

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪太 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响

闵文豪¹, 王春丽², 王莉玮², 易廷辉², 卞京军², 支梅¹, 孙琪惠¹, 宿锦锦¹, 赵秀兰^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业生态与资源保护站, 重庆 401120)

摘要: 全生物降解地膜是解决白色污染问题的有效途径之一,但其对土壤-植物系统的影响尚不清楚. 为全生物降解地膜大面积应用的安全性评价提供依据,采用盆栽试验研究了全生物降解地膜原料颗粒种类(H、S和X)和用量(2.5、10和40 g·kg⁻¹)对土壤理化性质、生物学性质及植物生长和养分吸收转运的影响. 结果表明,3种全生物降解地膜原料颗粒显著提高土壤pH,但对土壤有机质含量影响不显著,H地膜颗粒中高用量和S地膜颗粒低中用量时对土壤硝化作用及土壤氮的有效性有积极作用,而X地膜颗粒则表现为抑制作用;H地膜颗粒使土壤有效磷含量提高,S和X无显著影响;X地膜颗粒使土壤有效钾含量提高,S和H无显著影响. 3种全生物降解地膜颗粒对土壤酶活性的影响因地膜种类、用量和酶的类型不同而异,随着地膜颗粒用量提高,3种土壤酶活性均呈现下降趋势. 对小麦(*Triticum aestivum* L.)生长而言,除低中用量的S处理外,其余处理均抑制小麦的生长,其中X地膜颗粒对小麦根、茎叶和籽粒生物量抑制作用最大且随地膜颗粒用量提高小麦生物量抑制效果越明显. 对小麦养分而言,在地膜颗粒低用量时促进氮吸收、高用量时抑制氮吸收,且地膜颗粒对磷钾吸收起抑制作用. 3种地膜颗粒处理下,小麦茎叶和籽粒氮磷的分配比例差异显著,但钾的分配比例差异不显著. 相关分析表明,小麦生物量是影响小麦养分积累量的主要因素.

关键词: 全生物降解地膜原料颗粒; 土壤理化性质; 小麦; 生长性状; 养分

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0560-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105081

Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation

MIN Wen-hao¹, WANG Chun-li², WANG Li-wei², YI Ting-hui², BIAN Jing-jun², ZHI Mei¹, SUN Qi-hui¹, SU Jin-jin¹, ZHAO Xiu-lan^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Chongqing 401120, China)

Abstract: Biodegradable plastic film is one of the effective ways to solve the problem of white pollution in agriculture. However, its impacts on soil-plant systems are not well documented. In order to provide a basis for the safety evaluation of large-scale application of biodegradable plastic film, pot experiments were conducted to investigate the effects of the types(H, S, and X) and doses(2.5, 10, and 40 g·kg⁻¹) of biodegradable film raw material particles on the soil physiochemical properties, biological properties, growth, and nutrient absorption by wheat (*Triticum aestivum* L.). The results showed that three types of biodegradable film raw material particles significantly increased soil pH but had no significant effect on soil organic matter content; medium-high doses of H and low-medium doses of S plastic particles had a positive effect on soil nitrification and soil nitrogen availability, whereas X film particles had an inhibitory effect. H film particles increased soil available phosphorus content, and S and X had no significant effect. X film particles increased the content of soil available potassium, but S and H had no significant effect. The effects of three types of biodegradable raw material particles on soil enzyme activities varied with the types and doses of plastic film and enzyme types. With the increase in the doses of plastic film particles, the activities of three kinds of soil enzymes showed a downward trend. Except for the low and medium doses of the S treatment, the other treatments inhibited the growth of wheat, in which X film particles had the greatest inhibitory effect on the biomass of wheat roots, stems, leaves, and grain; with the increase in the doses of film particles, the inhibition effect of wheat biomass was more obvious. For wheat nutrients, the absorption of nitrogen was promoted at low doses and inhibited at high doses, and the three types of film particles inhibited the absorption of phosphorus and potassium. There were significant differences in the distribution ratio of nitrogen and phosphorus between the stems, leaves, and grains of wheat by all the film particles; however, there was no significant difference in the distribution ratio of potassium between those treatments. Correlation analysis showed that wheat biomass was the main factor affecting wheat nutrient accumulation.

Key words: biodegradable plastic film material particles; soil physiochemical properties; wheat; growth trait; nutrient

地膜覆盖是改善作物生长环境和抑制杂草生长的有效方法之一,在提高作物产量、改善作物品质和减少农药用量等方面发挥着巨大作用^[1,2]. 然而,目前常见的地膜材料大多为聚乙烯成分,其分子结构非常稳定,在自然条件下降解非常缓慢^[3],长期使用导致大量碎膜残留在土壤中,使土壤环境恶化,作物产量降低,引起严重的环境问题^[4]. 解决这一问题的有效途径之一就是改变材料基质,研制和应

用全生物降解地膜^[5]. 全生物降解地膜是一种利用全生物降解材料生产,在特定时间范围内,能够自然完全降解为CO₂和H₂O的塑料薄膜^[6]. 已有研究和

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2021-06-23

基金项目: 农业农村部农业农村环境治理专项(13200246); 重庆市大学生创新创业计划项目(S20190635024)

作者简介: 闵文豪(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制, E-mail: 240512571@qq.com

* 通信作者, E-mail: zsl@swu.edu.cn

田间应用表明,全生物降解地膜在保温、抑草和提高作物产量方面具有与普通聚乙烯地膜相当的功能,可以替代聚乙烯地膜使用^[7,8],从而达到降低农业土壤中地膜残留的效果^[9].然而,全生物降解地膜使用过程中或使用后会发生降解,生成的降解产物会进入土壤中,对土壤健康和作物生长可能产生不良影响,因而全生物降解地膜应用的环境安全性受到极大关注^[10,11].

全生物降解地膜是由不同聚合物组合而成,在生产过程中需加入少量的添加剂以满足加工要求,使最终产品达到预期性能,如良好的机械安装性能和稳定性,特定的覆盖特征或促进地膜降解等^[12].目前,关于全生物降解地膜成品、降解材料单一聚合物和添加剂等对土壤理化性质及作物生长的影响已有报道.如 Qi 等^[13]的研究将淀粉基全生物降解地膜碎片施入土壤中,发现土壤孔隙率和田间持水量等显著增大; Fritz 等^[14]的研究发现,在含 2% 生物降解塑料地膜碎片的土壤中种植水芹、小麦和油菜,其生物量降低 20%~50%.有研究将聚酰胺和纤维等 6 种不同的单一聚合物分别埋入土壤,发现大葱的生物量、元素成分、根系性状和土壤理化性质发生显著变化^[15]; Boots 等^[16]的研究将聚乳酸和纤维等单一聚合物分别埋入土壤中,发现黑麦草发芽率、生长高度被抑制和土壤水稳性团聚体结构发生显著变化. Xie 等^[17]的研究发现添

加剂邻-苯二甲酸酯对土壤碳、氮和磷循环有显著影响;张惠^[18]的研究发现添加剂邻-苯二甲酸二甲酯明显抑制了黄瓜生长且显著改变植物酶活性.但关于全生物降解地膜原料颗粒对土壤理化性质、生物学性质、植物生长和养分吸收转运的影响报道很少.本研究选择 3 个企业的全生物降解地膜原料颗粒,采用盆栽试验研究了全生物降解地膜原料颗粒种类和添加量对土壤理化性质、生物学性质及植物生长和养分转运吸收的影响,以期在全生物降解地膜大面积应用的安全性评价提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试小麦品种为糯麦 1 号 (*Triticum aestivum* L. var. Ruomai No. 1),要求种子大小一致、饱满度高,试验前做发芽试验保证发芽率在 95% 以上.

全生物降解地膜原材料颗粒来自国内 3 家全生物降解地膜生产企业,编号分别为 X、S 和 H.主要成分均为聚己二酸-对-苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT) 和聚乳酸 (PLA),3 种地膜颗粒经马弗炉在 600℃ 高温下完全转化为灰分,再用 1:1 盐酸溶解地膜颗粒灰分,定容后用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES, Agilent Technologies) 测定地膜颗粒元素成分含量 (表 1).

表 1 全生物降解地膜原料颗粒元素含量

Table 1 Contents of particulate elements in biodegradable film raw material particles									
地膜种类	ω (灰分) /%	ω (Ca) /g·kg ⁻¹	ω (K) /mg·kg ⁻¹	ω (P) /mg·kg ⁻¹	ω (Al) /mg·kg ⁻¹	ω (Fe) /mg·kg ⁻¹	ω (Zn) /mg·kg ⁻¹	ω (Mg) /mg·kg ⁻¹	ω (Ti) /mg·kg ⁻¹
H	14.10	15.3	54.31	108.81	244.53	183.36	2 136.81	3 261.72	159.65
S	5.20	6.22	51.61	79.04	903.31	239.52	27.34	729.52	153.98
X	1.10	1.05	81.03	913.87	9.68	33.67	23.24	343.97	40.46

供试土壤为石灰岩黄壤.采集自重庆市彭水县鹿鸣乡,海拔高度约为 420 m.采集后,土壤样品经风干去除杂物后混匀磨碎,过 5 mm 尼龙筛备用.土壤的基本性质为 pH 6.95, ω (总氮) 1.10 g·kg⁻¹, ω (总磷) 2.10 g·kg⁻¹, ω (总钾) 6.35 g·kg⁻¹, ω (有效氮) 45.08 mg·kg⁻¹, ω (有效磷) 16.21 mg·kg⁻¹, ω (有效钾) 160.02 mg·kg⁻¹, ω (有机质) 23.75 g·kg⁻¹. 根据全国第二次土壤普查养分分级标准,本试验用的土壤肥力处于中上水平.

1.2 试验设计

X、S 和 H 这 3 种地膜颗粒按 2.5、10 和 40 g·kg⁻¹ 用量与 500 g 风干土壤混合混匀,装入塑料盆中,记为低、中和高用量,以不添加地膜颗粒为对照 (CK),共 10 个处理,每处理重复 3 次,随机排列,

在田间持水量 70% 的土壤水分条件下培养 3 个月,每盆播入 10 粒小麦种子,当小麦幼苗生长至株高 10cm 左右间苗,每盆保留 5 株长势均匀的植株,培养至成熟期.培养过程中,每周随机更换盆播的位置,采用称重方法保持土壤水分在田间持水量的 70% 左右.

1.3 分析测试方法

1.3.1 小麦植株生长性状及养分测定

待小麦生长至成熟期,用卷尺测定小麦株高,并收获植株.将收获的植株分成根、茎叶和籽粒 3 部分,用自来水清洗后再用去离子水洗净,70℃ 烘干后用称重,磨细,依照文献[19],采用 H₂SO₄-H₂O₂ 法对植株样品消解后,分别用凯氏定氮法、钼蓝比色法和火焰光度法测定植株各部分的氮、磷和钾含量.

1.3.2 土壤基本理化性质及酶活性测定

收获后采集土样,风干磨细过 2 mm 筛,依照文献[19],采取电位法(水土比 2.5:1)测定土壤 pH, 2 mol·L⁻¹ KCl 提取-分光光度法测定土壤铵态氮和硝态氮含量, 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 提取-钼蓝比色法测定土壤有效磷含量, 1 mol·L⁻¹ NH₄AC 提取-火焰光度法测定土壤有效钾含量,高温外热重铬酸钾氧化法测定土壤有机质含量. 依照文献[20]分别采用苯酚-次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法和高锰酸钾滴定法测定土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性. 3 种酶活性的表示方法分别以单位土壤生成的 NH₄⁺ 质量、单位土壤生成的葡萄糖质量和单位土壤消耗 0.02 mol·L⁻¹ KMnO₄ 溶液体积与对照消耗的溶液体积差值表示.

1.4 数据统计与分析

图表中的数据均为 3 次重复的平均值 ± 标准误差,用 Excel 2010 进行数据整理,采用 SPSS 20.0 软件进行方差分析,采用邓肯法进行数据间的差异比较. 相关性分析采用皮尔逊相关分析法,显著性检验为双尾检验. 设定 $P < 0.05$ 为显著水平.

2 结果与分析

2.1 3 种全生物降解地膜原料颗粒对土壤基本理化性质的影响

添加 3 种全生物降解地膜原料颗粒后土壤基本

理化性质如表 2 所示. 3 种地膜原料颗粒使土壤 pH 提高 0.30 ~ 0.57 个单位,提高幅度随地膜原料颗粒添加量的提高而增大,增幅以 S 最大, H 最小. 3 种地膜颗粒使土壤有机质含量略有提升,但差异不显著.

随地膜颗粒用量提高,土壤铵态氮含量呈下降趋势,但仅 S 在高用量时, X 在中高用量时较 CK 显著降低. 与铵态氮不同,随地膜颗粒用量提高,土壤硝态氮呈先升高后降低趋势,与 CK 相比, H 低用量, S 高用量和所有 X 处理均显著降低, H 中高用量和 S 低中用量显著升高. 无机氮为土壤铵态氮与硝态氮之和. H 处理土壤无机氮含量与 CK 差异不显著, S 地膜颗粒低中用量显著升高、高用量显著降低, X 地膜颗粒所有用量均显著降低. 土壤有效磷含量均随地膜颗粒添加量的提高而增高,但与 CK 相比, H 地膜颗粒所有处理均增高,在中高用量达显著水平, S 地膜颗粒降低, X 在低用量时降低,中高用量时略有增高. 土壤有效钾含量随地膜颗粒用量的增高无明显变化规律,除 H 高用量和所有 X 处理较 CK 显著升高,其余处理差异不显著. 3 种地膜中, S 与 H 处理土壤铵态氮、硝态氮及无机氮含量的平均值显著高于 X 处理,但与 CK 差异不显著;有效磷含量以 S 处理最低,但 3 种地膜颗粒处理与 CK 差异不显著;土壤有效钾含量 X 处理显著高于 CK、S 和 H 处理,且后 3 者间的差异性不显著.

表 2 全生物降解地膜原料颗粒对土壤基本性质的影响¹⁾

Table 2 Effect of biodegradable film raw material particles on soil physiochemical properties

地膜种类	ω (地膜) /g·kg ⁻¹	pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (铵态氮) /mg·kg ⁻¹	ω (硝态氮) /mg·kg ⁻¹	ω (无机氮) /mg·kg ⁻¹	ω (有效磷) /mg·kg ⁻¹	ω (有效钾) /mg·kg ⁻¹
H	0	6.69 ± 0.03c	23.49 ± 1.07a	13.58 ± 0.39a	9.25 ± 0.24b	22.83 ± 0.63ab	15.00 ± 0.71c	130.69 ± 1.08b
	2.5	6.99 ± 0.03b	23.56 ± 0.89a	13.68 ± 1.07a	7.92 ± 0.47c	21.60 ± 1.51b	16.19 ± 0.54bc	129.31 ± 2.54b
	10	7.02 ± 0.05b	23.73 ± 0.95a	13.23 ± 1.00a	11.25 ± 0.47a	24.48 ± 1.47a	16.71 ± 0.71ab	130.01 ± 2.54b
	40	7.21 ± 0.04a	23.81 ± 0.95a	12.74 ± 1.02a	10.95 ± 0.75a	23.69 ± 1.77ab	17.81 ± 0.53a	136.25 ± 0.94a
S	0	6.69 ± 0.03d	23.49 ± 1.07a	13.58 ± 0.39a	9.25 ± 0.24c	22.83 ± 0.63b	15.00 ± 0.71a	130.69 ± 1.08a
	2.5	7.01 ± 0.02c	23.73 ± 0.95a	14.16 ± 0.60a	11.49 ± 0.26b	25.65 ± 0.86a	13.64 ± 0.45a	128.06 ± 6.32a
	10	7.22 ± 0.03b	23.80 ± 0.95a	13.49 ± 0.37a	12.38 ± 0.53a	25.87 ± 0.90a	13.94 ± 0.67a	129.55 ± 3.62a
	40	7.26 ± 0.01a	23.56 ± 0.89a	11.99 ± 0.31b	7.49 ± 0.21d	19.48 ± 0.52c	14.88 ± 0.75a	126.37 ± 2.61a
X	0	6.69 ± 0.03c	23.49 ± 1.07a	13.58 ± 0.39a	9.25 ± 0.24a	22.83 ± 0.63a	15.00 ± 0.71b	130.69 ± 1.08b
	2.5	7.06 ± 0.05b	23.65 ± 0.54a	14.49 ± 0.07a	3.27 ± 0.18d	17.76 ± 0.25c	13.97 ± 0.75b	145.58 ± 3.93a
	10	7.16 ± 0.02a	24.10 ± 0.68a	12.21 ± 0.70b	7.14 ± 0.51b	19.35 ± 1.21b	15.06 ± 0.72b	142.19 ± 7.57a
	40	7.21 ± 0.04a	24.26 ± 0.72a	11.94 ± 0.37b	4.81 ± 0.26c	16.75 ± 0.63c	16.91 ± 0.64a	143.61 ± 7.57a

1) 不同小写字母代表同种地膜颗粒在不同用量间有显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 3 种全生物降解地膜原料颗粒对土壤酶活性的影响

添加全生物降解地膜原料颗粒后,土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性变化如表 3 所示. 土壤蔗糖酶活性在 H 和 X 地膜颗粒低中用量时与 CK 差异不显著,高用量显著降低, S 地膜颗粒在

低用量时显著提高,中高用量与 CK 差异不显著但较低用量显著降低. 3 种地膜颗粒均使土壤脲酶活性降低,且地膜颗粒用量愈大降低幅度增大,其中 H 和 S 低用量与 CK 差异不显著但中高用量显著降低, X 所有用量均显著降低. 土壤过氧化氢酶活性随 3 种地膜颗粒用量提高而降低,

其中 H 低中用量显著升高,高用量与 CK 差异不显著,X 用量均显著提高,但中高用量间的差异显著,S 低用量显著升高,中高用量与 CK 差异不显著。

表 3 全生物降解地膜原料颗粒对土壤酶活性的影响¹⁾

Table 3 Effects of biodegradable film raw material particles on the activities of soil enzymes				
地膜种类	ω (地膜) / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤蔗糖酶活性 / $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$	土壤脲酶活性 / $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$	土壤过氧化氢酶活性 / $\text{mL}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$
H	0	$43.67 \pm 3.60\text{a}$	$0.244 \pm 0.025\text{a}$	$1.22 \pm 0.04\text{b}$
	2.5	$45.21 \pm 2.24\text{a}$	$0.243 \pm 0.006\text{ab}$	$1.48 \pm 0.03\text{a}$
	10	$38.02 \pm 4.62\text{a}$	$0.212 \pm 0.002\text{bc}$	$1.41 \pm 0.02\text{a}$
	40	$29.30 \pm 0.59\text{b}$	$0.197 \pm 0.007\text{c}$	$1.26 \pm 0.09\text{b}$
S	0	$43.67 \pm 3.60\text{b}$	$0.244 \pm 0.025\text{a}$	$1.22 \pm 0.04\text{b}$
	2.5	$52.12 \pm 2.95\text{a}$	$0.209 \pm 0.011\text{a}$	$1.44 \pm 0.05\text{a}$
	10	$42.97 \pm 0.59\text{b}$	$0.188 \pm 0.025\text{ab}$	$1.18 \pm 0.09\text{b}$
	40	$38.61 \pm 2.07\text{b}$	$0.135 \pm 0.034\text{b}$	$1.14 \pm 0.04\text{b}$
X	0	$43.67 \pm 3.60\text{a}$	$0.244 \pm 0.025\text{a}$	$1.22 \pm 0.04\text{c}$
	2.5	$44.18 \pm 5.30\text{a}$	$0.207 \pm 0.003\text{b}$	$1.52 \pm 0.05\text{a}$
	10	$38.72 \pm 3.37\text{a}$	$0.166 \pm 0.004\text{c}$	$1.35 \pm 0.05\text{b}$
	40	$25.56 \pm 0.89\text{b}$	$0.159 \pm 0.006\text{c}$	$1.34 \pm 0.04\text{b}$

1) 不同小写字母代表同种地膜颗粒在不同用量间有显著差异($P<0.05$)

2.3 3 种全生物降解地膜原料颗粒对小麦生长性状的影响

3 种地膜颗粒对小麦株高影响不显著,对小麦生物量影响随地膜颗粒种类、用量和作物的部位不同而异(图 1)。随着地膜颗粒用量的提高,H 处理小麦根、茎叶和籽粒的生物量呈下降趋势,但不同用量间的差异不显著;S 地膜颗粒在低中用量时使小麦根和茎叶的生物量提高,高用量时下降,但与 CK 的差异不显著;X 处理小麦根、茎叶和籽粒生物量

均降低,降低幅度随颗粒用量提高而升高,且以籽粒降低幅度最大。3 种地膜颗粒间株高的差异不显著,根、茎叶和籽粒生物量表现为: $S>H>X$ 。除低中用量的 S 处理外,其余处理均抑制小麦的生长。

2.4 3 种全生物降解地膜原料颗粒对小麦养分吸收与转运的影响

3 种全生物降解地膜原料颗粒对小麦各部位氮磷钾含量的影响也因地膜颗粒、用量和元素的不同而异(图 2)。施用地膜颗粒小麦根系氮含量显著降

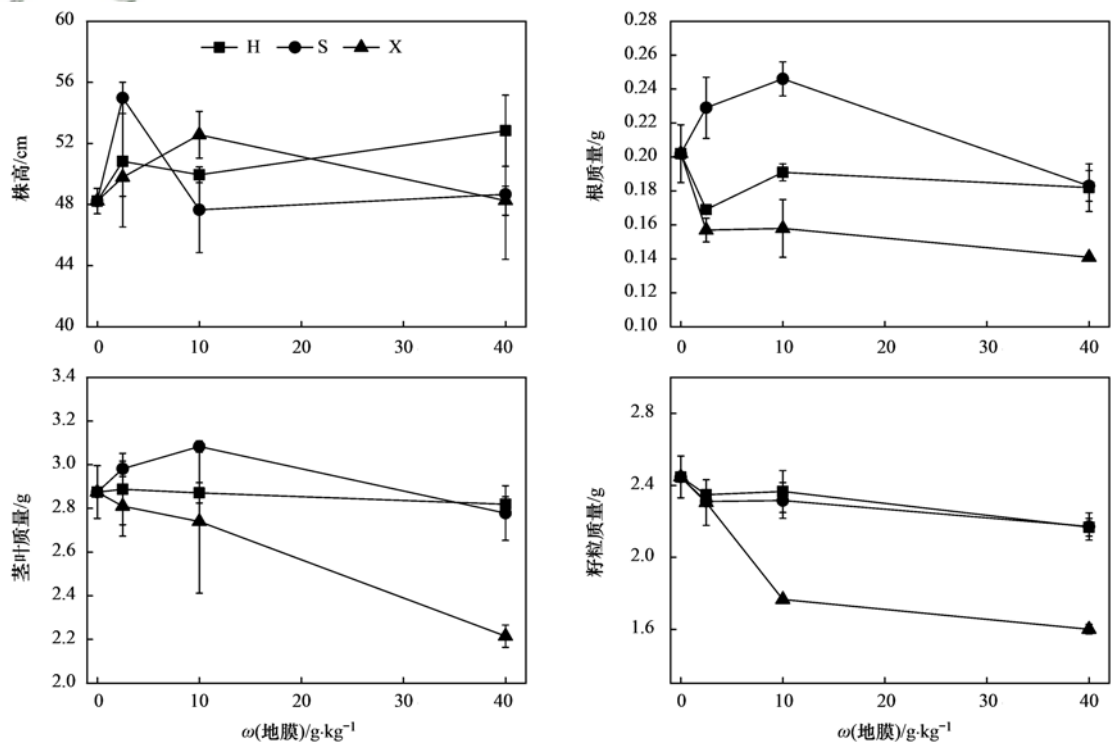


图 1 全生物降解地膜原料颗粒对小麦生长性状影响

Fig. 1 Effects of biodegradable film raw material particles on the growth of wheat

低,除 H 地膜颗粒不同用量间的差异不显著外,S 和 X 均随地膜用量提高降低幅度增大;小麦茎叶和籽粒氮含量先升高后降低,在低用量时显著高于 CK,中用量时茎叶氮含量高于 CK,高用量时与 CK 差异不显著,茎叶氮含量在不同处理间的差异不显著,但籽粒氮含量在低用量时不同处理间的差异不显著,中高用量时, H 和 X 处理显著低于 CK 和 S,且两个用量间的差异不显著.随着地膜颗粒用量增高,小麦根和茎叶的磷含量呈先降低后增高的趋势,3 种地

膜颗粒分别在中用量和低用量时根和茎叶磷含量最低,且与 CK 差异显著;籽粒磷含量 S 处理随用量的提高呈下降再升高的变化趋势,H 处理呈先增高再降低的变化趋势,而 X 地膜颗粒则呈上升趋势. 3 种地膜颗粒中,磷含量的顺序,根为:H>S>X,茎叶为:S>X>H,籽粒为:X>H>S.施用3 种地膜颗粒使小麦根的钾含量显著降低,对茎叶钾含量影响不显著,籽粒钾含量在低用量时提高,中高用量变化不明显.

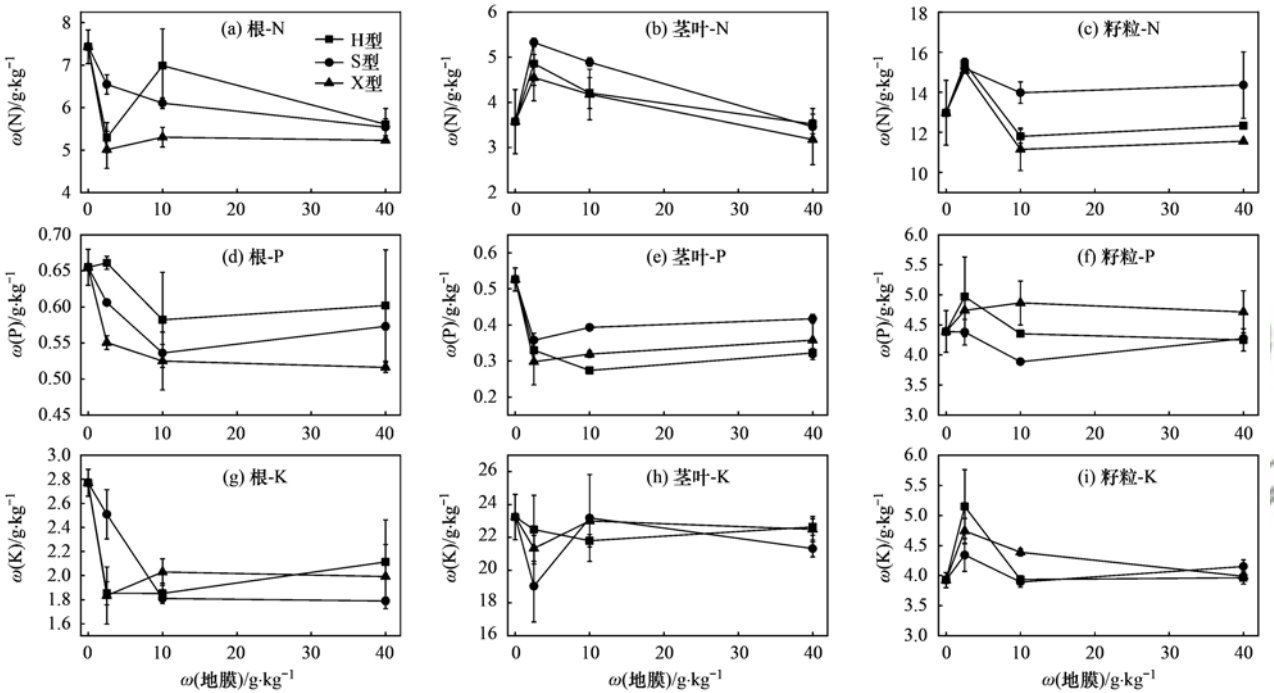


图2 全生物降解地膜原料颗粒对小麦氮、磷和钾含量影响

Fig. 2 Effects of biodegradable film raw material particles on wheat N, P, and K content

植物养分的累积量为各部位生物量与其相应养分含量的乘积和,反映植物养分的吸收量.如表4所示,施用3种地膜颗粒,小麦植株氮的累积量均随地膜颗粒用量提高呈先升高后降低趋势,与CK相比,

H 低用量和 S 低中用量时显著升高,H 中用量、S 高用量和 X 低用量时差异性不显著,H 高用量和 X 中高用量时显著降低.小麦的磷累积量除 H 低用量略有提高外其余处理均降低,其中S所有用量差异性

表4 全生物降解地膜颗粒对小麦养分积累量影响¹⁾

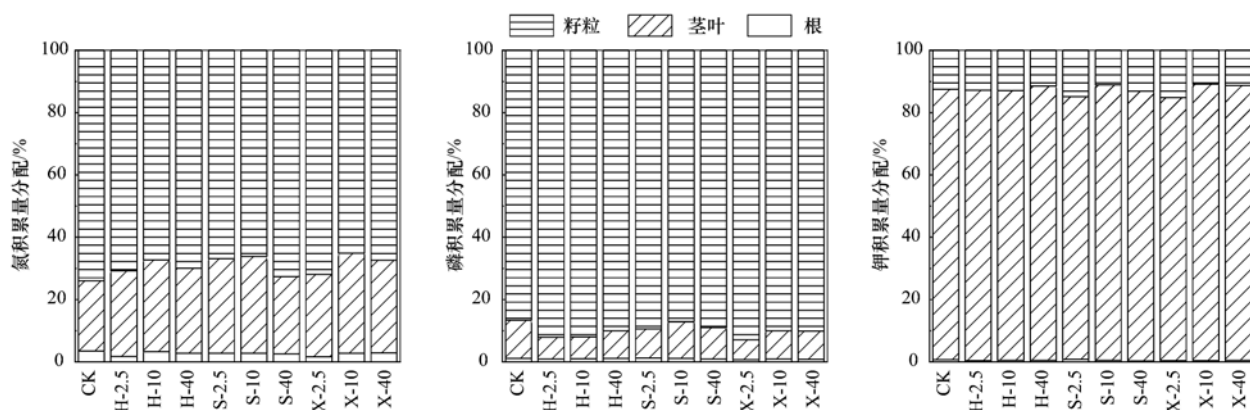
Table 4 Effects of biodegradable film raw material particles on nutrient accumulation of wheat

地膜种类	$\omega(\text{地膜})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	积累量/ mg		
		TN	TP	TK
H	0	42.77 $\pm$ 2.68b	12.37 $\pm$ 0.68ab	76.98 $\pm$ 4.43a
	2.5	51.22 $\pm$ 0.41a	12.92 $\pm$ 0.20a	82.99 $\pm$ 3.10a
	10	41.02 $\pm$ 1.95bc	11.20 $\pm$ 0.63b	72.22 $\pm$ 0.26a
	40	36.34 $\pm$ 1.09c	10.22 $\pm$ 0.12c	72.58 $\pm$ 2.20a
S	0	42.77 $\pm$ 2.68b	12.37 $\pm$ 0.68a	76.98 $\pm$ 4.43ab
	2.5	52.47 $\pm$ 0.62a	11.33 $\pm$ 0.47a	67.31 $\pm$ 5.40b
	10	53.16 $\pm$ 1.16a	11.23 $\pm$ 0.37a	87.98 $\pm$ 2.02a
	40	38.71 $\pm$ 0.95b	11.50 $\pm$ 0.62a	68.55 $\pm$ 4.15b
X	0	42.77 $\pm$ 2.68a	12.37 $\pm$ 0.68a	76.98 $\pm$ 4.43a
	2.5	48.35 $\pm$ 3.10a	11.77 $\pm$ 0.62a	71.12 $\pm$ 6.03ab
	10	30.26 $\pm$ 0.25b	9.54 $\pm$ 0.51b	71.12 $\pm$ 7.83ab
	40	27.43 $\pm$ 0.30b	8.65 $\pm$ 0.25b	56.44 $\pm$ 0.57b

1) 不同小写字母代表同种地膜颗粒在不同用量间有显著差异 ($P < 0.05$)

不显著,H 高用量和 X 中高用量时显著降低,且用量愈高,降低幅度愈大.小麦钾的累积量除 H 低用量和 S 中用量时增高外,其余处理均降低,其中 X 高用量时达显著水平.总体看,3 种全生物降解地膜原料颗粒对小麦氮的吸收在低用量时促进,高用量时抑制,对小麦磷和钾的吸收有抑制作用.3 种地膜颗粒中,对氮吸收的促进作用以 S 最强,对氮磷钾吸收的抑制作用以 X 最强.

将小麦各部位氮磷钾的累积量除以植株总累积量,得到氮磷钾在各部位的分配比例.如图 3 所示,全生物降解地膜颗粒对氮磷钾在根中的分配影响不大,但能显著提高氮在茎叶的分配比例,降低氮在籽粒分配比例,3 种地膜颗粒均以中用量时影响最大.相反,3 种地膜颗粒使磷在茎叶分配比例降低,提高籽粒中的磷分配比例,均以低用量时影响最大.3 种地膜颗粒对钾在根茎叶积累量分配比例影响不明显.



横坐标中 CK 为对照处理,H-2.5 为 H 地膜颗粒 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量处理,H-10 为 H 地膜颗粒 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$

用量处理,H-40 为 H 地膜颗粒 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 用量处理,以此类推

图 3 全生物降解地膜颗粒对小麦各部分氮、磷和钾分配比例影响

Fig. 3 Proportion of N, P, and K distribution in different parts of wheat as affected by biodegradable film raw material particles

3 讨论

3.1 3 种全生物降解地膜原料颗粒对土壤理化性质的影响

目前,全生物降解地膜原材料颗粒对土壤理化性质影响的研究很少.Boots 等^[16]的研究表明,全生物降解材料碎片施入土壤后使土壤 pH 显著降低.Qi 等^[21]的研究表明,1% 全生物降解地膜碎片施入土壤后,早期时(2 个月)pH 显著升高,后期(4 个月)pH 显著降低,表明生物降解材料与土壤之间的响应时间有关.本研究中 3 种全生物降解地膜颗粒施入土壤 6 个月后土壤 pH 仍显著提高,与上述报道不同,这可能与土壤条件和地膜颗粒与土壤接触面积较地膜碎片减小未充分降解有关.全生物降解地膜是一种富含有机碳的材料^[22],添加到土壤后对土壤碳储存有积极的影响,可以提高土壤有机碳含量^[23].Zumstein 等^[24]的研究表明标记 PBAT 材料的 C 原子,也发现土壤微生物利用 PBAT 每个单体的碳来获取能量以此提高土壤碳的库存量,本研究中,即使 3 种全生物地膜颗粒的添加量达到 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有机质含量的提升也未达显著水平,其原因可能是所使用的地膜颗粒不含促进地膜降解的添加剂,导致地膜颗粒降解缓慢,其产物未释放到土壤中,而部分原料颗粒在土样制备过筛时未能过筛

而损失也导致土壤有机质提升不显著.

土壤铵态氮含量仅 S 和 X 中高用量时显著下降,土壤硝态氮在 H 地膜颗粒低用量时降低,中高用量升高,S 地膜颗粒低中用量升高而高用量降低,X 地膜颗粒所有用量均显著降低,说明全生物地膜颗粒对土壤硝化作用影响大于氨化作用.盆栽条件下排除雨水的淋溶作用,硝态氮含量降低意味着硝化作用可能受抑制.由此可知,3 种地膜颗粒中,X 处理对土壤的硝化作用有抑制作用,而 S 和 H 地膜颗粒适当用量有促进作用.有研究表明,全生物降解地膜材料是一种高碳物质,施入土壤后可能对土壤的 N 循环有负面影响^[25].本研究中,H 中高用量和 S 低中用量时土壤无机氮及硝态氮含量均提高,表明上述两种全生物降解地膜颗粒对土壤氮的有效性有积极作用,而 X 处理无机氮和硝态氮含量显著降低,说明 X 地膜颗粒使土壤无机氮含量降低与硝化作用受抑制有关,这可能与微生物对氮的固定作用有关^[26].H 地膜颗粒使土壤有效磷含量提高,S 和 X 影响不显著;X 地膜颗粒使土壤有效钾含量提高,而 S 和 H 的影响不显著,可能与地膜颗粒中的磷钾含量有关.

3.2 3 种全生物降解地膜原料颗粒对土壤酶活性的影响

土壤蔗糖酶是体现土壤碳循环的一项指标^[27],

土壤脲酶与土壤氮循环密切相关,尤其是含氮有机物的水解^[28],土壤过氧化氢酶与土壤孔隙结构密切相关^[29]. 本研究中,低用量时蔗糖酶活性略有提高(H和X)或显著提高(S),脲酶活性变化不明显,过氧化氢酶活性显著提高;进一步提高全生物降解地膜颗粒用量,3种酶活性降低,但中用量时蔗糖酶活性变化不显著,除H外脲酶活性显著下降,除S外过氧化氢酶仍显著提高,高用量时,S处理蔗糖酶活性变化不显著,H处理脲酶活性变化不显著,X处理过氧化氢酶活性仍显著提高,其余处理酶活性均降低,说明全生物降解地膜颗粒对土壤酶活性的影响因地膜种类、用量和酶的类型而异. 其作用强度,S对土壤蔗糖酶的活性抑制作用最弱,H对土壤脲酶活性的抑制作用最弱,S对土壤过氧化氢酶活性的促进作用最弱. 有研究表明,塑性材料碎片可能会改变土壤物理性质,如增加孔隙度和改变团聚体结构,从而影响土壤酶活性^[29~31]. 本研究中,土壤蔗糖酶和脲酶的活性与土壤无机氮含量呈显著正相关(表5),说明施用全生物降解地膜颗粒引起的无机氮含量变化可能与土壤蔗糖酶和脲酶活性有关,这与Chen等^[32]的研究结论一致. 此外,溶解性有机质(DOM)活性增加也可能对土壤蔗糖酶和脲酶活性产生了影响^[29]. 本研究中过氧化氢酶活性与土壤理化性质相关性不显著,但该酶被认为是一种指示好氧微生物的酶,与好氧微生物的丰度密切相关^[33],提高土壤孔隙率会有效增加好氧微生物丰度从而提升其活性^[28]. H、X处理和低用量的S处理使过氧化氢酶活性提高可能与其增加了土壤孔隙率有关.

表5 土壤酶活性与土壤性质间的皮尔逊相关性¹⁾

Table 5 Pearson correlation between soil enzyme activity and soil nutrients

土壤养分	蔗糖酶	脲酶	过氧化氢酶
pH	-0.331	-0.731 **	-0.249
无机氮	0.431 *	0.364 *	-0.146
有效磷	-0.449 *	0.013	-0.049
有效钾	-0.357	-0.222	0.293
有机质	-0.356	-0.439 *	0.120

1) *表示在0.05水平下显著相关,**表示在0.01水平下显著相关,
n=30

3.3 全生物降解地膜原料颗粒对小麦生长及养分吸收转运的影响

全生物降解地膜原料颗粒对小麦株高影响不显著,H和S地膜颗粒对小麦生物量影响不大,仅S地膜颗粒显著提高小麦根生物量,X地膜颗粒显著抑制小麦根、茎叶和籽粒生物量,且随着用量提高抑制程度升高,说明地膜颗粒成分与种类都是影响小

麦生长的因素,且地膜颗粒成分的主要因素. Qi等^[34]的研究用1%的全生物降解地膜碎片埋入土壤中发现,小麦株高与对照相似,但植株根、茎叶和籽粒生物量明显低于对照组,这与本研究中的X地膜颗粒的影响一致,可能是由于X地膜颗粒降解释放一些化学物质抑制了小麦植株的生长发育^[21],但相关研究有待进一步进行.

Boots等^[16]的研究指出植株生长性状及营养品质对生物降解塑料的响应取决于降解塑料添加的成分与用量. Iqbal等^[35]的研究认为可生物降解塑料作为一种新型污染物可能影响土壤理化性质,进而影响植株生长发育及养分吸收. 本研究中,小麦植株氮累积量低用量时提高,高用量时降低,表明全生物降解地膜颗粒对小麦氮的吸收存在低用量促进,高用量抑制的作用. 随地膜颗粒用量提高,3种地膜颗粒处理小麦磷的累积量降低,说明全生物降解地膜颗粒对磷的吸收存在显著抑制作用,而不同水平下小麦钾累积量的下降也意味着全生物降解地膜对钾吸收存在抑制作用. 从变化幅度看,中低量S颗粒对小麦氮吸收的促进作用最明显,X对氮磷钾吸收的抑制作用最明显. 至于氮磷钾养分在小麦体内的分配,全生物降解地膜颗粒对根中的养分分配比例影响不显著,但可降低籽粒中氮的分配比例,提高籽粒中的磷分配比例,影响幅度氮以中用量时最大,磷以低用量时最大,3种地膜颗粒处理对钾的分配影响不显著.

3.4 影响小麦养分积累量的主要因素分析

相关分析表明,小麦氮、磷和钾的累积量与土壤无机氮、有效磷和有效钾的相关系数分别为0.457、-0.346和-0.354,其中仅小麦氮与土壤无机氮的相关性达显著水平,表明土壤的无机氮与小麦氮累积量相关性最大. 氮累积量与小麦根、茎叶和籽粒生物量的相关系数分别为0.581、0.692和0.807,与其氮含量的相关系数分别为0.116、0.670和0.837;磷累积量与小麦根、茎叶和籽粒生物量的相关系数分别为0.336、0.463和0.804,与其磷含量的相关系数分别为0.521、0.207和0.123;钾累积量与小麦根、茎叶和籽粒生物量的相关系数分别为0.304、0.748和0.636,与其钾含量的相关系数分别为0.029、0.553和0.019,表明小麦生物量是影响小麦养分积累量的主要因素.

4 结论

(1)3种全生物降解地膜原料颗粒可显著提高土壤pH,对土壤有机质含量影响不显著,对土壤无机氮、有效磷和有效钾含量因地膜颗粒种类和用量

的不同而异. 提高地膜颗粒用量使过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶的活性降低. 高用量时, 脲酶和蔗糖酶的活性均显著降低.

(2) 3 种全生物降解地膜原料颗粒高用量时均使根、茎叶和籽粒的生物量降低, 其中 X 地膜颗粒表现得最为明显; 对小麦氮、磷和钾的积累量的影响表现为低用量时促进氮的吸收, 抑制磷和钾的吸收, 高用量时氮、磷和钾的吸收均被抑制, 且小麦养分吸收积累主要受其生物量的影响. 全生物降解地膜颗粒抑制氮向籽粒转运, 促进磷向籽粒转运, 对钾的转运影响不明显.

(3) 本研究表明了高用量全生物降解地膜原料颗粒对土壤有效养分及生物学性质有一定的不良影响, 但所获结果仅来自小麦收获后的样品, 缺乏全生物降解地膜颗粒降解动态与土壤氮、磷和钾养分有效性变化的耦合关系、土壤微生物数量和组成的变化动态研究, 所用的土壤也仅有 1 种, 以后应加强这些方面的研究, 研究全生物降解地膜原料颗粒对不同土壤的环境效应, 为全面评价全生物降解地膜的环境影响提供更多依据.

参考文献:

- [1] Li Q, Li H B, Zhang L, *et al.* Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2018, **221**: 50-60.
- [2] Tilman D, Balzer C, Hill J, *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(50): 20260-20264.
- [3] 刘敏. 可生物降解地膜的应用效果及其降解机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2011. 1-2.
- [4] Gu X B, Li Y N, Du Y D. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **171**: 42-50.
- [5] 胡宏亮. 生物降解地膜的产量效应和降解特性及大田示范研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 4-5.
- [6] Kasirajan S, Ngouajio M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, **32**(2): 501-529.
- [7] Wang Z H, Wu Q, Fan B H, *et al.* Effects of mulching biodegradable films under drip irrigation on soil hydrothermal conditions and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, **213**: 477-485.
- [8] Yin M H, Li Y N, Fang H, *et al.* Biodegradable mulching film with an optimum degradation rate improves soil environment and enhances maize growth [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, **216**: 127-137.
- [9] 赵爱琴, 李子忠, 龚元石. 生物降解地膜对玉米生长的影响及其田间降解状况 [J]. *中国农业大学学报*, 2005, **10**(2): 74-78.
Zhao A Q, Li Z Z, Gong Y S. Effects of biodegradable mulch film on corn growth and its degradation in field [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, **10**(2): 74-78.
- [10] Sintim H Y, Flury M. Is biodegradable plastic mulch the solution to agriculture's plastic problem? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(3): 1068-1069.
- [11] Moreno M M, González-Mora S, Villena J, *et al.* Deterioration pattern of six biodegradable, potentially low-environmental impact mulches in field conditions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **200**: 490-501.
- [12] Serrano-Ruiz H, Martín-Closas L, Pelacho A M. Biodegradable plastic mulches: impact on the agricultural biotic environment [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, **750**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141228.
- [13] Qi Y L, Beriot N, Gort G, *et al.* Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115097.
- [14] Fritz J, Sandhofer M, Stacher C, *et al.* Strategies for detecting ecotoxicological effects of biodegradable polymers in agricultural applications [J]. *Macromolecular Symposia*, 2003, **197**(1): 397-410.
- [15] de Souza Machado A A, Lau C W, Kloas W, *et al.* Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(10): 6044-6052.
- [16] Boots B, Russell C W, Green D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(19): 11496-11506.
- [17] Xie H J, Shi Y J, Zhang J, *et al.* Degradation of phthalate esters (PAEs) in soil and the effects of PAEs on soil microcosm activity [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, **85**(8): 1108-1116.
- [18] 张惠. 邻苯二甲酸二甲酯 (DMP) 对黄瓜生育期毒性效应研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. 19-37.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] Qi Y L, Ossowicki A, Yang X M, *et al.* Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **387**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121711.
- [22] Li C, Moore-Kucera J, Lee J, *et al.* Effects of biodegradable mulch on soil quality [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, **79**: 59-69.
- [23] Hayes D G, Anunciado M B, DeBruyn J M, *et al.* Biodegradable plastic mulch films for sustainable specialty crop production [A]. In: Gutiérrez T J (Ed.). *Polymers for Agri-Food Applications* [M]. Cham: Springer, 2019. 183-213.
- [24] Zumstein M T, Schintlmeister A, Nelson T F, *et al.* Biodegradation of synthetic polymers in soils: tracking carbon into CO₂ and microbial biomass [J]. *Science Advances*, 2018, **4**(7), doi: 10.1126/sciadv.aas9024.
- [25] Chen H P, Wang Y H, Sun X, *et al.* Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function [J]. *Chemosphere*, 2020, **243**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125271.
- [26] Rillig M C, Lehmann A, de Souza Machado A A, *et al.* Microplastic effects on plants [J]. *New Phytologist*, 2019, **223**(3): 1066-1070.
- [27] Veres Z, Kotrocó Z, Fekete I, *et al.* Soil extracellular enzyme activities are sensitive indicators of detrital inputs and carbon availability [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **92**: 18-23.
- [28] 巩闪闪, 刘晓静, 张志勇, 等. 不同施氮措施对冬小麦农田土壤酶活性和氮转化的影响 [J]. *生态环境学报*, 2020, **29**

- (11): 2215-2222.
- Gong S S, Liu X J, Zhang Z Y, *et al.* Effect of different nitrogen application measures on soil enzyme activities and nitrogen turnover in winter wheat cropland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(11): 2215-2222.
- [29] Huang Y, Zhao Y R, Wang J, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
- [30] Rillig M C, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms[J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-01594-7.
- [31] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **642**: 12-20.
- [32] Chen N, Li X Y, Shi H B, *et al.* Effect of biodegradable film mulching on crop yield, soil microbial and enzymatic activities, and optimal levels of irrigation and nitrogen fertilizer for the *Zea mays* crops in arid region[J]. Science of the Total Environment, 2021, **776**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145970.
- [33] Liu H F, Yang X M, Liu G B, *et al.* Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil[J]. Chemosphere, 2017, **185**: 907-917.
- [34] Qi Y L, Yang X M, Pelaez A M, *et al.* Macro- and micro-plastics in soil-plant system; effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. Science of the Total Environment, 2018, **645**: 1048-1056.
- [35] Iqbal S, Xu J C, Allen S D, *et al.* Unraveling consequences of soil micro- and nano-plastic pollution on soil-plant system: implications for nitrogen (N) cycling and soil microbial activity [J]. Chemosphere, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127578.



CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)