

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)

不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)

不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧楠, 胡建林 (635)

2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大环流背景分析郑庆锋, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)

基于大气成分观测网的山西省近地面O₃体积分数分布特征李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)

伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)

运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种阴世杰, 刘新罡, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)

郑州市冬夏季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晓, 张瑞芹 (689)

郑州市PM_{2.5}中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成李子涵, 董喆, 尚璐琪, 孔梓涵, 李晓, 张瑞芹 (700)

中国三大城市群PM_{2.5}浓度非线性变化分析吴舒祺, 顾杨阳, 张天岳, 赵文吉 (709)

基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)

碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)

考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)

我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)

不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)

深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)

河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)

北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)

店埠河流域地表水-地下水化学特征及其成因分析郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)

张家口地区枯水期地下水化学特征及其成因机制分析金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)

黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)

制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法彭安萍, 高虎, 张新波 (844)

水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)

富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)

壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd²⁺的吸附机制姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)

硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)

磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)

广东省高分辨率温室气体排放清单及特征卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志烟, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)

辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO₂交换及其环境调控刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)

生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N₂O和CH₄排放的影响胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)

生物炭改良盐碱地研究与应用进展魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董辰辰, 孙红文 (940)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析徐芝萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)

黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例李月, 罗红芬 (961)

不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)

Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制张超, 翟付杰, 单保庆 (983)

秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)

我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)

广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)

基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析潘泳兴, 陈盟, 王楠楠 (1026)

基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)

基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)

PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)

氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓琦, 蒋建东 (1080)

昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)

钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)

氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙淇, 田欣, 赵科理 (1107)

关键生育期施加外源灌溉水对水稻吸收转运的影响周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜峰峰, 廖柏寒 (1118)

外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)

稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)

高密度聚乙烯微塑料与氯嘧磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)

微塑料的人体富集及毒性机制研究进展包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)

机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)

微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)

水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)

基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

《环境科学》征订启事(825) 《环境科学》征稿简则(836) 信息(897, 1106, 1149)

免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析

徐艺萍^{1,2}, 饶越悦^{1,2}, 孟艳¹, 温媛², 孟维伟¹, 王旭清¹, 李宗新¹, 刘开昌^{1*}, 代红翠^{1*}

(1. 山东省农业科学院小麦玉米国家工程研究中心, 济南 250100; 2. 中国农业大学农学院, 北京 100193)

摘要: 为明确免耕对农田土壤团聚体的影响, 通过 Meta 分析整合已发表的 116 项研究, 综合探究免耕对土壤团聚体粒径分布、平均重量直径(MWD)以及团聚体有机碳含量的影响. 结果表明, 与耕作相比, 免耕显著提高土壤大团聚体占比(10.9%)和 MWD(12.8%), 减少黏粉粒占比(-15.5%), 但对微团聚体及团聚体有机碳含量没有显著影响. 亚组分析表明, 免耕显著提高西北地区土壤大团聚体占比(17.6%), 提高华北地区土壤团聚体 MWD(15.4%); 在旱地及黏壤土中, 免耕分别提高团聚体 MWD 效应值 12.6% 和 18.4%; 免耕提高大团聚体占比的效果随土壤 pH 值增加而增加; 秸秆还田条件下, 免耕显著提高土壤大团聚体占比(9.6%)及 MWD(11.6%), 秸秆移除后, 免耕对团聚体的影响效应均不显著; 在试验年限方面, 短期免耕(< 5 a)显著提高土壤大团聚体比例, 而长期免耕(> 10 a)提高团聚体 MWD; 在土壤深度方面, 免耕仅能改善耕层(0~20 cm)土壤团聚体粒径分布及 MWD, 而对深层土壤(> 20 cm)团聚体没有影响. 综上所述, 免耕能够改善土壤团聚体粒径分布及稳定性, 但对团聚体碳含量无显著影响. 在实际生产中, 要充分考虑生产区域、土壤性质和田间管理等因素, 以达到有效改良土壤团聚体的目的.

关键词: 免耕; 土壤团聚体; 平均重量直径(MWD); 团聚体有机碳; Meta 分析

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-0952-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202303142

Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis

XU Yi-ping^{1,2}, RAO Yue-yue^{1,2}, MENG Yan¹, WEN Yuan², MENG Wei-wei¹, WANG Xu-qing¹, LI Zong-xin¹, LIU Kai-chang^{1*}, DAI Hong-cui^{1*}

(1. National Engineering Research Center of Wheat and Maize, Shandong Academy of Agricultural Science, Jinan 250100, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to clarify the impact of no-tillage on the quality of farmland soil aggregates in China and promote the adaptive application of no-tillage practices, a Meta-analysis was conducted by collecting data from 116 published studies. The effects of no-tillage on aggregate size distribution, mean weight diameter (MWD), and aggregate-associated C were studied. The results showed that compared with that under tillage, no-tillage significantly increased the proportion of macroaggregates (10.9%) and MWD (12.8%) and decreased the proportion of clay and silt (-15.5%) but had no significant effect on soil microaggregate and aggregate-associated C. The subgroup and Meta regression analysis showed that no-tillage significantly increased the proportion of macroaggregates in Northwest China (17.6%) and MWD in North China (15.4%). In upland and clay loam, no-tillage increased MWD by 12.6% and 18.4%, respectively. The effect of no-tillage on increasing the proportion of macroaggregates increased with the soil pH. When straw returned, no-tillage significantly increased the proportion of macroaggregates (9.6%) and MWD (11.6%), but no significant effect of no-tillage on aggregates was found after straw removal. Regarding test duration, short-term (< 5 a) no-tillage could significantly increase the proportion of macroaggregates, whereas long-term (> 10 a) no-tillage could improve the MWD. In different soil layers, no-tillage could only significantly improve the aggregate size distribution and MWD in topsoil (0-20 cm) but had no effect in subsoil (> 20 cm). In summary, no-tillage could improve aggregate size distribution and stability but had no effect on aggregate-associated C. Production region, soil properties, field management methods, and other factors should be fully considered in production practice to effectively improve the quality of soil aggregates.

Key words: no-tillage; soil aggregates; mean weight diameter (MWD); aggregate-associated SOC; Meta analysis

免耕是保护性耕作的关键环节,也是最常见的耕作措施之一,全球应用面积超过 1.55 亿 hm^2 ^[1]. 通常情况下,免耕包含不耕和秸秆覆盖(> 30%)两个要点. 由于能够减轻土壤扰动,进而保持水土和抵抗侵蚀^[2],免耕被认为是维持土壤结构的良好措施.

团聚体是土壤结构的基本单元,在调节土壤物质循环、能量转化、养分供应和生物活性等方面发挥重要作用^[3-5],优化团聚体结构、提高团聚体稳定性成为维持和提高农田生产力的重要途径. 土壤耕作是影响团聚体的关键人为因素,能够促进团聚体间的转化与再分布^[6],改变团聚体结构和抗侵蚀力^[7,8]. 探究免耕措施下土壤团聚体的变化特征及其影响因素,有助于明确免耕优化土壤结构的作用机制,推动免耕措施的合理高效应用.

团聚体的结构即为粒径组成,自 80 年代, Tisdall 等^[9]以 0.25 mm 为界线对团聚体进行划分后,团聚体的粒径分级标准逐步发展成型,使不同大小的团聚体间有了可比性^[10]. 不同粒级的团聚体在碳库保持、微生物活动等方面发挥的作用不同,其分布和空间排列还决定了土壤孔隙分布和连续性,进而决定土壤的水肥保持能力^[11]. 团聚体稳定性则能够反映土壤结构的稳定性,通常由其平均重量直径(MWD)来

收稿日期: 2023-03-16; 修订日期: 2023-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001487); 山东省青年科技人才托举工程项目(SDAST2021qt04); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2022E01, CXGC2021B08, CXGC2021C03)

作者简介: 徐艺萍(1997~),女,博士研究生,主要研究方向为农田土壤固碳, E-mail: xuyiping9703@163.com

* 通信作者, E-mail: liuke1971@126.com; daihongcui2013@163.com

评价^[12,13]. 国内外学者对免耕及耕作下土壤团聚体的变化特征进行了大量研究. Papendick等^[14]研究认为,长期翻耕会降低农田表层土壤结构稳定性,加剧土壤流失和风蚀^[15],而免耕则能够降低土壤侵蚀量,提高团聚体稳定性,有效恢复土壤结构^[16]. Weidhuner等^[17]通过49 a的研究发现,相比耕作,免耕能提高大团聚体比例和团聚体稳定性,促进团聚体碳固持,但其效应主要集中于土壤表层. 在旱地农田,免耕改善团聚体结构及稳定性、提高土壤储水量及水分有效性的综合效益有助于作物生产^[18,19]. 但免耕并不适用于全部农田,在排水不良和湿度较大的黏性土壤中,免耕是否能够改善团聚体结构及稳定性仍有待研究.

目前,关于免耕对土壤团聚体影响的研究局限于田间单点试验,少有研究能够综合地域、环境和农田管理等因素,解析免耕措施下团聚体的变化特征及机制. 本研究采用Meta分析,整合免耕对我国农田土壤团聚体粒径分布、稳定性和各粒级团聚体有机碳含量的影响,并结合区域及农田管理等进行综合分析,以期为推动免耕的适应性应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 数据来源

以“免耕(no till*; zero till*; no-plough*)”、“保护性耕作(conservation till*)”和“团聚体(aggregate*)”为关键词,在中国知网(CNKI)和Web of Science数据库中检索公开发表的文献,并按照以下标准对检索结果进行筛选:①试验地位于中国,并以我国主要农作物为研究对象;②试验为包含免耕和耕作(旋耕、翻耕和深松等常见田间耕作方式)的田间对照试验;③除试验处理外,其他田间管理措施一致;④明确说明试验数据的均值和重复数;⑤有明确的试验时间;当不同文献数据来源于同一项研究时,仅纳入最新数据. 经筛选,共获得116篇有效文献.

1.2 数据获取

分别选取免耕、耕作处理下的土壤团聚体相关指标进行分析,纳入指标包括土壤团聚体粒径分布、MWD以及各粒级团聚体有机碳含量. 由于不同研究中团聚体的粒径分级标准不一,因此,提取原始数据后,将团聚体粒径统一划分为大团聚体(> 0.25 mm)、微团聚体(0.25 ~ 0.053 mm)和黏粉粒(< 0.053 mm)^[20],并整理和计算了相应粒径的团聚体有机碳含量. 此外,试验位置、土壤性状、田间管理、取样土层和团聚体筛分方法等信息也被纳入数据集. 文献中以文字或表格形式展示的数据直接获取,图形格式的数据通过Plot Digitizer软件获取. 共获得

2 506组数据用于Meta分析.

1.3 数据分析

使用随机效应模型来评估免耕对纳入指标的影响,通过自然对数响应比 $\ln R$ 计算效应值^[21]:

$$\ln R = \ln(x_i/x_c) = \ln x_i - \ln x_c \quad (1)$$

式中, x_i 和 x_c 分别表示免耕和耕作处理下的数据平均值. 由于对不同团聚体粒径进行了划分和计算,标准偏差在汇总的数据集中不适用. 因此,本研究使用试验重复数来计算各数据对的权重^[22]:

$$w_i = (n_i \times n_c)/(n_i + n_c) \quad (2)$$

式中, w_i 表示各数据对的权重, n_i 和 n_c 分别表示免耕和耕作处理下的试验重复数. 通过64 999次迭代bootstrapping得到加权平均效应值($\ln R^*$)和95%置信区间(95% CI).

$$SE_{\ln R^*} = \sqrt{1/w_i} \quad (3)$$

$$\ln R^* = \sum(\ln R_i \times w_i) / \sum w_i \quad (4)$$

$$95\% \text{ CI} = \ln R^* \pm 1.96 SE_{\ln R^*} \quad (5)$$

若95% CI不与0重叠^[23],则表示:相比耕作,免耕处理下各指标显著增加(> 0)或减少(< 0),($P < 0.05$). 将 $\ln R^*$ 转换为平均变化率(E),以便于解释变化程度^[24]:

$$E = (e^{\ln R^*} - 1) \times 100\% \quad (6)$$

为分析不同试验条件下免耕对土壤团聚体的影响效应,对各研究的试验区域(东北、西北、华北、东南、西南)、土壤质地^[25](壤土、黏壤土、黏土)、土地利用方式(旱作、水旱轮作、水田)、秸秆还田状况(秸秆还田、秸秆移除)、试验持续时间(< 5 a、5 ~ 10 a、> 10 a)、对照耕作方式(旋耕、翻耕、深松)、取样土层(0 ~ 20 cm、> 20 cm)以及团聚体筛分方法(湿筛法、干筛法)等分类变量进行亚组分析. 对试验地年平均温度、年平均降雨量、土壤pH以及土壤有机碳含量等连续变量进行Meta回归分析.

1.4 统计分析

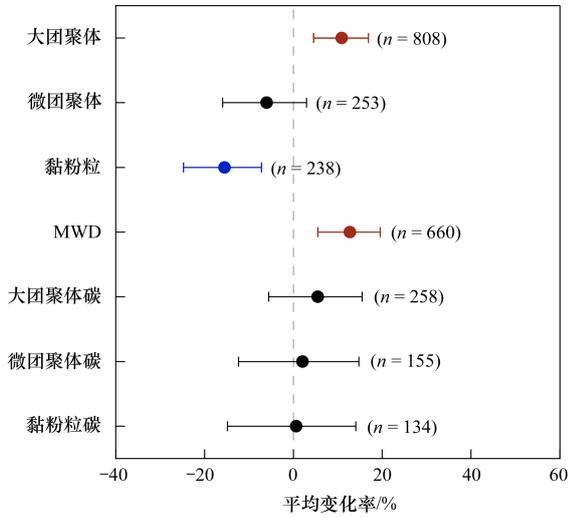
使用Excel 2016进行数据整理;使用MetaWin 2.1进行Meta分析和分类变量亚组分析;使用R语言“metafor”包进行连续变量的Meta回归分析;使用Origin 2021绘图.

2 结果与分析

2.1 免耕措施下土壤团聚体的整体变化

本研究结果表明,相比耕作,免耕显著影响土壤团聚体的粒径分布及其稳定性(图1). 免耕显著提高大团聚体占比10.9%($P < 0.05$),降低黏粉粒占比15.5%($P < 0.05$),但对微团聚体占比没有影响. 在团聚体稳定性方面,相比耕作,免耕显著提高团聚体

MWD(12.8%; $P < 0.05$). 在团聚体有机碳含量方面, 相比耕作, 免耕下各粒级团聚体有机碳含量呈增加趋势, 但效果不显著.



红色线条表示免耕相比耕作对团聚体粒径分布等指标具有显著正效应, 蓝色线条表示具有显著负效应, 黑色线条表示效应不显著; n 表示样本数

图 1 免耕对土壤团聚体粒径分布、MWD 及团聚体碳含量的影响
Fig. 1 Effects of no-tillage on aggregate size distribution, MWD, and aggregate-associated C

2.2 免耕对土壤团聚体影响的亚组分析

对分类变量进行 Meta 亚组分析. 组间异质性检验结果表明(表 1), 免耕对土壤微团聚体的效应受土

层深度的影响显著($P < 0.05$); 免耕对土壤黏粉粒的效应受团聚体筛分方法的影响达到极显著水平($P < 0.001$).

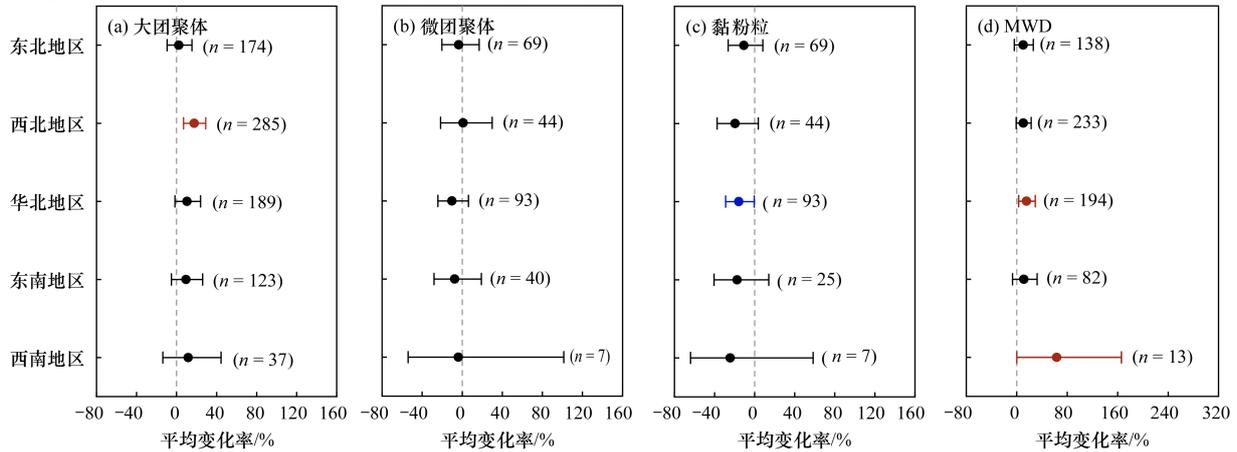
表 1 分类变量对土壤团聚体影响的组间异质性检验显著性(P_{Q-val})¹⁾

Table 1 Intergroup heterogeneity test for the effect of classification variables on soil aggregates (P_{Q-val})

分类变量	团聚体指标			
	大团聚体	微团聚体	黏粉粒	MWD
试验区域	0.507	0.949	0.959	0.527
土壤质地	0.977	0.355	0.881	0.792
秸秆管理	0.693	0.996	0.773	0.998
耕作方式	0.976	0.548	0.261	0.926
试验持续时间	0.808	0.728	0.651	0.936
土地利用方式	0.976	0.873	0.978	0.949
土层深度	0.490	< 0.05	0.148	0.321
团聚体筛分方法	0.127	0.609	< 0.001	0.983

1) 若 P_{Q-val} 值 < 0.05、< 0.01 或 < 0.001, 则表示数据存在显著的组间异质性, 须进行分组

亚组分析结果显示, 不同试验区域中, 免耕相比耕作对土壤团聚体粒径分布及 MWD 的影响效应不同(图 2). 在西北地区, 免耕显著提高大团聚体占比, 增幅 17.6% ($P < 0.05$); 在华北地区, 免耕降低黏粉粒占比 (-15.9%; $P < 0.05$), 并提高团聚体 MWD (15.4%; $P < 0.05$); 在西南地区, 免耕能够提高团聚体 MWD (63.2%; $P < 0.05$); 而在东北地区 and 东南地区, 免耕对团聚体的影响均不显著.



红色线条表示免耕相比耕作对团聚体粒径分布等指标具有显著正效应, 蓝色线条表示具有显著负效应, 黑色线条表示效应不显著; n 表示样本数

图 2 不同试验区域下, 免耕对土壤团聚体组成及稳定性影响的效应值

Fig. 2 Effect size of no-tillage on soil aggregate composition and stability under different regions

不同土壤质地下, 免耕相比耕作对团聚体的影响效应存在差异(图 3). 免耕显著降低黏壤土的黏粉粒占比 19.8% ($P < 0.05$), 并提高黏壤土团聚体 MWD (18.4%; $P < 0.05$). 而在壤土及黏土中, 免耕对团聚体粒径分布和 MWD 没有影响.

在土地利用方式方面(图 3), 与耕作相比, 免耕

显著提高旱作农田土壤大团聚体占比 10.9% ($P < 0.05$), 降低黏粉粒占比 15.4% ($P < 0.05$), 同时提高团聚体 MWD (12.6%; $P < 0.05$). 而在水旱轮作田及水田中, 免耕未能改善团聚体粒径分布及稳定性.

以秸秆管理、试验持续时间和对照耕作方式为分类变量, 进行 Meta 亚组分析, 结果显示(图 4): 秸秆

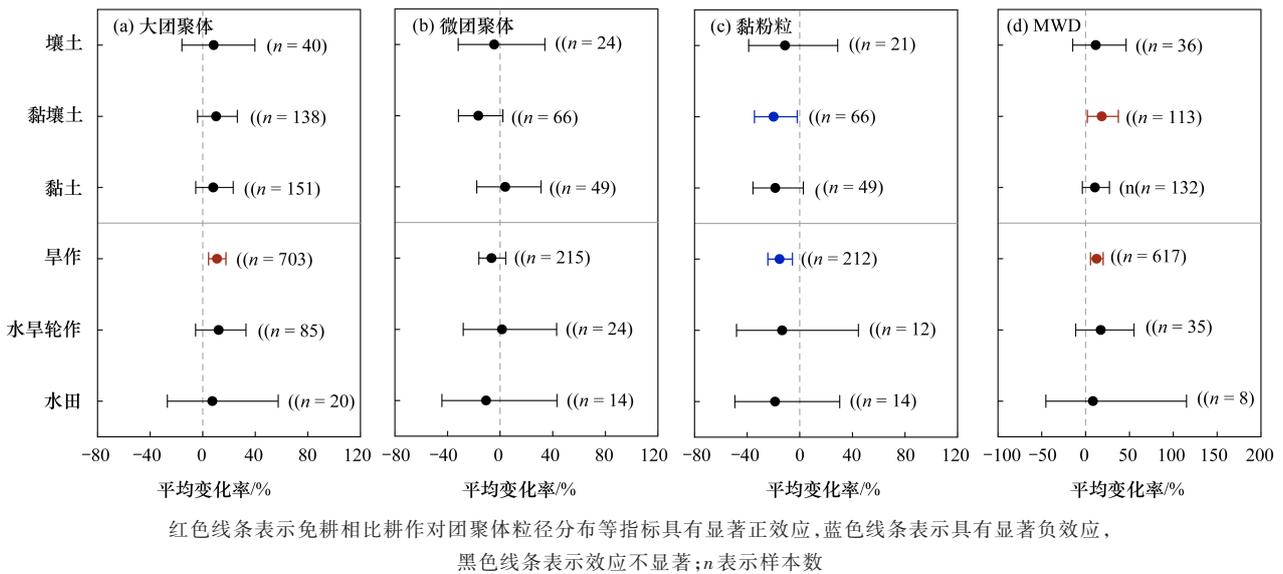


图 3 不同土壤质地及土地利用方式下,免耕对土壤团聚体组成及稳定性影响的效应值

Fig. 3 Effect size of no-tillage on soil aggregate composition and stability under different soil textures and land uses

还田时,与耕作相比,免耕显著提高土壤大团聚体占比 9.6% ($P < 0.05$),降低黏粉粒占比 15.9% ($P < 0.05$),并显著提高团聚体 MWD 11.6% ($P < 0.05$). 秸秆移除后,免耕下的团聚体结构及稳定性与耕作相比没有差异.

免耕对土壤团聚体的影响效应在不同试验持续时间下存在差异(图 4). 试验持续时间 < 5 a 时,相比耕作,免耕显著提高大团聚体占比,增幅 12.8% ($P < 0.05$);试验持续 5 ~ 10 a 时,免耕处理下的土壤黏粉

粒占比降低 20.7% ($P < 0.05$);当试验持续时间 < 5 a 或 > 10 a 时,免耕均能提高团聚体 MWD (13.1%、13.5%; $P < 0.05$),有效增强土壤团聚体的稳定性.

本研究以土壤耕作为对照,对照的耕作措施不同,免耕对团聚体的影响效应不同(图 4). 相比翻耕,免耕显著提升大团聚体占比 11.4% ($P < 0.05$),降低黏粉粒占比 21.9% ($P < 0.05$),并提高团聚体 MWD (13.5%; $P < 0.05$). 以旋耕和深松为对照时,免耕对土壤团聚体各指标影响的效应均不显著.

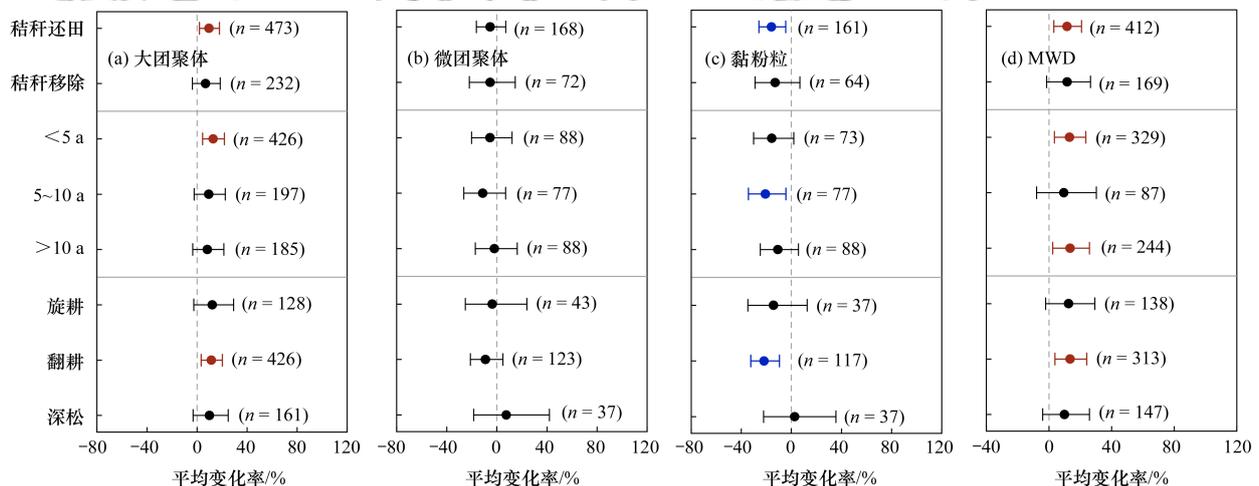


图 4 不同田间管理措施下,免耕对土壤团聚体组成及稳定性影响的效应值

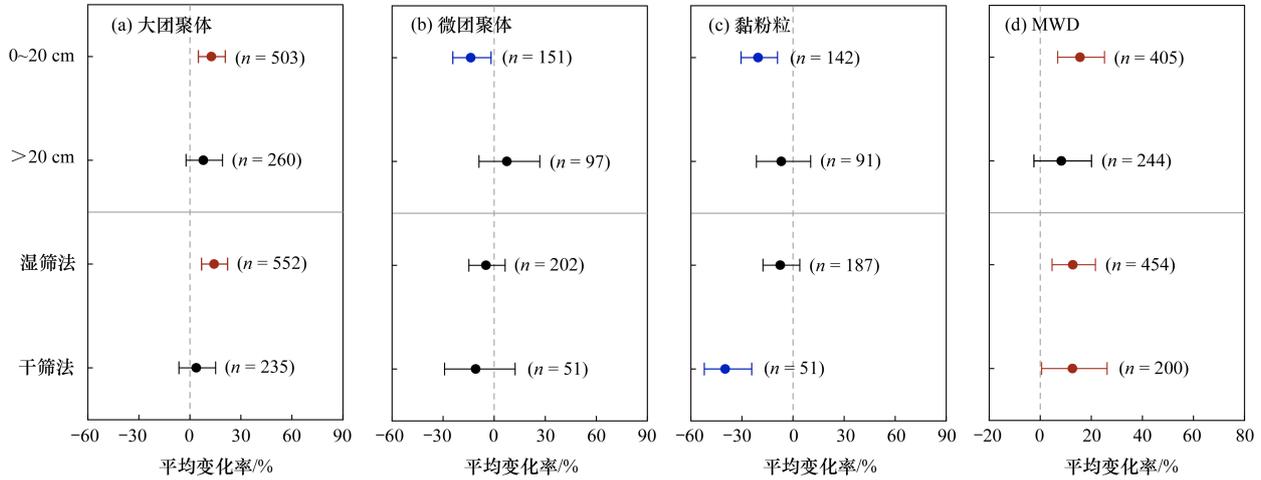
Fig. 4 Effect size of no-tillage on soil aggregate composition and stability under different field management practices

本 Meta 分析中,各研究选取的土层深度不一致. 将不同层深的土壤样品按统一标准分析,其结果可能存在偏差. 因此,本研究将取样土层统一划分为耕层土壤(0 ~ 20 cm)和深层土壤(> 20 cm). 亚组分析结果显示(图 5):相比耕作,免耕能够改善耕层土壤

团聚体的结构和稳定性. 免耕处理下耕层的大团聚体占比提高 12.6% ($P < 0.05$),微团聚体和黏粉粒占比降低 13.8% 和 20.5% ($P < 0.05$);团聚体 MWD 提高 15.6% ($P < 0.05$),增强了团聚体稳定性. 而在深层土壤,免耕对团聚体结构及稳定性没有影响.

常规的土壤团聚体筛分方法分为干筛法与湿筛法. 不同筛分方法下, 免耕对团聚体粒径分布的影响存在差异(图5). 本研究结果表明, 使用湿筛法时, 免耕相比耕作显著提高大团聚体占比, 增幅 14.2% ($P < 0.05$), 而使用干筛法时两者差异不显著. 不同筛分方法下, 免耕相比耕作对黏粉粒的影响差异达

到极显著水平($P < 0.001$, 表1). 使用干筛法时, 免耕显著降低黏粉粒占比 39.8% ($P < 0.05$), 而使用湿筛法时两者差异不显著. 在团聚体稳定性方面, 免耕对团聚体 MWD 的效应不受筛分方法影响, 干筛法、湿筛法下, 免耕均显著提高团聚体 MWD (12.6%、12.8%; $P < 0.05$).



红色线条表示免耕相比耕作对团聚体粒径分布等指标具有显著正效应, 蓝色线条表示具有显著负效应, 黑色线条表示效应不显著; n 表示样本数

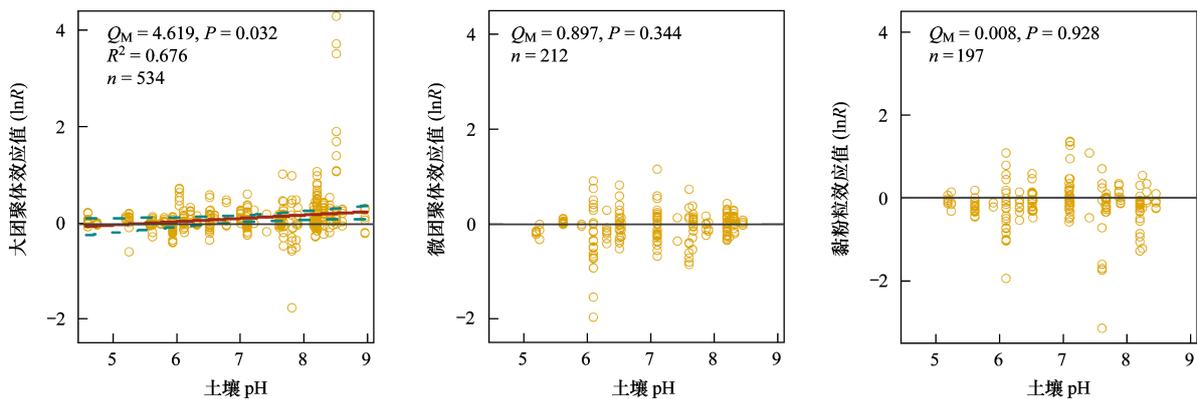
图 5 不同土层及筛分方法下, 免耕对土壤团聚体组成及稳定性影响的效应值

Fig. 5 Effect size of no-tillage on soil aggregate composition and stability under different soil layers and aggregate sieving methods

2.3 免耕对土壤团聚体影响的 Meta 回归分析

对试验区域的年平均温度、年平均降雨量, 试验地初始土壤 pH、初始土壤有机碳含量(SOC)和全氮含量(TN)等连续变量进行 Meta 回归分析, 探究不同环境因子下对免耕对团聚体粒径分布及 MWD 的影响. 本研究发现, 初始土壤 pH 与土壤大团聚体效应

值呈线性相关($P < 0.05$), 而其他变量与土壤团聚体粒径分布及 MWD 间均无显著的相关关系. Meta 回归结果表明(图6), 初始土壤 pH 越高, 免耕提高大团聚体占比的效应值越高 ($P < 0.05$, $R^2 = 0.676$). 这意味着, 在偏碱性土壤中, 免耕改善大团聚体占比的效果更好.



虚线范围表示 95% CI; n 表示用于 Meta 回归分析的样本数

图 6 土壤 pH 与团聚体粒径分布的 Meta 回归分析

Fig. 6 Meta regression analysis of soil pH and aggregate distribution

3 讨论

3.1 免耕对土壤团聚体的影响

Meta 分析结果显示, 相比耕作, 免耕显著提高土壤大团聚体占比, 降低黏粉粒占比, 并提高团聚体

MWD ($P < 0.05$, 图1), 增强团聚体稳定性. 但免耕未显著增加各粒级团聚体有机碳含量(图1). 通常认为, 团聚体是土壤颗粒粘连团聚与破坏崩解两个过程共同作用的结果. 团聚体的聚合和稳定通常与有机质含量、微生物以及土壤物理等因素有关^[26], 多

糖、胡敏酸等有机胶结剂能够将不同大小的土壤颗粒胶结起来,形成体积更大的团粒结构,推动团聚体的形成与稳定^[27],在这个过程中,团聚体也包裹了更多的碳^[28];微生物则可以通过菌根菌丝(来自真菌及放线菌)将土壤颗粒机械缠绕在一起,或通过分泌多糖等代谢产物促进团聚体的胶结和碳固定^[29];铁铝氧化物是团聚体的有效结合剂,其与有机质结合形成的有机-无机复合体是团聚体形成的重要机制^[30],因此,土壤矿质类型及含量等物理性质也是影响团聚体的主要因素之一。团聚体的破坏通常与土壤扰动、土壤质地以及水分变化等因素有关。本研究中,免耕显著增加大团聚体比例,却未能增加其碳含量,说明增加的大团聚体可能不是通过有机胶结形成的,而是因为免耕减少了对团聚体的扰动破坏,形成土壤颗粒的“假性团聚”,因此,免耕未能增加团聚体碳含量。也有研究认为免耕条件下丰富的真菌^[31,32]可以形成大量菌丝及分泌物,促进微团聚体和黏粉粒向大团聚体的转化。大团聚体的胶结程度更高^[33],因此,免耕可能通过提高大团聚体占比的方式来增加大团聚体碳总量,但未能提高其碳含量。关于免耕对农田土壤团聚体形成和碳含量变化的影响机制有待进一步研究。

3.2 影响免耕对土壤团聚体效应的因素

3.2.1 地域特性

不同试验区域下,免耕对团聚体影响的效应不同。本研究表明,免耕提高西北地区大团聚体占比的效果最为显著。西北地区水资源稀缺,风沙较大,传统耕作以犁耕为主^[34]。免耕措施能够降低西北地区耕作对土壤团聚体的破坏,减轻风蚀造成的土壤损失,从而维持良好的土壤结构。在华北地区,免耕相比耕作显著降低黏粉粒占比 15.9%,提高团聚体 MWD (15.4%; $P < 0.05$),增强团聚体稳定性。这可能是因为高强度的集约化生产模式下,华北平原农田耕作频繁,土壤结构破坏严重。而免耕减少了耕作带来的扰动破坏,提高大团聚体占比,增强土壤稳定性^[35]。

免耕对团聚体的影响在不同质地的土壤中存在差异。本研究结果表明,相比耕作,在黏壤土中实行免耕能够降低黏粉粒占比,提高团聚体稳定性;而在黏土和壤土中,免耕改善土壤团聚体结构及稳定性的效果逐步降低。前人研究认为,通过无机矿物或有机-无机复合体聚集的团粒结构更具稳定性^[27],黏壤土中铁铝氧化物、层状硅酸盐及黏土含量丰富^[36],能够通过物理或化学的方式增强土壤颗粒之间的相互作用,形成稳定的大团聚体。另外,相比黏土,黏壤土的土壤质地更为疏松透气,利于微生物活动,有助于

促进黏粉粒向大团聚体转化。因此,在黏壤土中,免耕改善团聚体稳定性的效应更明显。

在土地利用方式方面,旱田、水旱轮作田以及水田中,免耕仅能显著改善旱田土壤的团聚体粒径分布及稳定性。这可能是因为旱田土壤的耕作强度大,团聚体破坏程度高^[37],旱地免耕更有利于发挥其保持水土的作用。而在水旱轮作田及水田中,土壤处于季节性或全年淹水状态,加剧了大团聚体向微团聚体或更小颗粒的崩解^[38],免耕优化团聚体结构及稳定性的效应不明显。

本研究发现,土壤 pH 与大团聚体效应值间存在显著的线性关系 ($P < 0.05$),初始土壤 pH 值越高,免耕相对耕作提高大团聚体占比的效果越好。碱性土壤有机质含量低且含盐量高^[39]。由于缺乏有机胶结物质,碱性土壤颗粒的聚集能力不强;高 pH 条件下,土壤矿质凝聚程度降低,同样限制土壤颗粒间的化学结合;碱性土壤富含的交换性 Na^+ 还是公认的团聚体结构“分散剂”,会加剧大团聚体的分解^[40]。本研究发现,相比耕作,免耕能够影响碱性土壤团聚体的结构变化。免耕不仅减少对碱土大团聚体的扰动破坏,还能降低水分蒸发量,抑制盐分在土壤表层聚集,进而减轻由盐分引起的团聚体解聚,提高大团聚体占比。免耕条件下,表土覆盖的作物残茬能够增加土壤有机质输入,残茬腐解产生的有机酸还具有降低土壤 pH 的作用^[41,42],有利于碱性土壤物理结构的改良。

3.2.2 农田管理

秸秆还田能够培肥地力,改善土壤结构。本研究结果表明,秸秆还田条件下,免耕显著提高土壤大团聚体比例,具有优化团聚体结构,提高团聚体稳定性的效果,而秸秆移除后,免耕改善团聚体的效果便不再显著。秸秆还田时,免耕优化团聚体的原因可能有 3 个方面:秸秆覆盖在土壤表层,能够为土壤提供大量新鲜有机质^[43],团聚体在有机质的胶结作用下向大团聚体聚集转化;秸秆覆盖减少土壤水分散失^[44],有助于维持适宜土壤微生物生存的土壤生境^[45],微生物的丰度及活性提高,能够通过菌丝缠绕及分泌有机质推动团聚体的优化稳定;秸秆腐解释放氮、磷等养分,促进作物生长,作物凋落物、分泌物及细根的机械缠绕均有助于大团聚体形成,并提高团聚体稳定性。而秸秆移除后,土壤处于贫瘠、干旱状态,限制了团聚体的胶结转化及微生物、植物的物理团聚,不利于提高团聚体稳定性。

从试验持续时间角度分析,免耕对团聚体影响的效应存在差异。本试验开展初期 ($< 5 \text{ a}$),免耕显著提高大团聚体占比,可能主要是因为减少了对大团聚体的破坏。当试验持续 5 ~ 10 a,免耕下的土壤黏

粉粒占比显著降低 20.7% ($P < 0.05$). 在这一阶段, 免耕可能通过有机质胶结、物理缠绕等方式促进了黏粉粒向微团聚体和大团聚体的聚集转化. 试验持续 10 a 以上时, 免耕下的团聚体粒径变化不显著, 但其稳定性显著提升 13.5% ($P < 0.05$), 可能是因为长期免耕下的土壤相对紧实, 进而提升团聚体结构稳定性.

从土壤深度角度分析, 免耕下的土壤团聚体各指标均存在显著差异. 免耕能优化耕层团聚体结构, 提高耕层团聚体稳定性, 而对深层土壤没有作用. 农田系统中, 耕层(0~20 cm)受到的耕作扰动最频繁. 相比耕作, 免耕最大程度地减少了耕层土壤团聚体的扰动破坏, 改善团聚体的效果明显. 而深层土壤(>20 cm)本身受到的扰动较少, 有机质及养分含量低^[46], 微生物丰度、活性及群落特征也与耕层存在较大差异^[47]. 因此, 很难用耕层土壤的理论机制来解释深层土壤. 参照团聚体形成机制, 若在减轻深层土壤扰动的同时增加外源有机质及养分输入, 提高微生物活性, 则有助于优化深层土壤的团聚体结构及稳定性.

3.2.3 筛分方法

土壤团聚体筛分主要有干筛法和湿筛法. 湿筛法下免耕提高水稳性大团聚体占比的效果显著, 但对黏粉粒占比没有显著影响, 而干筛法下免耕显著降低黏粉粒占比. 前人研究认为, 湿筛法易对团聚体结构产生一定程度的破坏; 干筛法受限于筛分强度, 可能削弱处理之间的差异^[48]. 因此, 两种筛分方式均有一定的局限性. 本研究发现, 团聚体平均重量直径不受筛分方法的影响, 因此, 相比团聚体粒级分布, 评估团聚体的平均重量直径可能更为客观.

4 结论

(1) 相比耕作, 免耕能够增加农田土壤大团聚体占比, 提高团聚体稳定性, 但未显著提高各粒级团聚体有机碳含量.

(2) 免耕对团聚体结构和稳定性的改良效果受区域、农田类型、土壤类型及农田管理方式等多重因素影响.

(3) 未来应结合区域特征及秸秆还田等措施, 进一步优化耕作方式, 实现土壤团聚体结构优化和团聚体固碳增效的协同提升, 综合提升农田土壤质量.

参考文献:

[1] Shakoar A, Shahbaz M, Farooq T H, *et al.* A global meta-analysis of greenhouse gases emission and crop yield under no-tillage as compared to conventional tillage [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **750**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142299.

[2] 陈强, 孙涛, 宋春雨. 免耕对土壤物理性状及作物产量影响[J]. *草业科学*, 2014, **31**(4): 650-658.
Chen Q, Sun T, Song C Y. Influence of no-tillage on soil physical properties and crop production [J]. *Pratacultural Science*, 2014, **31**(4): 650-658.

[3] 张彬, 陈奇, 丁雪丽, 等. 微生物残体在土壤中的积累转化过程与稳定机理研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, **59**(6): 1479-1491.
Zhang B, Chen Q, Ding X L, *et al.* Research progress on accumulation, turnover and stabilization of microbial residues in soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, **59**(6): 1479-1491.

[4] 王笃超, 吴景贵. 不同有机物料对连作大豆土壤养分及团聚体组成的影响[J]. *土壤学报*, 2018, **55**(4): 825-834.
Wang D C, Wu J G. Effects of organic manure on soil nutrients and aggregate composition in soil under Mono-Cropping of soybean [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, **55**(4): 825-834.

[5] 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 等. 岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4353-4363.
Leng M, Jin Z J, Xiao X Y, *et al.* Comparison of bacterial community structure in soil aggregates between natural karst wetland and paddy field [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4353-4363.

[6] Yilmaz E, Sönmez M. The role of organic/bio-fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **168**: 118-124.

[7] Tripathi R, Nayak A K, Bhattacharyya P, *et al.* Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions after 41 years long-term fertilizer experiment in tropical rice-rice system [J]. *Geoderma*, 2014, **213**: 280-286.

[8] 李庆, 王玉凤, 张翼飞, 等. 耕作方式对三江平原玉米土壤结构及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021, (6): 95-103.
Li Q, Wang Y F, Zhang Y F, *et al.* Effects of tillage methods on soil structure and yield of maize in Sanjiang Plain [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021, (6): 95-103.

[9] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.

[10] 刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, **60**(3): 627-643.
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, **60**(3): 627-643.

[11] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(6): 1277-1284.
Liu H M, Li R Y, Gao J J, *et al.* Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(6): 1277-1284.

[12] Van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, **14**(C): 20-23.

[13] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, **40**(9): 1973-1979.
Zhou H, Lv Y Z, Yang Z C, *et al.* Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(9): 1973-1979.

[14] Papendick R I, Parr J F. No-till farming: The way of the future for a sustainable dryland agriculture [J]. *Annals of Arid Zone*, 1997,

- 36(3): 193-208.
- [15] 霍琳, 杨思存, 王成宝, 等. 耕作方式对甘肃引黄灌区灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3463-3472.
- Huo L, Yang S C, Wang C B, *et al.* Effects of tillage types on soil aggregate distribution and stability in irrigated sierozem of Gansu Yellow River irrigation area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3463-3472.
- [16] 郭贤仕, 杨如萍, 马一凡, 等. 保护性耕作对坡耕地土壤水分特性和水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 1-5.
- Guo X S, Yang R P, Ma Y F, *et al.* Effects of conservation tillage on soil water characteristics and soil erosion in slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 1-5.
- [17] Weidhuner A, Hanauer A, Krausz R, *et al.* Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 208, doi: 10.1016/j.still.2020.104878.
- [18] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 85-94.
- Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, *et al.* Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 85-94.
- [19] 弓晓雅, 赵锦, 杨晓光. 东北大豆农田保护性耕作水热效应的 Meta 分析[J]. 中国农业气象, 2022, 43(11): 867-880.
- Gong X Y, Zhao J, Yang X G. Hydrothermal effects of the conservation tillage in soybean farmland in Northeast China: a Meta-analysis[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(11): 867-880.
- [20] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, *et al.* Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2780-2792.
- [21] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [22] Van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, *et al.* Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage[J]. Science, 2014, 344(6183): 508-509.
- [23] Han M G, Zhu B. Changes in soil greenhouse gas fluxes by land use change from primary forest[J]. Global Change Biology, 2020, 26(4): 2656-2667.
- [24] Chen J, Luo Y Q, Van Groenigen K J, *et al.* A keystone microbial enzyme for nitrogen control of soil carbon storage[J]. Science Advances, 2018, 4(8), doi: 10.1126/sciadv.aag1689.
- [25] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241.
- Wu K N, Zhao R. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227-241.
- [26] 卢金伟, 李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81-85.
- Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85.
- [27] 徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1523-1529.
- Xu X R, Wang J K. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1523-1529.
- [28] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317-331.
- Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(2): 317-331.
- [29] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1625-1632.
- Li N, Han X Z, You M Y, *et al.* Research review on soil aggregates and microbes[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(9): 1625-1632.
- [30] 陈红, 马文明, 王长庭, 等. 高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其胶结物质的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 151-163.
- Chen H, Ma W M, Wang C T, *et al.* Effects of shrub-encroached grassland on the stability of soil aggregates and cementing materials in alpine grassland of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1): 151-163.
- [31] Gao M, Li H Y, Li M. Effect of no tillage system on soil fungal community structure of cropland in Mollisol: A case study[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13, doi: 10.3389/fmicb.2022.847691.
- [32] 杨华, 李彤, 王威雁, 等. 保护性耕作对西北旱区从枝菌根真菌及土壤理化性质的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(10): 1528-1536.
- Yang H, Li T, Wang W Y, *et al.* Responses of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and soil physical and chemical properties under different tillage practices in arid area of Northwest China[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, 29(10): 1528-1536.
- [33] Qiu S J, Nie J, Long S P, *et al.* Aggregate mass and carbon stocks in a paddy soil after long-term application of chemical or organic fertilizers[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(4): 1564-1577.
- [34] 刘爽, 王雅, 刘海龙, 等. 晋西北不同土地恢复管理措施下土壤物理性状分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 235-244.
- Liu S, Wang Y, Liu H L, *et al.* Soil physical properties under different restoration measures in the northwest of Shanxi province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(2): 235-244.
- [35] Liu W X, Wei Y X, Li R C, *et al.* Improving soil aggregates stability and soil organic carbon sequestration by no-till and legume-based crop rotations in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2022, 847, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157518.
- [36] Wu X L, Wei Y J, Cai C F, *et al.* Quantifying the contribution of phyllosilicate mineralogy to aggregate stability in the East Asian monsoon region[J]. Geoderma, 2021, 393, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115036.
- [37] 张银平, 迟岩杰, 王占滨, 等. 麦-玉两熟区组合耕作模式周期生产力综合评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 35-43.
- Zhang Y P, Chi Y J, Wang Z B, *et al.* Comprehensive evaluation of periodic productivity of combined tillage mode in wheat-maize double cropping areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 35-43.
- [38] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. 土壤, 2018, 50(5): 853-865.
- Liu Y, Ma M H, Wu S J, *et al.* Soil aggregates as affected by wetting-drying cycle: A review[J]. Soils, 2018, 50(5): 853-865.

- [39] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, **31**(3): 364-372.
Dong X L, Wang J T, Tian L, *et al.* Review of relationships between soil aggregates, microorganisms and soil organic matter in salt-affected soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, **31**(3): 364-372.
- [40] 余洁, 苗淑杰, 乔云发. 不同类型土壤团聚体稳定机制的研究[J]. 中国农学通报, 2022, **38**(14): 89-95.
Yu J, Miao S J, Qiao Y F. The stabilization mechanism of different types of soil aggregates [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, **38**(14): 89-95.
- [41] Fan W, Wu J G, Li J M, *et al.* Comparative effects of different maize straw returning modes on soil humus composition and humic acid structural characteristics in Northeast China [J]. Chemistry and Ecology, 2018, **34**(4): 355-370.
- [42] Zhao X, Liu B Y, Liu S L, *et al.* Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: A meta-analysis [J]. Land Degradation & Development, 2020, **31**(6): 694-709.
- [43] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(5): 526-535.
Pan J L, Dai W A, Shang Z H, *et al.* Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(5): 526-535.
- [44] Chai Y W, Chai Q, Li R, *et al.* Straw strip mulching in a semiarid rainfed agroecosystem achieves winter wheat yields similar to those of full plastic mulching by optimizing the soil hydrothermal regime [J]. The Crop Journal, 2022, **10**(3): 879-892.
- [45] 温美娟, 杨思存, 王成宝, 等. 深松和秸秆还田对灌耕灰钙土土壤细菌多样性和群落结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, **40**(2): 423-433.
Wen M J, Yang S C, Wang C B, *et al.* Effects of subsoiling and the return of straw on soil bacterial diversity and community structure in an irrigated sierozem farmland [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, **40**(2): 423-433.
- [46] Ning T Y, Liu Z, Hu H Y, *et al.* Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture [J]. Soil and Tillage Research, 2022, **223**, doi: 10.1016/j.still.2022.105490.
- [47] Du X F, Deng Y, Li S Z, *et al.* Steeper spatial scaling patterns of subsoil microbiota are shaped by deterministic assembly process [J]. Molecular Ecology, 2021, **30**(4): 1072-1085.
- [48] 韦慧, 邓羽松, 林立文, 等. 喀斯特生态脆弱区典型小生境土壤团聚体稳定性比较研究[J]. 生态学报, 2022, **42**(7): 2751-2762.
Wei H, Deng Y S, Lin L W, *et al.* Comparative study on the stability of soil aggregates in typical microhabitats in karst ecologically fragile areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(7): 2751-2762.



CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i>	(617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang	(626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i>	(635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i>	(645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i>	(655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i>	(668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i>	(678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i>	(700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i>	(709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i>	(721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i>	(732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i>	(744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang	(755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i>	(768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i>	(780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i>	(792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i>	(802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong	(813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i>	(826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i>	(837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo	(844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i>	(854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i>	(862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i>	(873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i>	(885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i>	(898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i>	(909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i>	(929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i>	(940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i>	(952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province: Taking Puding County as an Example	LI Yue, LUO Hong-fen	(961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i>	(974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing	(983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i>	(992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i>	(1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong	(1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i>	(1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i>	(1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i>	(1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i>	(1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i>	(1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i>	(1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i>	(1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i>	(1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i>	(1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i>	(1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i>	(1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i>	(1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i>	(1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i>	(1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i>	(1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang	(1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li	(1222)