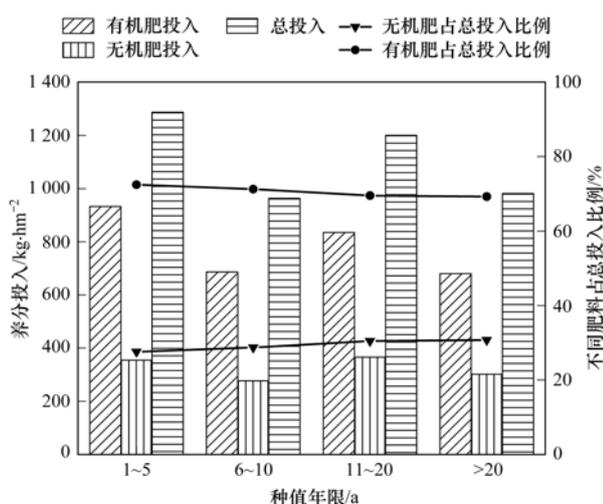


图1 不同种植年限设施农业有机肥和无机肥投入变化趋势

Fig. 1 Change trend of organic and inorganic fertilizer input in facility agriculture in different planting years

表2 表层土壤有效磷和全磷含量统计¹⁾

Table 2 Statistics of available phosphorus and total phosphorus contents in topsoil

指标	指标	最大值/mg·kg ⁻¹	最小值/mg·kg ⁻¹	均值/mg·kg ⁻¹	标准差/mg·kg ⁻¹	变异系数/%
有效磷	设施农业	256.00	44.00	137.39 ± 25.30	79.99	58.22
	粮田	49.40	37.67	44.02 ± 3.42	3.42	7.69
全磷	设施农业	2580.00	984.12	1826.00 ± 175.79	555.90	30.44
	粮田	1023.00	785.03	917.67 ± 70.05	121.33	13.22

1) 数据均为平均值标准误差

2.2.2 剖面土壤全磷和有效磷含量分布特征

如图2和图3所示,设施农业剖面土壤 ω (全

2.2 设施农业土壤磷素累积与迁移转化

2.2.1 表层土壤全磷和有效磷含量分布特征

在土壤养分的研究中,通常用全磷含量来评价土壤磷素库容的大小,有效磷含量代表土壤的供磷能力^[20].如表2所示,设施农业表层土壤全磷和有效磷含量显著高于粮田,其中冷棚全磷含量均值是粮田的1.99倍,有效磷含量均值是粮田的3.12倍,和前人研究结果保持一致^[21].表层土壤全磷和有效磷变异系数分别为30.44%和58.22%,显著高于粮田土壤,属于中等程度变异^[22],说明设施农业较粮田更易受到人为扰动的影响.养分的大量投入给设施农业土壤带来了较多的速效养分,已经在表层土壤中形成了富集,磷素在土壤中移动性较差和土壤对磷的吸附固定能力强也是造成土壤中磷素含量偏高的原因^[23].

磷)范围在0.38~2.58 g·kg⁻¹, ω (有效磷)范围在1.60~256.00 mg·kg⁻¹.随着土层深度的增加,全磷

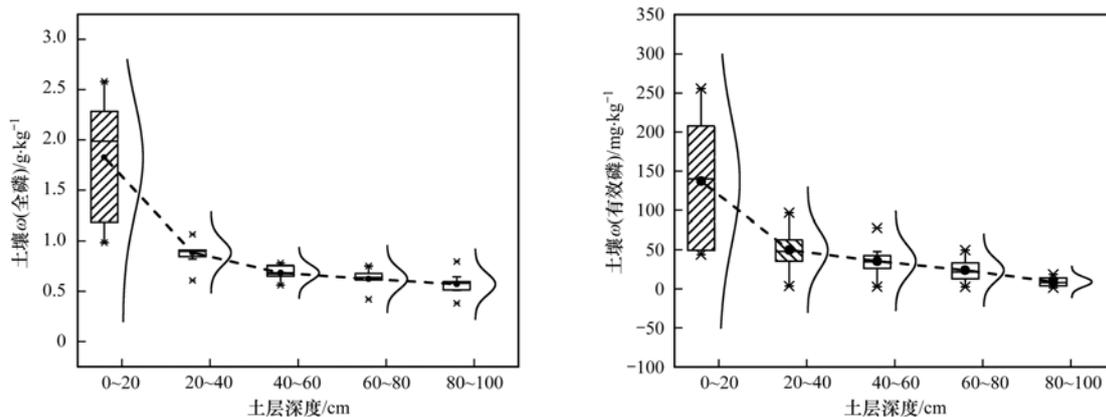


图2 不同土层深度土壤全磷和有效磷含量变化趋势

Fig. 2 Variation trend of total phosphorus and available phosphorus in different soil depths

和有效磷含量逐渐减小,不同土层深度变化的幅度略有差异,0~20 cm 和 20~40 cm 减小幅度大于其他土层,当土层深度 >40 cm 后,全磷和有效磷含量变化不显著(图 2)。

不同种植年限设施农业土壤全磷和有效磷含量差异显著,表层土壤变化范围大,主要跟农户磷肥投入量存在差异相关(表 1)。剖面土壤 ω (全磷)分布呈现表层土壤聚集特征,在 15 a 最高,为 $2.58 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,33 a 最低,为 $1.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。0~20 cm 和 20~40 cm 土壤全磷含量变化幅度最大,其中 4、7、15、21 和 33 a 减幅分别为 62.61%、60.09%、60.47%、57.36% 和 50.90%,说明土壤全磷逐渐向深层土壤迁移;60~80 cm 和 80~100 cm 土壤全磷含量变化幅度较小,4、7、15 和 33 a 减幅分别为

28.17%、23.53%、9.38% 和 9.52%,21 a 增幅达到了 6.25%;当土层深度 >80 cm 后,含量基本保持稳定。

设施农业土壤 ω (有效磷)主要集中在表层土壤,15 a 达到最大,为 $256.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,33 a 最小,为 $144.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表现出表聚特征。0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有效磷含量变化幅度最大,4、7、15、21 和 33 a 减幅分别为 79.28%、73.46%、72.81%、67.46% 和 63.65%;40~60 cm 和 60~80 cm 土壤有效磷含量变化幅度较小,在 33 a 减幅达到最大,为 59.16%,7 a 减幅最小,为 2.80%;80~100 cm 土壤 ω (有效磷)在 21 a 达到最大值,为 $18.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 4 a 达到最小值,为 $1.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3)。

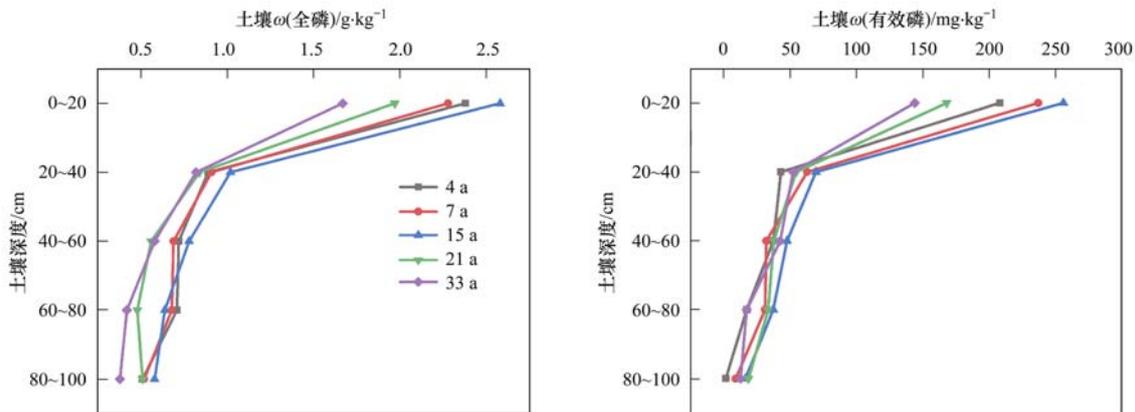


图 3 不同种植年限剖面土壤全磷和有效磷含量变化趋势

Fig. 3 Variation trend of soil total phosphorus and available phosphorus content in different planting years

2.2.3 设施农业土壤无机磷含量分布与迁移转化特征

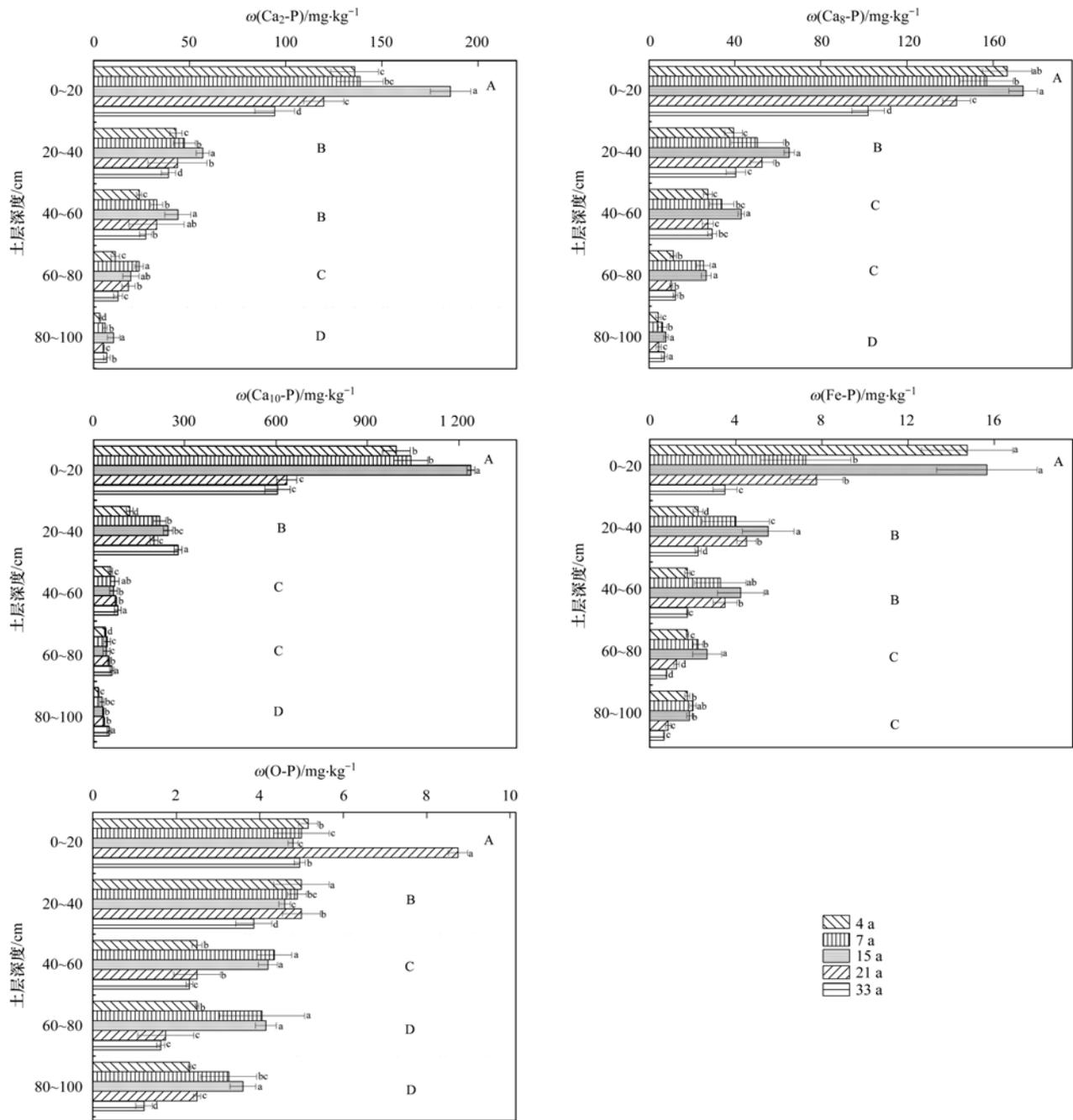
土壤磷素分级可以用来评价土壤磷库大小和土壤磷素供应状况^[24,25],土壤中有有效磷易被植物吸收利用,但含量较低,因此土壤磷素累积的主体往往是无机磷。研究区土壤类型以潮土为主,作为石灰性土壤,富含碳酸钙等石灰性物质,容易与磷酸结合形成钙磷酸盐,这与张敬敏等^[26]的研究结果一致。

如图 4 所示,设施农业土壤无机磷含量呈现表层土壤富集,向下减小的垂直分布特征^[27,28]。无机磷主要集中在表层土壤,Ca-P 占无机磷的比例最大,达到了 98.38%,其中 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是最主要的 Ca-P 形态,达到了 Ca-P 的 78.70%, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占比最小,仅为 Ca-P 的 9.50%;不同形态无机磷含量占全磷的比例表现为: $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (36.45%) > $\text{Ca}_8\text{-P}$ (5.47%) > $\text{Ca}_2\text{-P}$ (4.40%) > Fe-P(0.47%) > O-P(0.29%), $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是占全磷比例最大的磷酸钙盐,其次是 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$,而 Fe-P 和 O-P 是占比较小的无机磷组分。

不同种植年限设施农业土壤无机磷含量变化存

在差异,随着种植年限的增加,表层土壤 $\omega(\text{Ca}_8\text{-P})$ 、 $\omega(\text{Ca}_{10}\text{-P})$ 、 $\omega(\text{Fe-P})$ 和 $\omega(\text{Ca}_2\text{-P})$ 呈现增加的趋势,在 15 a 达到峰值,分别为 174.00、1240.00、15.67 和 $185.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中 $\omega(\text{O-P})$ 在 21 a 达到峰值,为 $8.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 4)。O-P 是土壤氧化膜包被的磷,难以被植物吸收利用,而 Fe-P 主要分布在 Fe^{2+} 含量较多的酸性土壤中,因此在石灰性土壤中,无机磷迁移转化主要以 Ca-P 为主。磷肥投入土壤之后,磷酸盐会很快被土壤中的钙固定,转化为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Fe-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 等形态的无机磷,随着农户每年磷肥的持续投入,使得各形态无机磷都呈现增加的趋势^[29]。当达到一定年限之后,磷肥的投入减少,加之土壤环境质量的改变,土壤质地以及 pH 因素的影响,造成各形态无机磷含量呈现下降的趋势,总体上 Ca-P 含量仍然保持在较高的水平^[30]。

随着土层深度的增加,不同形态无机磷占全磷的比例逐渐减小,表层土壤占比最大,其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 占全磷比例分别为 6.20%、6.82% 和 41.52%,Fe-P 和 O-P 占比较小,仅为



不同小写字母表示同一土层不同年限的差异显著,大写字母表示所有年限不同土层间的差异显著($P < 0.05$)

图 4 不同种植年限剖面土壤无机磷含量变化趋势

Fig. 4 Variation trend of soil inorganic phosphorus content in different planting years

0.45% 和 0.26%; 不同土层深度,不同形态无机磷占全磷比例变化存在差异,其中 Ca-P 变化差异明显,而 Fe-P 和 O-P 变化不显著,说明设施农业土壤 Fe-P 和 O-P 迁移转化性差,无机磷迁移转化主要以 Ca-P 为主.

有研究指出土壤有效磷与某磷组分相关性愈大,该磷组分的有效性愈大,其相对有效性也愈高^[31]. 如图 5 所示, Ca₁₀-P 和有效磷相关系数最大,达到了 0.976 1,其次是 Ca₈-P,而 O-P 和有效磷相关系数最小,仅为 0.389 9. 通过通径分析,进一步得到

了不同形态无机磷对有效磷的作用大小. 由表 3 可知,设施农业土壤不同形态无机磷对有效磷直接通径系数大小表现为: Ca₂-P (0.787) > Ca₈-P (0.427) > Ca₁₀-P (-0.029) > O-P (-0.061) > Fe-P (-0.133). 其中 Ca₂-P 对有效磷的直接影响最大 (0.787),是土壤有效磷的主要来源, Ca₁₀-P、Fe-P 和 O-P 对有效磷的贡献均为负值,但是通过 Ca₂-P 也有较大的正通径链系数 (Ca₁₀-P 0.749、Fe-P 0.712 和 O-P 0.560),表明这些形态无机磷可以通过 Ca₂-P 对有效磷产生间接作用. 由此可见, Ca₂-P

表 3 设施农业土壤不同形态无机磷与有效磷途径分析

Table 3 Path analysis of different forms of inorganic phosphorus and available phosphorus in facility agriculture soil

影响因子	直接途径系数	间接途径系数					与 y(有效磷) 相关系数
		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
Ca ₁₀ -P(x_1)	-0.029		0.749	0.382	-0.104	-0.045	0.929
Ca ₂ -P(x_2)	0.787	-0.028		0.414	-0.120	-0.043	0.986
Ca ₈ -P(x_3)	0.427	-0.026	0.763		-0.119	-0.035	0.988
Fe-P(x_4)	-0.133	-0.023	0.712	0.381		-0.035	0.883
O-P(x_5)	-0.061	-0.021	0.560	0.242	-0.077		0.624

是设施土壤中较为有效的磷源,被作物吸收的程度较高,其次是 Ca₈-P.

有研究表明,土壤 Ca₂-P、Fe-P 和 Al-P 的植物有效性最高^[32]. 本研究与前人研究的结果保持一致,即 Ca₂-P 对植物是高度有效的,可作为植物的有效磷源; Ca₈-P 也有相当高的有效性,可作为缓效磷源; Ca₁₀-P 和 O-P 可作为植物的潜在磷源^[33]. 因此,设施农业土壤 Ca₂-P 是无机磷转化的主要形态. 随着磷肥的不断施加, Ca₁₀-P 有效性低,成为了土壤

中累积量最大的无机磷形态,如何提高这部分磷源的生物有效性,是设施土壤磷素养分管理的关键.

2.3 设施农业土壤磷素迁移转化影响因素分析

如表 4 所示,种植年限与全磷、pH、Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 呈极显著正相关,与电导率显著相关,与有效磷和 Fe-P 相关性不显著. 土壤全磷和有效磷与不同形态无机磷(除 O-P)均达到极显著正相关. 土壤 pH 与不同形态无机磷存在相关关系. 有研究表明,pH 在土壤磷素形态转化中起着重要的影响,主要通过

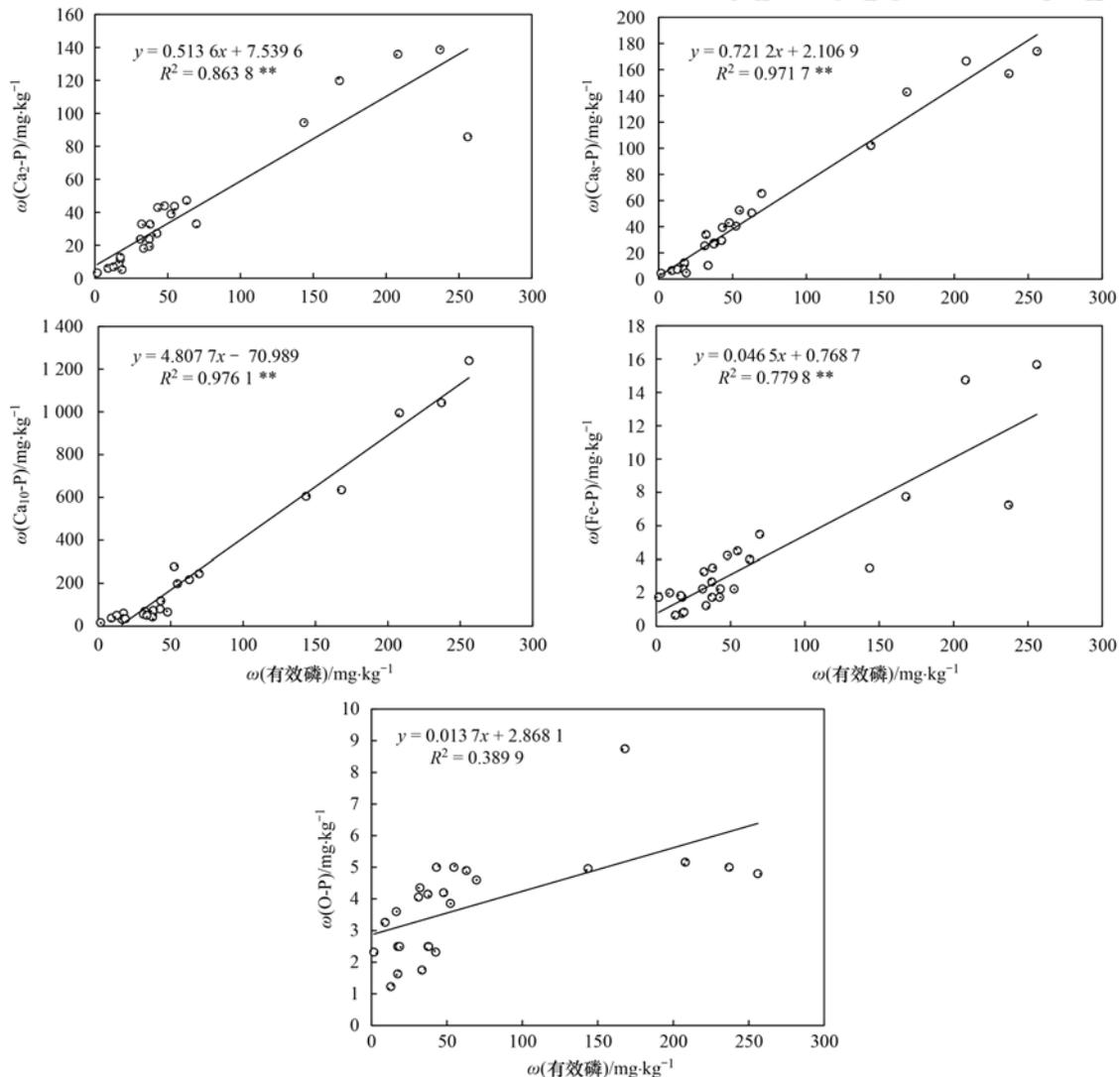


图 5 土壤有效磷和不同形态无机磷含量关系

Fig. 5 Relationship between soil available P and inorganic P in different forms

改变土壤中可溶性无机磷、抑制 CaCO_3 的形成和影响土壤中磷的吸附解吸能力实现^[32]. 研究区土壤受成土母质和潮土的影响, CaCO_3 含量丰富, 土壤碱性强. pH 降低有利于土壤中难溶性钙磷的有效性, 继而提高土壤中有效磷含量. 如图 6 所示, 随着土层深度的增加, pH 逐渐增大, 说明深层土壤不利于难溶性钙磷的分解(图 2 和图 4). 土壤电导率与盐分含

量有显著的相关关系, 电导率越大, 含盐量越高^[34]. 随着土层深度的增加, 土壤电导率呈现先减小后增大的趋势(图 6). 相关性分析可知, 土壤电导率与 pH 达到极显著负相关, 与种植年限显著相关, 而与不同磷素形态无明显相关性. 因此设施农业在种植管理超过一定年限后, 农户要警惕土壤次生盐渍化问题发生^[35].

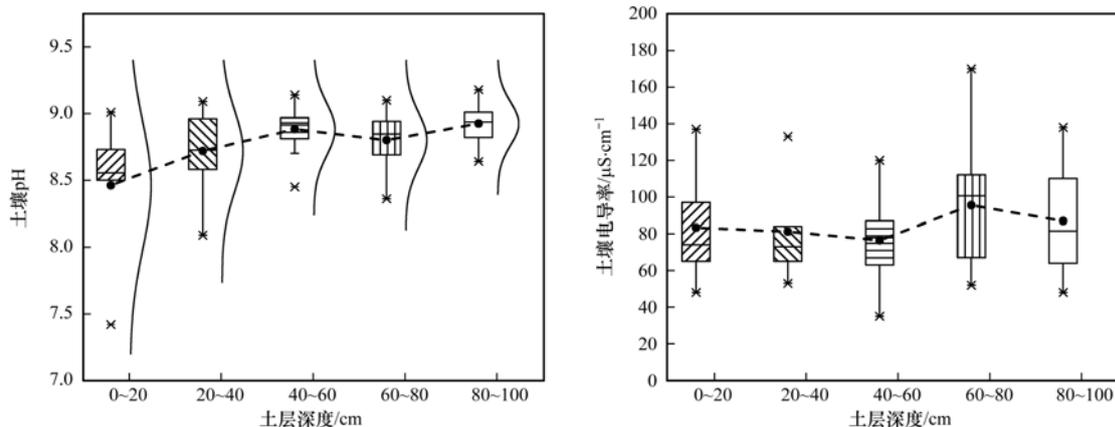


图 6 不同土层深度土壤 pH 和电导率变化趋势

Fig. 6 Variation trend of soil pH and conductivity at different soil depths

从各形态磷的相关性来看, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 Fe-P 呈极显著相关, 与 O-P 不相关; O-P 与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 相关性显著, 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Fe-P 不相关(表 4). 在进行土壤磷素养分的研究中, 不同形态的无机磷往往处于动态平衡变化中, 相互之间存在着一定的影响与制约关系. 土壤中不同组分磷的含量分布和迁移转化将会对土壤有效磷含量产生影响. 因此, 农户在养分投入过程中, 应充分考虑到磷肥投入土壤后的后效作用, 充分挖掘土壤中的缓效磷源与潜在磷源, 以达到减轻环境污染和提高磷肥利用率的目的.

选取一组对照组(冷棚和暖棚及垄间土壤, 种植年限、施肥种类、施肥习惯和施肥量等相同)作为研究对象. 如表 5 所示, 不同形态无机磷含量以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主, Fe-P 和 O-P 含量较少, 且集中在表层土壤; 不同种植模式表层土壤无机磷含量主要表现为: 冷棚 > 暖棚 > 冷棚垄 > 暖棚垄. 随着土层深度的增加, 不同形态无机磷含量呈现表层土壤累积, 向下减小的垂直分布特征; 不同种植模式不同形态无机磷占全磷的比例存在差异, 主要表现为冷棚高于暖棚, 冷棚垄间高于暖棚垄间. 结果表明, 冷棚更有利于无机磷的迁移转化.

表 4 不同种植年限、不同磷素形态和土壤理化因子相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis of different planting years, soil depth, different phosphorus forms and soil physical and chemical factors

	种植年限	全磷	有效磷	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	Fe-P	O-P	pH	电导率
种植年限	1	0.79 **	0.48	0.57 *	0.62 **	0.72 **	0.36	0.71 *	0.67 **	0.55 *
全磷		1	0.99 **	0.93 **	0.99 **	0.98 **	0.90 **	0.43	0.63 **	0.01
有效磷			1	0.93 **	0.99 **	0.99 **	0.88 **	0.46	-0.52 **	0.03
$\text{Ca}_2\text{-P}$				1	0.95 **	0.90 **	0.78 **	0.47	-0.35	-0.16
$\text{Ca}_8\text{-P}$					1	0.97 **	0.89 **	0.54 *	-0.55 **	0.01
$\text{Ca}_{10}\text{-P}$						1	0.91 **	0.57 *	-0.50 *	0.06
Fe-P							1	0.43	-0.71 **	0.06
O-P								1	-0.40	-0.14
pH									1	-0.51 **
电导率										1

1) * 表示相关系数通过了 $P < 0.05$ 的显著水平; ** 表示相关系数通过了 $P < 0.01$ 的显著水平

表 5 不同种植模式剖面土壤无机磷含量¹⁾/mg·kg⁻¹
Table 5 Soil inorganic phosphorus content in different planting patterns/mg·kg⁻¹

土层深度/cm	棚型	无机磷组分				
		Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Ca ₁₀ -P	Fe-P	O-P
0~20	冷棚	138.63(6.12)	157.00(6.92)	1042.50(45.72)	7.25(0.32)	5.00(0.22)
	暖棚	54.13(2.71)	56.50(2.83)	867.50(43.38)	5.00(0.25)	5.06(0.26)
	冷棚垄	36.13(3.69)	41.50(4.23)	231.50(23.62)	3.00(0.31)	4.65(0.47)
	暖棚垄	32.25(2.71)	35.00(2.94)	347.50(29.20)	5.50(0.46)	5.00(0.42)
20~40	冷棚	47.25(8.16)	50.50(5.55)	217.50(23.90)	4.00(0.44)	4.90(0.54)
	暖棚	35.75(4.11)	35.50(4.08)	154.75(17.87)	2.25(0.26)	5.00(0.57)
	冷棚垄	26.63(2.93)	30.50(3.35)	209.50(23.02)	4.00(0.44)	4.38(0.48)
	暖棚垄	24.38(2.28)	27.50(2.57)	252.50(23.60)	3.50(0.33)	2.50(0.23)
40~60	冷棚	32.88(4.77)	34.00(4.93)	69.50(10.07)	4.00(0.58)	4.35(0.63)
	暖棚	23.63(3.58)	24.00(3.64)	60.00(9.09)	2.25(0.34)	4.89(0.74)
	冷棚垄	20.63(3.17)	22.00(3.38)	59.50(9.15)	3.00(0.46)	2.50(0.38)
	暖棚垄	15.75(2.39)	17.50(2.65)	62.00(9.39)	2.00(0.30)	2.60(0.39)
60~80	冷棚	23.63(3.48)	25.50(3.75)	55.50(8.16)	2.25(0.33)	4.06(0.61)
	暖棚	23.06(3.78)	19.00(3.11)	56.00(9.18)	2.25(0.37)	4.36(0.71)
	冷棚垄	8.50(1.37)	10.00(1.61)	41.50(6.70)	2.25(0.36)	2.65(0.43)
	暖棚垄	10.38(1.65)	11.00(1.75)	71.50(11.35)	1.75(0.28)	3.25(0.56)
80~100	冷棚	6.00(0.97)	6.50(1.05)	38.00(6.13)	2.25(0.36)	3.26(0.53)
	暖棚	4.81(0.82)	4.50(0.76)	28.00(4.75)	1.25(0.21)	3.02(0.44)
	冷棚垄	5.38(0.90)	5.00(0.83)	39.00(0.65)	1.75(0.29)	2.08(0.35)
	暖棚垄	3.31(0.57)	4.00(0.69)	23.00(3.97)	1.75(0.30)	1.24(0.21)

1) 括号内数字表示占比(%),为不同形态无机磷与全磷的比值

3 讨论

本研究表明,设施农业土壤全磷和有效磷含量随着种植年限的增加出现明显的波动性.农户磷肥主要投入表层和耕作层,设施农业种植的初期,土壤各项理化性质指标良好,适宜作物的正常生长,为了效益最大化,农户会通过投入大量的养分来达到增产的目的,使得土壤全磷和有效磷含量保持在较高的水平(表2).当超过一定种植年限之后,设施土壤环境质量开始恶化,会出现土壤板结和盐渍化等问题发生^[35-37],种植年限越高,这些问题越突出,和实地问卷调查的结果较为一致.农户为了减少损失,便会采取相应的解决方案,比如:揭棚、高温闷棚、翻耕和停种等,待土壤条件得到改善后,便会继续加大投入,使全磷和有效磷含量分布出现一定的波动性(图3).

冷棚和暖棚两种棚型结构差异显著,冷棚结构简单,不需要加盖草苫,整体框架用一层塑料薄膜包裹,没有用来采暖和保温的设备;暖棚的后墙体以土墙或砌墙为主,墙内带有泡沫等保温材料,同时在棚膜上面设有保温措施.在野外调查采样的过程中,暖棚温度显著高于冷棚.此外土壤中水分含量将会影响到离子发生扩散的曲折程度以及离子在土壤中发生的物理和化学变化过程^[38,39].这些因素共同导致了不同种植模式下土壤磷素的累积存在差异.

土壤类型和利用方式均会对土壤中各磷素比例

产生影响^[26,33,40].本研究结果表明设施农业土壤无机磷以Ca₁₀-P为主,其次是Ca₂-P和Ca₈-P,而Fe-P和O-P含量较小.此外,有机肥和无机肥的不同配比投入会对土壤无机磷含量产生影响,在相同磷素投入水平效果下,与同等化学磷肥相比,有机肥对于磷素的累积贡献更大,有机肥的投入还可以促进磷素在土壤中的移动性^[41].陆欣春等^[42]的研究结果表明,长期投入有机肥后,会显著提高土壤Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P和Al-P含量,但是O-P和Ca₁₀-P含量变化不显著.Song等^[43]通过连续4a以不同方式施肥处理之后,土壤无机磷含量差异显著,其中有机肥的施用对Ca₂-P和Ca₈-P含量有显著的提高,而无机肥对Fe-P和Al-P提高效果较好,两种处理方式对O-P和Ca₁₀-P的影响不大.研究区农户以施用有机肥为主,加大了Ca-P在土壤中的含量分布(图1和图4).因此,农户在农业生产中要避免单一肥料的投入,在保证作物能吸收利用的范围下,多种肥料共同施用,使得土壤磷素能够得到最充分的利用^[44,45].

4 结论

(1) 研究区设施农业N、P₂O₅和K₂O投入存在过量且比例失衡,过多的磷肥投入造成表层土壤全磷和有效磷富集,显著高于周边粮田土壤.

(2) 设施农业土壤磷素含量呈现表层土壤富

集,向下减小的垂直分布特征.随着种植年限的增加,土壤磷素含量呈现波动和累积的趋势,主要跟外源性磷肥的持续投入和农户管理相关.

(3)设施农业土壤 Ca-P 占无机磷比例最大,Fe-P 和 O-P 占比较小.结果表明:Ca₂-P 是无机磷迁移转化的主要形态,Ca₁₀-P 有效性低且累积量大,如何提高这部分磷源的利用率,是设施土壤磷素管理的关键.

参考文献:

- [1] 韩旭东,王若男,崔梦怡,等.中国规模农户设施农业经营状况及影响因素[J].资源科学,2020,42(4):749-762.
Han X D, Wang R N, Cui M Y, et al. An empirical analysis on the development status and influencing factors of facility agriculture of large-scale farmers[J]. Resources Science, 2020, 42(4): 749-762.
- [2] 黄绍文,唐继伟,李春花,等.我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J].植物营养与肥科学报,2017,23(6):1480-1493.
Huang S W, Tang J W, Li C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1480-1493.
- [3] 唐冬,毛亮,支月娥,等.上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析[J].环境科学,2014,35(12):4705-4711.
Tang D, Mao L, Zhi Y E, et al. Investigation and canonical correspondence analysis of salinity contents in secondary salinization greenhouse soils in shanghai suburb [J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4705-4711.
- [4] 俞映惊,杨林章,李红娜,等.种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测[J].环境科学,2020,41(8):3870-3878.
Yu Y L, Yang L Z, Li H N, et al. Situation analysis and trend prediction of the prevention and control technologies for planting non-point source pollution [J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3870-3878.
- [5] Fauziyyah N E, Duasa J. Analysis of food security in Southeast Asia countries [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 756(1): 012004.
- [6] 刘凯,刘佳,陈晓芬,等.长期施用磷肥水稻土微生物量磷的季节变化特征与差异[J].中国农业科学,2020,53(7):1411-1418.
Liu K, Liu J, Chen X F, et al. Seasonal variation and differences of microbial biomass phosphorus in paddy soils under long-term application of phosphorus fertilizer [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(7): 1411-1418.
- [7] 郭刚,袁嫚嫚,王家宝,等.包膜磷肥对设施辣椒产量、干物质累积和磷肥利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2021,(6):206-211.
Wu G, Yuan M M, Wang J B, et al. Effects of coated phosphate fertilizer on yield, dry matter accumulation and phosphate fertilizer utilization efficiency of pepper in greenhouse [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (6): 206-211.
- [8] 司贤宗,张翔,索炎炎,等.磷肥-种子相对位置对花生生长发育及磷肥利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2021,(3):84-89.
Si X Z, Zhang X, Suo Y Y, et al. Effect of relative position of phosphate fertilizer-kernel on growth and development of peanut and use efficiency of phosphate fertilizer [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (3): 84-89.
- [9] Fan Y N, Zhang Y X, Hess F, et al. Nutrient balance and soil changes in plastic greenhouse vegetable production [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 117(1): 77-92.
- [10] 张怀志,唐继伟,袁硕,等.津冀设施蔬菜施肥调查分析[J].中国土壤与肥料,2018,(2):54-60.
Zhang H Z, Tang J W, Yuan S, et al. Investigation and analysis of greenhouse vegetable fertilization in Tianjin and Hebei province [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018, (2): 54-60.
- [11] 王蓉,王礼焦,孙潇潇.连云港市设施蔬菜施肥与土壤养分状况分析[J].山西农业科学,2016,44(2):204-208,231.
Wang R, Wang L J, Sun X X. Analysis on the fertilization and soil nutrient status of facilities vegetables in lianyungang city [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(2): 204-208, 231.
- [12] 刘蕾,王鹤雄,张国印,等.不同土地利用类型优先流对磷素垂直迁移及淋失风险的影响[J].江苏农业科学,2021,49(5):204-211.
- [13] 裴志强,卢树昌,王茜,等.不同种植密度的夏季填闲作物对设施土壤磷素形态及其迁移性的影响[J].华北农学报,2020,35(2):126-132.
Pei Z Q, Lu S C, Wang X, et al. Effects of summer catch crops with different planting densities on greenhouse soil phosphorus forms and mobility [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(2): 126-132.
- [14] 刘蕾,王凌,徐万强,等.设施土壤磷素淋失环境阈值及防控措施[J].华北农学报,2019,34(S1):197-203.
Liu L, Wang L, Xu W Q, et al. Environmental threshold and prevention of soil phosphorus leaching in greenhouse soils [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(S1): 197-203.
- [15] 张大庚,栗杰,董越.不同种植年限设施菜田土壤无机磷组分的累积和释放特征[J].水土保持通报,2021,41(4):93-99.
Zhang D G, Li J, Dong Y. Accumulation and release characteristics of soil inorganic phosphorus components in greenhouse vegetable fields with different planting years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 93-99.
- [16] 田怡,刘静,张婷婷,等.长期施磷对旱地冬小麦产量及土壤无机磷形态的影响[J].植物营养与肥科学报,2022,28(1):94-103.
Tian Y, Liu J, Zhang T T, et al. Effects of long-term phosphorus application on winter wheat yield and soil inorganic phosphorus forms in dryland [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(1): 94-103.
- [17] 余海英,李廷轩,张树金,等.温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征[J].中国农业科学,2011,44(5):956-962.
Yu H Y, Li T X, Zhang S J, et al. The accumulation and migration of inorganic phosphorus fractions in soils under greenhouse cultivation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(5): 956-962.
- [18] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [19] 刘衍,郭利娜,贾羽旋,等.北京市设施蔬菜施肥状况及减施潜力分析[J].中国蔬菜,2020,(9):71-81.
Liu K, Guo L N, Jia Y X, et al. Analysis on fertilization status and potential of fertilizer reduction in greenhouse vegetable fields in Beijing [J]. China Vegetables, 2020, (9): 71-81.
- [20] 张成兰,刘春增,吕玉虎,等.减量化肥配施不同量紫云英

- 对土壤磷素形态及水稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (1): 100-106.
- Zhang C L, Liu C Z, Lv Y H, *et al.* Effects of the combination of reduced chemical fertilizer and various amounts of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on soil phosphorus forms and rice yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (1): 100-106.
- [21] 孙铖, 周华真, 陈磊, 等. 农田化肥氮磷地表径流污染风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(7): 1266-1273.
- Sun C, Zhou H Z, Chen L, *et al.* The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(7): 1266-1273.
- [22] 李华林, 张建军, 张耀方, 等. 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2796-2809.
- Li H L, Zhang J J, Zhang Y F, *et al.* Analysis of spatial-temporal variation characteristics of potential non-point source pollution risks in the upper beiyun river basin using different weighting methods[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2796-2809.
- [23] 王敏, 刘石磊, 张帅, 等. 腐植酸钾与磷肥施用方式对土壤磷素移动性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(2): 209-215.
- Wang M, Liu S L, Zhang S, *et al.* Effect of potassium humate and phosphate fertilizer application method on soil phosphate mobility[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, **37**(2): 209-215.
- [24] Gu C H, Margenot A J. Navigating limitations and opportunities of soil phosphorus fractionation[J]. Plant and Soil, 2021, **459**(1): 13-17.
- [25] 蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 等. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1606-1612.
- Cai G, Hu Y J, Wang T T, *et al.* Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farmland soil[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1606-1612.
- [26] 张敬敏, 赵娜, 魏琨, 等. 不同年限温室土壤磷素变化分析[J]. 土壤通报, 2019, **50**(3): 597-601.
- Zhang J M, Zhao N, Wei M, *et al.* Changes in soil phosphorus with years in greenhouse[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(3): 597-601.
- [27] 郭文杰, 邵前前, 杜健, 等. 不同温度热解牛骨炭对菜园土壤磷素转化及小白菜产量的影响[J]. 土壤通报, 2019, **50**(6): 1391-1399.
- Guo W J, Shao Q Q, Du J, *et al.* Effects of bovine bone Carbon CharPyrolysed at different temperatures on phosphorus transformation and bioavailability of vegetable soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(6): 1391-1399.
- [28] 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 等. 蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 4020-4029.
- Song X W, Zhao X L, Zhang J Z, *et al.* Effect of montmorillonite on fractions and availability of phosphorus in soils applied with organic fertilizer[J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 4020-4029.
- [29] Liang X Q, Jin Y, He M M, *et al.* Composition of phosphorus species and phosphatase activities in a paddy soil treated with manure at varying rates [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, **237**: 173-180.
- [30] 贾志航, 吕明露, 张鑫, 等. 不同种植年限苹果园土壤磷状况和无机磷组分特征[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(5): 308-312, 320.
- Jia Z H, Lv M L, Zhang X, *et al.* Phosphorus status and inorganic phosphorus fractions in apple orchards soil with different planting years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(5): 308-312, 320.
- [31] 李萌, 谭许脉, 肖纳, 等. 引种降香黄檀和顶果木对石漠化山区土壤磷素转化及其有效性的影响[J]. 生态学报, 2022, **42**(4): 1594-1605.
- Li M, Tan X M, Xiao N, *et al.* Effects of introducing *Dalbergia odorifera* and *Acricarpus fraxinifolius* on soil phosphorus transformation and availability in rocky desertification mountainous regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(4): 1594-1605.
- [32] 郭斗斗, 黄绍敏, 张珂珂, 等. 有机无机外源磷素长期协同使用对潮土磷素有效性的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2018, **24**(6): 1651-1659.
- Guo D D, Huang S M, Zhang K K, *et al.* Effects of long-term synergistic use of organic and inorganic exogenous P on phosphorus availability in fluvo-aquic soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(6): 1651-1659.
- [33] 廖文华, 刘建玲, 黄欣欣, 等. 潮褐土上蔬菜产量和土壤各形态磷变化对长期过量施磷的响应[J]. 植物营养与肥科学报, 2017, **23**(4): 894-903.
- Liao W H, Liu J L, Huang X X, *et al.* Responses of vegetable yield and changes of phosphorus fractions in cinnamon soil to long-term excess phosphorus application [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(4): 894-903.
- [34] 李舰, 李朋林, 蔡国庆, 等. 含盐环境下传感器测试含水率和含盐量方法研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(S2): 1-8.
- Li J, Li P L, Cai G Q, *et al.* Sensor measuring method of water content and salt content in salty environment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(S2): 1-8.
- [35] 石宁, 李彦, 井永苹, 等. 长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2434-2442.
- Shi N, Li Y, Jing Y P, *et al.* Effect of long-term fertilization on spatio-temporal changes and risk of nitrogen and phosphorus loss in intensive vegetable production system soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(11): 2434-2442.
- [36] Cao Y Y, Wu C F, Wang L J, *et al.* Rotation of broad bean improves the soil quality of facility green house [J]. Legume Research-An International Journal, 2017, **40**(4): 710-715.
- [37] 文方芳. 种植年限对设施大棚土壤次生盐渍化与酸化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (4): 49-53.
- Wen F F. Effect of planting years on soil secondary salinity and soil acidification in greenhouse [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (4): 49-53.
- [38] 彭思利, 武仁杰, 张鑫, 等. 温度和水分对干热河谷耕地和草地土壤微生物的影响[J]. 草业科学, 2021, **38**(12): 2350-2362.
- Peng S L, Wu R J, Zhang X, *et al.* Effects of temperature and moisture treatments on microbial characteristics of arable and grassland soil in dry-hot valley [J]. Pratacultural Science, 2021, **38**(12): 2350-2362.
- [39] 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 等. 土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1965-1972.
- Xu X C, Huang Y, He X Y, *et al.* Effect of soil moisture and temperature on the soil inorganic carbon release of brown limestone soil in the karst region of southwestern China [J].

- Environmental Science, 2019, **40**(4): 1965-1972.
- [40] 李娟娟, 滕艳敏, 李季. 不同温室蔬菜种植模式下土壤磷素形态分布与转化[J]. 土壤, 2020, **52**(2): 271-278.
Li W W, Teng Y M, Li J. Soil phosphorus fraction and transformation under different production modes of greenhouse vegetables[J]. Soils, 2020, **52**(2): 271-278.
- [41] 张田, 许浩, 茹淑华, 等. 不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5247-5255.
Zhang T, Xu H, Ru S H, *et al.* Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers [J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5247-5255.
- [42] 陆欣春, 邹文秀, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(6): 1536-1542.
Lu X C, Zou W X, Han X Z, *et al.* Effect of long-term fertilization on phosphorus and zinc fractions in a Mollisol [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(6): 1536-1542.
- [43] Song K, Xue Y, Zheng X Q, *et al.* Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil [J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1): 1164.
- [44] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 有机无机肥配施对不同程度盐渍土N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3811-3821.
Zhou H, Shi H B, Guo J W, *et al.* Effects of the combined application of organic and inorganic fertilizers on N₂O emissions from saline soil [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3811-3821.
- [45] 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 等. 有机肥与无机肥配施对潮土N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1474-1481.
Sun H Y, Wan Z M, Liu D Y, *et al.* Effect of organic fertilizer and inorganic fertilizer application on N₂O emissions from fluvo-aquic soil in the north China plain [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1474-1481.



CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)