

农田土壤微塑料污染研究现状与问题思考

汤庆峰, 高峡*, 李琴梅, 高丽娟, 张裕祥, 邵鹏, 陈啟荣

(北京市理化分析测试中心, 有机材料检测技术与质量评价北京市重点实验室, 北京市食品安全分析测试工程技术研究中心, 北京 100089)

摘要 微塑料作为一类新型环境污染物, 对海洋及陆地水域生态环境的污染问题受到全球的关注, 然而农田土壤中微塑料的污染尚未引起广泛的关注。当前农田土壤微塑料污染形势不容乐观, 对土壤生态安全和农产品安全构成威胁; 因微塑料可在生物体内积累, 并在食物链间传递、积聚, 对人体健康存在潜在风险。对当前农田土壤微塑料污染现状、来源、迁移降解及对土壤生态系统的影响进行了总结和分析, 指出当前农田土壤微塑料污染研究中出现的问题和不足。在此基础上, 对农田土壤微塑料的污染研究进行了展望, 并指出在农田微塑料污染研究中统一分析标准、系统分析农田微塑料的生态效应及健康风险; 加强源头控制与风险管控措施相结合, 为未来我国农田土壤微塑料污染研究和污染防治技术的创新提供参考与思路。

关键词 农田土壤; 微塑料污染; 生态效应; 健康风险; 防治措施

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)15-0072-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.15.020



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Status and Existing problems of Microplastic Pollution in Farmland Soil

TANG Qing-feng, GAO Xia, LI Qin-mei et al (Beijing Center for Physical and Chemical Analysis, Beijing Key Laboratory of Detection Technology and Quality Evaluation of Organic Material, Beijing Engineering Research Center of Food Safety Analysis, Beijing 100089)

Abstract Microplastics, as a new type of environmental pollutants, its pollution problems to the ecological environment of marine and land waters have attracted global attention. However, the pollution of microplastics in farmland soil has not attracted extensive attention. At present, the pollution situation of microplastics in farmland soil is not optimistic, which poses a threat to the safety of soil ecology and agricultural products. This paper summarized and analyzed the current situation, source, migration and degradation of microplastic pollution in farmland soil and its impact on soil ecology, and pointed out the problems and deficiencies in the research process of farmland soil microplastic pollution. On this basis, the research on the pollution of farmland soil microplastics was prospected, and it was pointed out that unified analysis standards and systematic analysis of ecological effects and health risks of farmland microplastics in the study of farmland microplastics pollution were pointed out; the combination of source control and risk control measures should be strengthened to provide reference and ideas for the future research and innovation of pollution prevention and control technology.

Key words Farmland soil; Microplastic pollution; Ecological effect; Health risks; Prevention strategies

土壤为作物生长提供养料和所需的营养物质, 是农业生产的基础和核心。因此, 土壤是保障农业可持续发展重要的自然资源, 成为生态和环境保护的重要对象。然而全球土壤资源状况不容乐观, “土壤污染”已成为全球土壤功能退化所面临的主要威胁之一。在诸多土壤污染物中, 塑料的“白色污染”问题日益严重, 已对全球各国环境和经济造成了严重威胁^[1]。大块塑料经紫外线照射、碰撞磨损或工业生产等方式, 形成粒径小于 5 mm 的颗粒被称为微塑料^[2], 也有学者提出粒径小于 1 mm 才称为微塑料^[3]。相比大块塑料, 微塑料作为一种新型环境污染物更值得关注, 其所引起的生态环境污染问题已成为近年来的研究热点^[4]。目前, 国内外开展了大量微塑料的研究, 但多数研究集中于海洋^[5-9]、海岸带潮滩^[10-14]、河口^[15-17]、湖泊^[18-24]等水域生态系统, 其来源、丰度、环境行为及生态效应受到普遍关注。陆地环境是微塑料污染的重要源头和主要汇集地, 被认为是海洋塑料的主要来源和运输路径, 但关于陆域环境微塑料的研究, 尤其是陆地土壤中微塑料的研究比较缺乏^[25]。与水域环境相比, 陆域中微塑料污染更应该引起足够重视^[26], 其污染水平可能更加严重。研究者指出, 陆地中存在的微塑料丰度可能是海洋

的 4~23 倍, 资料表明每年排放到欧洲和北美农田的微塑料分别达到了 11 万和 73 万 t^[27], 这一数字甚至超过了海洋表面水体的年均微塑料增加量。

土壤中塑料逐年积累, 污染土壤生态环境, 导致土壤质量下降, 对粮食的生产安全和质量安全构成挑战; 又因微塑料能够在食物链中传递和积蓄, 所以对食品安全和生命健康也存在潜在的威胁。因此, 农田土壤微塑料污染问题目前已成为科学界亟须解决的重大环境问题。笔者总结了当前农田土壤微塑料的污染现状、来源、迁移降解及生态效应, 分析了目前农田土壤微塑料污染研究中存在的问题和不足。鉴于农田土壤微塑料污染研究现状, 提出在其对生态效应系统研究的基础上, 加强农田土壤微塑料污染的源头控制与降解修复治理措施, 在污染防治中需以“防”为主, “防”与“治”结合, 逐步构建农田土壤微塑料污染的防控与治理体系, 为我国未来农田土壤微塑料污染防治研究和土壤健康发展提供借鉴。

1 农田土壤微塑料污染现状与成因分析

1.1 农田土壤微塑料污染现状

土壤中的微塑料主要由人类活动产生, 来源丰富, 既有农业用膜、垃圾填埋等带来的面源污染, 又有通过污水排放、废水灌溉及污泥土地利用等带来的点源污染; 同时土壤也是大气和水体污染的终端载体, 排放到环境中的微塑料, 经过大气沉降与地表径流等方式又会重新进入到土壤中。据研究, 微塑料几乎遍布世界各地,

基金项目 北京市科学技术研究院高水平创新团队计划项目(HIT201902)。
作者简介 汤庆峰(1976—), 男, 山东鄄城人, 高级工程师, 硕士, 从事环境污染分析与评价研究。*通信作者, 研究员, 博士, 从事材料物理与化学研究。

收稿日期 2020-11-10

在土壤中分布广泛(表 1)^[28-38]。

表 1 世界范围内部分地区土壤中微塑料分布特征

Table 1 Distribution characteristics of microplastics in soil in parts of the world

序号 No.	国家地区 Country and region	丰度 Abundance	组成 Composition	尺寸 Size	参考文献 Reference
1	墨西哥	2 770 个/kg	PE、PS	5~150 mm	[28]
2	瑞士	593 个/kg	PE、PS、PVC	12.5~500 μm	[29]
3	澳大利亚悉尼	(300~67 500) mg/kg	PVC、PE、PS	<5 mm	[30]
4	中国河北	634 个/kg	PE、PP、PVC	(1.56±0.63) mm	[31]
5	中国山东	(50~1 000) 个/kg	PE、PP、PS、PEU	1 mm(60%)	[32]
6	中国黄土高原	<0.54 mg/kg	PE	>100 μm	[33]
7	中国云南	(7 100~42 960) 个/kg	PE、PP	0.05~10 mm	[34]
8	中国上海	(78.00±12.91) 个/kg (62.50±12.97) 个/kg	PE、PP、PVC	0.02~5 mm	[35]
9	中国哈尔滨	89 个/kg	PE、PP	<5 mm	[36]
10	中国大辽河	(273.33±327.65) 个/kg	PE、PP、PS、PA	<5 mm	[37]
11	中国西北	(5 090±1 210) 个/kg	PE、PP、PVC	<5 mm	[38]

表 1 选择的国家和地区中,不同区域的土壤中微塑料呈现不同丰度、不同尺寸范围和不同组成的特点,如瑞士的洪泛平原 90% 的土壤样品中存在微塑料污染,但分布不均^[29];澳大利亚悉尼工业区土壤中微塑料含量高达 0.03%~6.7%^[30],而在一些塑料污染热点地区土壤中微塑料含量可能高达 60%^[39]。微塑料通过各种途径每年都在向土壤迁移积累,据研究在欧洲和北美农田中每年积累微塑料总量分别高达 6.3 万~43.0 万 t/a 和 4.4 万~30.0 万 t/a^[40];研究认为我国是塑料使用大国,同时也是塑料垃圾的排放大国,仅沿海地区估计每年排放塑料垃圾高达 132.0 万~353.0 万 t,排放量在全球居首位^[41]。我国滇池周边农田和河岸森林土壤中微塑料丰度达 7 100~42 960 个/kg,95% 的微塑料粒径在 0.05~1.00 mm^[34];大辽河流域土壤^[37]中微塑料丰度为 (273.33±327.65) 个/kg,也是 0.05~1.00 mm 粒径的微塑料最多(41.10%)。西北地区作为我国地膜用量和覆盖面积最大的地区,农田土壤中微塑料含量很高,而且地块之间差异大,0~30 cm 土层微塑料丰度 $5.8 \times 10^2 \sim 1.189 \times 10^4$ 个/kg;地膜残片(直径>5 mm)被认为是农田土壤微塑料的最主要来源^[42]。随着地膜覆盖年限增加,土壤中小颗粒微塑料丰度所占比例增加,土壤潜在污染加重^[37]。受耕作的影响,微塑料在土壤中的分布不均,如上海城郊浅表层(0~3 cm)和深表层(3~6 cm)土壤中,发现粒径为 0.02~5.00 mm 的微塑料丰度达 78.0 和 62.5 个/kg^[35];哈尔滨市周边典型黑土覆膜耕地表层土壤中丰度均值达 89 个/kg,部分下层土壤含量达 400 个/kg^[36]。

表 1 呈现了世界范围内部分地区土壤中微塑料的污染特征,但由于缺少统一的土壤微塑料分析标准,采样方式和分析方法各异,致使微塑料丰度单位描述上不尽相同,计数上也有数量和质量的差别,不同机构间的结果难以比较。虽然结果存在差异,但不难得出这样的结论,即世界各地的农田土壤已在不同程度上被微塑料污染。

1.2 农田土壤微塑料污染成因分析

1.2.1 农用薄膜广泛使用。农田土壤中的微塑料主要是农

用地膜残留的产物。农用地膜因其优良的保温、保水、保肥及增产效应,目前已被广泛应用于农业生产中。作为农业大国,自 20 世纪 80 年代中期开始,我国地膜使用量和覆盖面积一直居世界第一位,且 1991—2004 年我国农用薄膜使用量以每年 30% 的速度增长^[43],而 2006—2015 年,农用薄膜的使用总量增幅达 41%,其中 2015 年地膜使用量为 145.5 万 t,约占世界地膜使用总量的 90%^[44]。农膜应用广泛,使用量大,但残留严重,调查表明我国农用地膜残留量占使用量的 25%~33%^[45];农膜回收技术落后,回收率不高,有些地方回收率甚至不到 60%^[46]。如在新疆地区棉田中平均地膜残留量为 265.5 kg/hm²,残留量最高 381.5 kg/hm²,而且覆膜年限越久,污染越严重^[47]。残留的地膜,通过物理、生物和人为机械等作用,大的农膜碎片逐渐破碎形成尺寸更小的微塑料或纳米塑料^[48-49]。这些残留的塑料碎片,成为农田土壤微塑料的一个重要来源。

1.2.2 污泥、有机肥土地农用。污泥和有机肥中富含植物养分(N、P、K 等)和有机碳,能够改善土壤结构,增加土壤肥力;但污泥和有机肥中都存在高浓度的微塑料。国际上对污水处理厂微塑料的调查,发现约 90% 的微塑料在污水处理后积累到污泥中^[50],其中微塑料含量为 1 500~24 000 个/kg^[51-52];Li 等^[53]在调查我国 11 个省 28 个污水处理厂 79 个污泥样品中发现,污泥中微塑料含量为 1 600~56 400 个/kg,均值在 (22 700±12 100) 个/kg。据统计,在芬兰和爱尔兰,高达 72% 的污泥用于农业生产^[54],而欧盟每年有 $4 \times 10^6 \sim 5 \times 10^6$ t 干重的污泥用于耕地堆肥,约有 40×10^4 t 的微塑料进入土壤中^[27,52];澳大利亚每年污泥施用所产生的微塑料总量达 $2.8 \times 10^3 \sim 1.9 \times 10^4$ t^[55]。而我国每年污泥产量在 $3 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$ t,农业利用率虽然不到 10%^[56],但污泥利用量逐年增加^[57]。Nizzetto 等^[27]从污泥施用量的角度考虑,仅欧洲和北美的污泥中微塑料的负荷量分别达 ($6.3 \times 10^4 \sim 43 \times 10^4$) 和 ($4.4 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$) t/年,该数据已经远远高于全球海洋中每年 9.3 万~23.6 万 t 微塑料的输入量。相比污泥中的微塑料,对有机肥中微塑料丰度的调查数据很少。

Bläsing 等^[58] 比较了德国波恩某有机肥加工厂的 3 个有机肥样品,发现肉眼可见的塑料碎片(粒径 $>0.5\text{mm}$)含量在 $2.38\sim 180.00\text{ mg/kg}$;Weithmann 等^[59] 观测到粒径大于 1 mm 的微塑料有 $14\sim 895\text{ 个/kg}$;而在斯洛文尼亚的调查中发现有机肥中塑料含量高达 $1\ 200\text{ mg/kg}$ ^[60]。上述 3 例报道都是针对有机肥中粒径 0.5 mm 以上的塑料碎片,对关注度更高的更小粒径的微塑料污染尚不得而知。可以预料,有机肥中粒径 $<0.5\text{ mm}$ 的微塑料特别是微纳米级微塑料的丰度会更高。欧盟 2008 年约生产了 $1.8\times 10^7\text{ t}$ 有机肥,预计到 2020 年将增加约 37% ^[61];而我国更是有机肥生产和使用大国,仅商品有机肥的年生产量在 $2.5\times 10^7\text{ t}$ 以上,实际施用量在 $2.2\times 10^7\text{ t}$ 左右^[62]。如果按照目前有机肥中调查的微塑料含量来估算,我国农田土壤中每年投入微塑料量在 $52.4\sim 2.64\times 10^7\text{ t}$,若考虑到粒径 $<0.5\text{ mm}$ 的微塑料含量以及有机肥产量和施用量的逐年增幅,其数量会更高。因而,污泥、有机肥的土地农用是农田土壤中微塑料积累的又一个重要来源途径。

1.2.3 农田灌溉与大气沉降。农田灌溉是农业生产中普遍存在的一种方式,灌溉用水主要是地表水或地下水及净化后的污水,甚至有些地区直接使用或部分使用未经处理的污水灌溉农田的情况也时有发生。水域中微塑料几乎无处不在,据调查,我国太湖中微塑料丰度达 $(1\times 10^4\sim 6.8\times 10^6)\text{ 个/km}^2$ ^[63],长江口水表面漂浮的微塑料丰度达 $(4\ 137.3\pm 2\ 461.5)\text{ 个/m}^3$ ^[17]。

Mintenig 等^[52] 发现地下水塑料微粒($>20\ \mu\text{m}$)浓度达 $0\sim 7\text{ 个/m}^3$,饮用水中平均值为 0.7 个/m^3 。而污水中微塑料含量更多,即使经处理的污水中仍含有大量的微塑料^[53,64]。Lares 等^[65] 研究表明,污水经活性污泥法和生物膜反应器法处理后,水样中仍含有 1.0 和 0.4 个/L 的微塑料。通过灌溉进入到农田土壤中的微塑料,有些留在土壤表层,有些会随着灌水沿土壤孔隙向下运移。因此,农田灌溉也是土壤中微塑料来源的重要途径。

另外,农田土壤也接纳大气沉降带来的微塑料。Dris 等^[66] 对巴黎城市大气微塑料的调查发现,环境中每天沉降的微塑料为 $29\sim 280\text{ 个/m}^2$;而周倩等^[67] 发现我国城市大气环境中微塑料沉降通量高达 $1.46\times 10^5\text{ 个/(m}^2\cdot\text{a)}$ 。Kim 等^[68-69] 发现道路上轮胎磨损产生的橡胶微粒也可通过大气沉降或地表径流的形式进入路边土壤环境中,并统计瑞典和德国轮胎粉尘年排放量分别约为 1×10^4 和 $11\times 10^4\text{ t}$ 。由此可见,大气沉降也是农田土壤微塑料污染来源的一条途径,而且不容忽视。

2 微塑料在土壤中的迁移、降解及对农田土壤生态系统的影响

Rillig^[26] 指出微塑料进入土壤,不断地迁移和积累,并且也会逐渐的老化、降解;当微塑料在土壤中积累到一定程度则会影响土壤性质、土壤功能及生物多样性。土壤微塑料的来源、迁移及对农田土壤生态效应的影响见图 1。

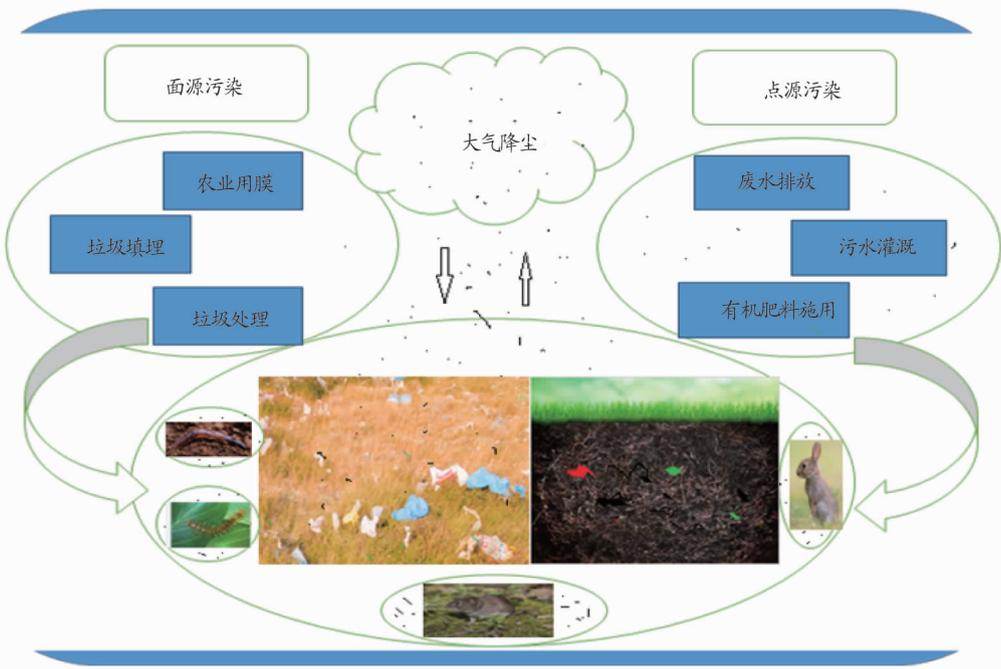


图 1 土壤中微塑料的来源、迁移及对农田土壤生态效应的影响

Fig. 1 Schematic diagram of the sources and distribution characteristic, migration and influencing factors of microplastics in soil ecosystem

2.1 微塑料在土壤中的迁移、降解 微塑料在土壤中的迁移行为受多种因素的制约,如受土地使用和覆盖的影响,其在 $10\sim 30\text{ cm}$ 深土层中的数量和重量一般要比 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层的高^[70];而我国黄土高原的某果园和温室中 $0\sim 10$ 和 $10\sim 30\text{ cm}$ 土层中微塑料丰度结果则相反^[33],造成这一现象的主

要原因是由土壤耕作方式和降雨产生的地表径流和入渗决定的。Rezaei 等^[71] 在调查伊朗地区不同用地的风蚀沉积物中时发现,不仅农田中有大量的 LDPE (20.27 mg/kg),甚至在自然区中也存在 LDPE (6.91 mg/kg),表明风蚀作用对微塑料在陆地环境中的迁移起了重要作用。此外,重力作用和

生物活动可以使表层微塑料向下迁移,甚至到地下排水系统中,密度大者更易向下迁移。近年来有学者^[53]开展了蚯蚓(*L. terrestris*)对土壤中微塑料迁移行为的研究,发现蚯蚓可将60%以上的PE小球从表层向下迁移至10 cm以下的土层,其中小粒径(710~850 μm)微塑料要比大粒径更容易迁移;Lwanga等^[28]研究也发现蚯蚓对微塑料的迁移具有粒径选择性,粒径越小越易于迁移。其他中型土壤动物也可以通过表面附着、抓、推等形式加速微塑料在土壤中的迁移,其取食的微塑料颗粒也能通过表面附着、排泄和死亡躯体等形式扩散到其他区域。

微塑料在风、热、光、氧及生物等因素的作用下,其物理、化学及力学性能也在变化,出现老化、降解现象,如聚合物分子链断裂、歧化、表面含氧官能团(如酯基团、酮基团等)增加等。塑料老化的实质是大分子发生了降解和交联反应,而降解的结果是大分子链的无规断裂,变成相对分子质量较低的物质^[72]。塑料老化后,韧度、强度功能会大大减弱,变得易碎。农田土壤中的微塑料大多被土粒或作物覆盖,其光、热降解能力大大减弱,其降解途径以生物降解为主,但降解速度非常缓慢^[73-74],PP在土壤中培养1年后其重量损失仅为0.4%^[75],而PE土壤培养800 d后重量损失为0.1%~0.4%^[76]。研究表明,薄膜碎片变成粒径更小的微塑料或纳米级塑料,可在土壤中存留数年甚至数十年^[77]。这是因为大多数烯烃类高聚物不易被微生物分解,且耐酸碱腐蚀;但聚烯烃类塑料经紫外光辐射或热解氧化后,可发生有利于其中间产物发生生化降解的变化,如光解或热解后的产物分子量可降至10 000以下,抗张强度明显降低,导致塑膜变脆、易碎,经红外光谱鉴定发现其分子结构中出现了母体分子结构中没的、易受微生物攻击的羰基功能团^[78]。

2.2 微塑料对农田土壤生态系统的影响 微塑料在土壤盐度、pH、有机质等复杂因素的影响与调控下,与土壤中重金属、有机污染物等无机、有机物质相互作用,引起土壤的物理化学性质的改变,进而影响土壤生态系统的健康^[18,79]。

2.2.1 对土壤理化性质的影响。微塑料易和土壤团聚体结合,一项云南的野外调查发现,70%以上的微塑料颗粒和土壤团聚体相结合,特别是和微团聚体结合^[34];De Souza Machado等^[80]研究发现,微塑料可以影响土壤容重、水力特征以及团聚体的变化,而且聚合物类型不同,对土壤理化性质存在较大差异,如聚酯显著降低土壤水稳性团聚体,而聚乙烯则显著提高土壤水稳性团聚体的量。微塑料还可以增加土壤孔隙度、改变团粒结构或成为土壤团聚体的一部分^[26],从而促进土壤养分的有效性和土壤微生物的生物活性^[81-82]。Liu等^[83]研究微塑料PP(<180 μm)对土壤可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)、可溶性有机磷(DOP)及 PO_4^{3-} 浓度和FDA水解酶和酚氧化酶活性的影响,经30 d培养后,发现低浓度的微塑料对可溶性有机物(DOM)中的有机碳、无机氮、总磷、高分子量的腐殖质类物质及富里酸的影响很小,而高浓度微塑料显著增加了DOM中的DOC、DON、DOP、 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 、高分子量的腐殖质类物质及富里酸的

浓度。

微塑料具有较强的吸附能力,Hodson等^[84]研究发现高密度聚乙烯对 Zn^{2+} 的吸附能力强,吸附行为符合Langmuir和Freundlich方程;而Huffer等^[85]在研究4种微塑料(PE、PA、PS和PVC)对7种脂肪族和芳香族有机物的吸附作用时,还发现了微塑料的吸附能力与污染物的疏水性紧密相关,并揭示了疏水作用是影响微塑料吸附性的主要因素。微塑料的老化风化对环境中有机污染物的吸附也有很重要的影响,Bandow等^[86]研究发现高密度聚乙烯、聚氯乙烯和聚苯乙烯等微塑料颗粒老化后不仅明显增加了其对TOC、Cl、Ca、Cu、Zn的吸附,而且也减弱了重金属的解吸和释放作用,说明老化的微塑料对重金属具备更强的固定能力和亲和力;相似的结果在Zhang等^[87]的研究中也得到了体现,老化的发泡微塑料对抗生素的吸附能力比新鲜塑料更强。此外,土壤中的官能团吸附到微塑料表面,可能对其吸附重金属有一定影响,Kim等^[88]对官能团包被的聚苯乙烯吸附Ni的研究,表明官能团改变微塑料和重金属表面的疏水性。

2.2.2 对土壤生物的影响。

2.2.2.1 土壤动物。微塑料在多个方面影响土壤动物,研究发现蚯蚓可以摄入微塑料,但高含量PE(>28%)暴露后,其生长受到明显抑制,致死率也显著增加^[89];而对白符跳受PVC(80~250 μm)颗粒暴露后的研究,发现其体内肠道菌群发生改变,生长和繁殖也受到明显抑制^[81]。这是因为微塑料被取食后,容易在动物体内结块,影响进食和排泄,并造成肠道的损伤,严重影响其成长和存活^[90-91]。毒理学研究进一步发现,PE对蚯蚓组织病理学损伤和免疫系统的影响明显,可以增加蚯蚓蛋白质、脂类和多糖含量;聚氨酯泡沫与多溴联苯醚(PBDEs)的联合作用研究,发现PBDEs可以在蚯蚓体内积累,并通过食物链影响其他土壤动物^[92]。值得关注的是,近期对线虫的研究表明,低浓度纳米塑料急性饮食暴露(0.5%纳米塑料/麦片)可显著增加其繁殖率,但随着暴露浓度的增加,繁殖率随之下降且其生物量显著降低^[93]。微塑料对线虫的主要不良反应是肠道损伤和氧化损伤,引起肠道钙水平的降低,进而影响其神经毒性、繁殖率、成长和存活率,且微塑料粒径的影响大于微塑料种类的影响^[91,93]。最近,一项微塑料对土壤动物肠道微生物的研究结果引起了大家的关注,微塑料的土壤暴露破坏了跳虫肠道微生物的群落结构,但显著增加了其肠道微生物的多样性^[94]。一项对墨西哥东南部传统玛雅家庭花园的调查显示微塑料浓度在土壤[(0.87±1.90)个/g]、蚓粪[(14.8±28.8)个/g]和鸡粪[(129.8±82.3)个/g]中逐级增加,说明微塑料能够通过土壤微型/中型动物取食在其土壤碎屑食物链中传递累积。随着研究的深入和研究范围的扩大,微塑料对土壤动物的影响也表现出了多样性,如微塑料通过改变土壤动物的栖息环境间接影响土壤动物的活动,微塑料可能堵塞土壤的孔隙,从而影响土壤中大型动物的活动^[26];凋落物中混杂微塑料会影响大型土壤动物(蚯蚓等)的取食,如凋落物受微塑料的污染后会严重影响蚯蚓的适口性^[81]。

2.2.2.2 植物。Qi等^[95]以低密度聚乙烯(LDPE)和一种淀粉基生物降解塑料薄膜为研究对象,发现在小麦生长过程中,LDPE和可生物降解塑料地膜碎片对小麦种子及幼苗的生长具有明显的抑制作用,微塑料(1~50 μm)对小麦生长的负面影响大于大塑料(最大长度6.98 mm,最大宽度6.10 mm)。微塑料可以被植物吸附并积累,李连祯等^[96]发现聚苯乙烯微球(0.2 μm)可被生菜根部大量吸收和富集,并从根部迁移到地上部,积累和分布在可被直接食用的茎叶之中。微塑料颗粒大小不同,对高等植物生长发育的影响也不同:当微塑料尺寸小于6 μm时,很容易附着在植物的花絮上,影响植物的生长^[97],纳米级塑料微珠可通过细胞内吞作用进入烟草细胞^[98]。粒径5 μm的聚苯乙烯微球较100 nm的聚苯乙烯微球(PS)对陆生高等植物小麦的生长表现出更大的毒性效应,水培试验中,高浓度(200 mg/L)PS显著抑制小麦根、茎的伸长^[99];而粒径5 μm的聚苯乙烯微球还可导致蚕豆幼根SOD和POD等抗氧化酶含量显著增高^[100]。

2.2.2.3 土壤微生物。土壤微生物是土壤生态系统的核心,其活性对土壤生态至关重要。目前,微塑料对土壤微生物影响的研究主要集中在微塑料对土壤微生物群落的影响和微生物对微塑料的降解两方面^[101-105],表明微塑料不仅可为微生物提供吸附位点,使其长期吸附在微塑料表面,形成生物膜;而且伴随微塑料的迁移,微生物会扩散到其他生态系统,进而影响或改变其他生态系统的菌群和功能。Zhu等^[106]将土壤假丝酵母暴露于PVC下56 d,显著增加了细菌生物多样性。Oberbeckmann等^[107]发现在聚乙烯和聚苯乙烯颗粒上的寄生真菌和腐生真菌均有大量繁殖。Sun等^[104]研究设施栽培土壤中表面活性剂和微塑料污染对土壤细菌和噬菌体相关的抗生素抗性基因的影响,发现这种影响还没有明确的规律性。塑料的化学成分(邻苯二甲酸盐、双酚A、重金属等)在其老化降解过程中释放,对土壤微生物活性有抑制作用,从而影响微生物的繁殖发育^[108]。Kong等^[109]研究表明,随着土壤中二丁基邻苯二甲酸酯含量的提高,土壤生物多样性下降;Wang等^[110]发现土壤中的二甲基邻苯二甲酸酯增加了土壤中一些功能基因的表达,并认为这些基因表达的增加可能导致土壤中碳氮循环的加快,可能不利于黑土肥力的维持。

3 微塑料污染研究存在问题与展望

3.1 存在问题与不足 农田土壤微塑料污染是一个全球性的问题,也是目前关注的热点问题,研究主要集中于微塑料在土壤中的分布、迁移及其生态毒理的影响,但这些研究大多还处在初步的探索阶段,内容比较分散,缺乏系统性的思考。如土壤微塑料来源广泛,残留量大,但很难从实际土壤中分离、鉴别出足够量的微塑料用于其生态环境效应的评价。尽管目前已有不少关于农田土壤中微塑料污染的报告,但由于尚缺乏统一的土壤微塑料采样与分析检测的标准方法,研究结果相互之间难以比较,导致无法确定微塑料在土壤中实际的暴露水平。对农田土壤微塑料本底值研究不充分,也就难以准确评估微塑料对农田土壤健康以及生产力的

潜在危害。部分研究结果表明微塑料的积累对土壤生物具有毒害作用,但目前所研究的土壤生物种类有限,相应结果并不适用于所有类别的生物。对于土壤动物而言,其体系庞杂、功能多样,个体大小差异大,且栖居方式不同,在土壤中分布极不均匀,全面评价微塑料对土壤动物类群的影响难度很大。相同的问题在植物类群中也是如此,如农田作物,不同作物由于根系分泌物、细胞壁空隙度、蒸腾速率和根系水力传导率等影响因素的差异,其吸收富集微塑料颗粒的能力和应对微塑料毒性反应机制也可能存在差异。以往科学试验中所设置的微塑料浓度大多超过环境中实际发生的情况,虽然这样的条件有助于研究微塑料在生物体内的富集,但与生物真正生长的环境有一定的区别,同时微塑料种类、粒径大小以及土壤的理化性质等因素均对土壤生物有一定的影响,况且土壤环境中含有大量的黏土矿物、腐殖质和微生物等天然物质均可以与环境污染物结合,那么土壤中丰度相对较低的微塑料本身和其吸附的有毒有害物质是否会对土壤动物产生毒害,亟需通过理论研究和系统的科学试验去揭示。微塑料具有较强的黏附性和可变形性,容易被农田作物黏附并可被植物吸收、蓄积、生物放大和转化,从而产生潜在的生态和健康风险;但目前尚缺乏农作物中微塑料含量、膳食暴露对人体毒性的基础数据,其健康风险评估方法亟需建立。近年来,国内外针对环境微塑料污染防治研究开展了一些调查和评价工作,但大多限于海洋生态系统,而农田土壤微塑料污染的总体分布和污染程度等问题仍存在较大的信息缺口,存在农田微塑料污染底数不清,土壤修复技术有待进一步开发等问题。亟需通过加大对污染土壤进行系统的调查评估,结合相应管控治理技术的实施与治理效果评价,逐步建立一套完善的土壤微塑料监测、污染土壤修复的程序和方法。

3.2 展望 针对当前农田土壤微塑料污染研究的不足,未来需要特别关注以下问题,并需要进一步深入系统的研究。建立相对统一的、规范的微塑料采样和分析标准,该标准包括明确的、普遍认可的微塑料尺寸分类界定标准,微塑料理化分析、鉴定和计量标准。在统一标准下,加大对土壤微塑料污染进行系统的调查和评估研究,开展技术交流与合作,提高工作效率;未来需加强土壤理化性质、土壤生物(动物、植物、微生物)的微塑料剂量-效应关系的基础研究,长期在典型地区、典型农田中开展田间试验,以更接近微塑料环境浓度和环境条件的暴露试验,探明微塑料对土壤生产功能、环境净化功能的真实影响,提高微塑料颗粒、添加剂和黏附污染物毒性等相关基础数据的积累,更加客观地评价微塑料积累对农田土壤生态系统的真实影响;开展微塑料在农田环境中迁移、降解机制及塑料中其他化学品的释放规律研究,探明这些化学物质在农田土壤生态系统的行为、毒理效应以及在食物链中的传递、转化规律与积累机制等;增加膳食暴露及对人体毒性的基础数据研究,评估微塑料对农田土壤生态系统、食物链和人体健康影响的联合效应;农田土壤微塑料的污染控制与治理的首要任务,是从源头上减少微塑

料的制造和使用,针对塑料产品源头控制,制定相应的法律法规,逐步淘汰并禁止生产和使用含不可生物降解的微塑料产品,生产可降解的塑料制品或者是使用别的物质代替;在研究微塑料降解的基础上,未来更需要发展生物修复技术,以缓解农田土壤生态系统塑料污染的问题。

我国是农业大国,农田土壤微塑料污染关系到我国农产品的质量 and 数量安全。因此,在加强农田土壤微塑料污染和治理研究的基础上,还需提高农田土壤微塑料污染防治复杂性和艰巨性的认识,认识到在农田土壤微塑料污染防控与治理的道路上,任务艰巨而道远。

参考文献

- [1] EERKES-MEDRANO D, THOMPSON R C, ALDRIDGE D C. Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs[J]. *Water research*, 2015, 75: 63–82.
- [2] LAW K L, THOMPSON R C. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144–145.
- [3] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [4] MIZRAJI R, AHRENDT C, PEREZ-VELEGAS D, et al. Is the feeding type related with the content of microplastics in intertidal fish gut [J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 116(1/2): 498–500.
- [5] AUTA H S, EMENIKE C U, FAUZIAH S H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions[J]. *Environment international*, 2017, 102: 165–176.
- [6] PAÇO A, DUARTE K, DA COSTA J P, et al. Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*[J]. *Science of the total environment*, 2017, 586: 10–15.
- [7] SALVADOR CESA F, TURRA A, BARUQUE-RAMOS J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: A review from textile perspective with a focus on domestic washings[J]. *Science of the total environment*, 2017, 598: 1116–1129.
- [8] WANG J D, TAN Z, PENG J J, et al. The behaviors of microplastics in the marine environment[J]. *Marine environmental research*, 2016, 113: 7–17.
- [9] ZHANG W W, ZHANG S F, WANG J Y, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. *Environmental pollution*, 2017, 231: 541–548.
- [10] ABAYOMI O A, RANGE P, AL-GHOUTI M A, et al. Microplastics in coastal environments of the Arabian Gulf[J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 124(1): 181–188.
- [11] HINATA H, MORI K, OHNO K, et al. An estimation of the average residence times and onshore-offshore diffusivities of beached microplastics based on the population decay of tagged meso and macrolitter[J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 122(1/2): 17–26.
- [12] MASSOS A, TURNER A. Cadmium, lead and bromine in beached microplastics[J]. *Environmental pollution*, 2017, 227: 139–145.
- [13] NEL H A, HEAN J W, NOUNDOU X S, et al. Do microplastic loads reflect the population demographics along the southern African coastline? [J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 115(1/2): 115–119.
- [14] YU X B, PENG J P, WANG J D, et al. Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: The Bohai Sea[J]. *Environmental pollution*, 2016, 214: 722–730.
- [15] PENG G Y, ZHU B S, YANG D Q, et al. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. *Environmental pollution*, 2017, 225: 283–290.
- [16] VENDEL A L, BESSA F, ALVES V E N, et al. Widespread microplastic ingestion by fish assemblages in tropical estuaries subjected to anthropogenic pressures[J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 117(1/2): 448–455.
- [17] ZHAO S Y, ZHU L X, WANG T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution[J]. *Marine pollution bulletin*, 2014, 86(1/2): 562–568.
- [18] HORTON A A, SVENDSEN C, WILLIAMS R J, et al. Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK abundance, sources and methods for effective quantification[J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 114(1): 218–226.
- [19] HORTON A A, WALTON A, SPURGEON D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. *Science of the total environment*, 2017, 586: 127–141.
- [20] LESLIE H A, BRANDSMA S H, VAN VELZEN M J M, et al. Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota[J]. *Environment international*, 2017, 101: 133–142.
- [21] NEL H A, DALU T, WASSERMAN R J. Sinks and sources: Assessing microplastic abundance in river sediment and deposit feeders in an Austral temperate urban river system[J]. *Science of the total environment*, 2018, 612: 950–956.
- [22] SRUTHY S, RAMASAMY E V. Microplastic pollution in Vembanad Lake, Kerala, India: The first report of microplastics in lake and estuarine sediments in India[J]. *Environmental pollution*, 2017, 222: 315–322.
- [23] WANG J D, PENG J P, TAN Z, et al. Microplastics in the surface sediments from the Beijiang River littoral zone: Composition, abundance, surface textures and interaction with heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2017, 171: 248–258.
- [24] ZHANG K, SU J, XIONG X, et al. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China[J]. *Environmental pollution*, 2016, 219: 450–455.
- [25] ZHANG K, SU J, XIONG X, et al. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China[J]. *Environmental pollution*, 2016, 219: 450–455.
- [26] RILLIG M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. *Environmental science & technology*, 2012, 46(12): 6453–6454.
- [27] NIZZETTO L, FUTTER M, LANGAAS S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(20): 10777–10779.
- [28] LWANGA E H, VEGA J M, QUEJ V K, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain[J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 140–145.
- [29] SCHEURER M, BIGALKE M. Microplastics in Swiss floodplain soils[J]. *Environmental science & technology*, 2018, 52(6): 3591–3598.
- [30] FULLER S, GAUTAM A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(11): 5774–5780.
- [31] ZHOU Q, ZHANG H B, ZHOU Y, et al. Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features[J]. *Chinese science bulletin*, 2016, 61(14): 1604–1611.
- [32] ZHOU Q, ZHANG H B, FU C C, ET AL. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 201–208.
- [33] ZHANG S, YANG X, GERTSEN H, et al. A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil[J]. *Science of the total environment*, 2018, 616/617: 1056–1065.
- [34] 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.
- [35] LIU M, LU S, SONG Y, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. *Environmental pollution*, 2018, 242: 855–862.
- [36] ZHANG S L, WANG J Q, LIU X, et al. Microplastics in the environment: A review of analytical methods, distribution, and biological effects [J]. *Trends in analytical chemistry*, 2019, 111: 62–72.
- [37] 韩丽花, 李巧玲, 徐笠, 等. 大辽河流域土壤中微塑料的丰度与分布研究[J]. *生态毒理学学报*, 2020, 15(1): 174–185.
- [38] 程万莉, 樊廷录, 王淑英, 等. 我国西北覆膜农田土壤微塑料数量及分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(11): 2561–2568.
- [39] LWANGA E H, GERTSEN H, GOOREN H, et al. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*[J]. *Environmental pollution*, 2017, 220: 523–531.
- [40] BARNES D K A, GALGANI F, THOMPSON R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 2009, 364(1526): 1985–1998.
- [41] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223): 768–771.
- [42] 侯军华, 檀文炳, 余红, 等. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研

- 究进展[J]. 环境工程, 2020, 38(2): 16-27, 15.
- [43] 张经纬, 徐爱国, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ. 中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026-1033.
- [44] ESPÍ E, SALMERÓN A, FONTECHA A, et al. Plastic films for agricultural applications [J]. Journal of plastic film & sheeting, 2006, 22(2): 85-102.
- [45] 肖军, 赵景波. 农田塑料地膜污染及防治[J]. 四川环境, 2005, 24(1): 102-105.
- [46] 赵岩, 陈学庚, 温浩军, 等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 1-14.
- [47] 韩永俊, 陈海涛. 国内外纸地膜的发展现状 & 思考[J]. 农机化研究, 2008, 30(12): 244-246.
- [48] WANG J, LUO Y, TENG Y, et al. Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film[J]. Environmental pollution, 2013, 180: 265-273.
- [49] RAMOS L, BERENSTEIN G, HUGHES E A, et al. Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina[J]. Science of the total environment, 2015, 523: 74-81.
- [50] MASON S A, GARNEAU D, SUTTON R, et al. Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent[J]. Environmental pollution, 2016, 218: 1045-1054.
- [51] ZUBRIS K A V, RICHARDS B K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge [J]. Environmental pollution, 2005, 138(2): 201-211.
- [52] MINTENIG S M, INT-VEEN I, LÖDER M G J, et al. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging [J]. Water research, 2017, 108: 365-372.
- [53] LI X, CHEN L, MEI Q, et al. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China [J]. Water research, 2018, 142: 75-85.
- [54] HALL J E. Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union[J]. Water and environment journal, 1995, 9(4): 335-343.
- [55] NG E L, LWANGA E H, ELDRIDGE S M, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems[J]. Science of the total environment, 2018, 627: 1377-1388.
- [56] YANG G, ZHANG G, WANG H. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China [J]. Water research, 2015, 78: 60-73.
- [57] 余杰, 田宁宇, 陈同斌, 等. 污泥农用在我国污泥处置中的应用前景分析[J]. 给水排水, 2010, 36(S1): 113-115.
- [58] BLÄSING M, AMELUNG W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources[J]. Science of the total environment, 2018, 612: 422-435.
- [59] WEITHMANN N, MÖLLER J N, LÖDER M, et al. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment[J]. Science advances, 2018, 4(4): eaap8060.
- [60] GAJST T. Analysis of plastic residues in commercial compost [D]. Nova Gorica; University of Nova Gorica, 2016.
- [61] FRANCKX L, VAN ACOLEYEN M, HOGG D. Assessment of the options to improve the management of biowaste in the European Union [M]. Deurne, Belgium and Bristol, UK: Arcadis and Eunomia, 2010.
- [62] 杨帆, 李荣, 崔勇, 等. 我国有机肥料资源利用现状与发展建议[J]. 中国土壤与肥料, 2010(4): 77-82.
- [63] SU L, XUE Y, LI L, et al. Microplastics in taihu lake, China[J]. Environmental pollution, 2016, 216: 711-719.
- [64] MURPHY F, EWINS C, CARBONNIER F, et al. Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment [J]. Environmental science and technology, 2016, 50(11): 5800-5808.
- [65] LARES M, NCIBI M C, SILLANPÄÄM, et al. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology[J]. Water research, 2018, 133: 236-246.
- [66] DRIS R, GASPERI J, SAAD M, et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? [J]. Marine pollution bulletin, 2016, 104(1/2): 290-293.
- [67] 周倩, 田崇国, 骆永明. 滨海城市大气环境中发现多种微塑料及其沉降通量差异[J]. 科学通报, 2017, 62(33): 3902-3909.
- [68] KIM L H, KAYHANIAN M, STENSTROM M K. Event mean concentration and loading of litter from highways during storms[J]. Science of the total environment, 2004, 330(1/2/3): 101-113.
- [69] KIM L H, KANG J, KAYHANIAN M, et al. Characteristics of litter waste in highway storm runoff[J]. Water science and technology, 2006, 53(2): 225-234.
- [70] CERDAN O, GOVERS G, LE BISSONNAIS Y, et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data [J]. Geomorphology, 2010, 122(1/2): 167-177.
- [71] REZAEI M, RIKSEN M J P M, SIRJANI E, et al. Wind erosion as a driver for transport of light density microplastics[J]. The science of the total environment, 2019, 669: 273-281.
- [72] 韩冬冰, 王慧敏. 高分子材料概论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003: 51-53.
- [73] COOPER D A, CORCORAN P L. Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii[J]. Marine pollution bulletin, 2010, 60(5): 650-654.
- [74] KRUEGER M C, HARMS H, SCHLOSSER D. Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2015, 99(21): 8857-8874.
- [75] ARKATKAR A, ARUTCHELVI J, BHADURI S, et al. Degradation of untreated and thermally pretreated polypropylene by soil consortia[J]. International biodegradation & biodegradation, 2009, 63(1): 106-111.
- [76] ALBERTSSON A C. The shape of the biodegradation curve for low and high density polyethenes in prolonged series of experiments[J]. European polymer journal, 1980, 16(7): 623-630.
- [77] BRIASSOULIS D, BABOU E, HISKAKIS M, et al. Analysis of long-term degradation behaviour of polyethylene mulching films with pro-oxidants under real cultivation and soil burial conditions[J]. Environmental science and pollution research, 2015, 22(4): 2584-2598.
- [78] KLAUSMEIER R E. Microbial biodegradation[M]. London; Inc. Ltd. Academic PRESS, 1981: 431-471.
- [79] TEUTEN E L, SAQUING J M, KNAPPE D R U, et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife[J]. Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences, 2009, 364(1526): 2027-2045.
- [80] DE SOUZA MACHADO A A, KLOAS W, ZARFL C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. Global change biology, 2018, 24(4): 1405-1416.
- [81] HUERTA LWANGA E, GERTSEN H, GOOREN H, et al. Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae) [J]. Environmental science & technology, 2016, 50(5): 2685-2691.
- [82] ARTHUR E, MOLDRUP P, HOLMSTRUP M, et al. Soil microbial and physical properties and their relations along a steep copper gradient[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2012, 159: 9-18.
- [83] 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.
- [84] HODSON M E, DUFFUS-HODSON C A, CLARK A, et al. Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates [J]. Environmental science & technology, 2017, 51(8): 4714-4721.
- [85] HÜFFER T, HOFMANN T. Sorption of non-polar organic compounds by micro-sized plastic particles in aqueous solution[J]. Environmental pollution, 2016, 214: 194-201.
- [86] BANDOW N, WILL V, WACHTENDORF V, et al. Contaminant release from aged microplastic [J]. Environmental chemistry, 2017, 14(6): 394-405.
- [87] ZHANG H B, WANG J Q, ZHOU B Y, et al. Enhanced adsorption of oxytetracycline to weathered microplastic polystyrene: Kinetics, isotherms and influencing factors[J]. Environmental pollution, 2018, 243: 1550-1557.
- [88] KIM D, CHAE Y, AN Y J. Mixture toxicity of nickel and microplastics with different functional groups on *Daphnia magna* [J]. Environmental science & technology, 2017, 51(21): 12852-12858.
- [89] NAVEED M, HERATH L, MOLDRUP P, et al. Spatial variability of microbial richness and diversity and relationships with soil organic carbon, texture and structure across an agricultural field[J]. Applied soil ecology, 2016, 103: 44-55.
- [90] CAO D D, WANG X, LUO X X, et al. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil[J]. IOP Conf. Series: Earth and environmental science, 2017, 61: 1-4.

城市化建设过程中,应注重考虑优化城市空间布局,在中心城区或者建筑物密度过大区域内种植树木,在城市中适宜密度规划布局公园绿地,在交通拥挤地带种植绿化隔离带,可以有效地降低中心城区的地表温度。

参考文献

- [1] HUNG T,UCHIHAMA D,OCHI S,et al. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation,2006,8(1):34-48.
- [2] YUAN F,SAWAYA K E,LOEFFELHOLZ B C,et al. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities(Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing[J]. Remote sensing of environment,2005,98(2/3):317-328.
- [3] 杨英宝,苏伟忠,江南,等.南京市热岛效应变化时空特征及其与土地利用变化的关系[J].地理研究,2007,26(5):877-886,1070.
- [4] 杨英宝,苏伟忠,江南.基于遥感的城市热岛效应研究[J].地理与地理信息科学,2006,22(5):36-40.
- [5] MANLEY G. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. Quarterly journal of the royal meteorological society,1958,84(359):70-72.
- [6] 张炜.长江流域土地利用/覆被变化对地表温度的影响[D].武汉:中国地质大学,2018.
- [7] 薛方蓉,卢正,但尚铭,等.基于热红外遥感的四川省内江市城市热岛效应评价[J].测绘与空间地理信息,2012,35(4):38-41.
- [8] 谢哲宇,黄庭,李亚静,等.南昌市土地利用与城市热环境时空关系研究[J].环境科学与技术,2019,42(S1):241-248.
- [9] 王明娜,韩哲,张庆云.21世纪初中国北方半干旱区土地利用变化对地表温度的影响[J].气候与环境研究,2016,21(1):65-77.
- [10] 高志强,宁吉才,高炜.基于遥感的沿海土地利用变化及地表温度响应[J].农业工程学报,2009,25(9):274-281,365.
- [11] 张春玲,余华,宫鹏,等.基于遥感的土地利用空间格局分布与地表温度的关系[J].遥感技术与应用,2008,23(4):378-384.
- [12] 张心怡,刘敏,孟飞.基于RS和GIS的地面温度和土地利用/覆被关系研究进展[J].遥感信息,2005,20(3):66-70,76.
- [13] HOWARD L. The climate of London, deduced from meteorological observations [M]. London:Harvey and Darton,1833:348.
- [14] 岳辉,刘英.基于Landsat 8 TIRS的地表温度反演算法对比分析[J].

科学技术与工程,2018,18(20):200-205.

- [15] 冯鹏,岳昊,刘晓源.基于Landsat 8数据的地表温度反演研究:以哈尔滨主城区为例[J].测绘与空间地理信息,2018,41(9):223-225.
- [16] 覃志豪,ZHANG M H,ARNON KARNIELI,等.用陆地卫星TM6数据演算地表温度的单窗算法[J].地理学报,2001,56(4):456-466.
- [17] 胡德勇,乔琨,王兴玲,等.利用单窗算法反演Landsat 8 TIRS数据地表温度[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,42(7):869-876.
- [18] 陈峰,何报寅,龙占勇,等.利用Landsat ETM+分析城市热岛与下垫面的空间分布关系[J].国土资源遥感,2008,20(2):56-61,67.
- [19] 刘航,申格,黄青.近10a武汉市城市热岛效应演变及其与土地利用变化的关系[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1466-1475.
- [20] 周梦宇.土地利用/覆盖变化与热岛效应关系的研究[D].南昌:东华理工大学,2017.
- [21] 王敏,孟浩,白杨,等.上海市土地利用空间格局与地表温度关系研究[J].生态环境学报,2013,22(2):343-350.
- [22] 张小伟,何月,蔡菊珍,等.基于GIS的浙江省土地利用/覆盖与地表温度的关系[J].中国农业气象,2010,31(2):295-299.
- [23] 彭征,廖和平,郭月婷,等.山地城市土地覆盖变化对地表温度的影响[J].地理研究,2009,28(3):673-684.
- [24] 彭文甫,周介铭,罗怀良,等.城市土地利用与地面热效应时空变化特征的关系:以成都市为例[J].自然资源学报,2011,26(10):1738-1749.
- [25] 梁保平,李晓宁.城市LUCC时空格局对地表温度的影响效应研究[J].中国土地科学,2016,30(11):41-49.
- [26] 周媛,石铁矛,胡远满,等.基于城市土地利用类型的地表温度与植被指数的关系[J].生态学报,2011,30(7):1504-1512.
- [27] 牟雪洁,赵昕奕.珠三角地区地表温度与土地利用类型关系[J].地理研究,2012,31(9):1589-1597.
- [28] RAO P K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite[J]. Bulletin of the American meteorological society,1972,53(7):647-648.
- [29] 朱玲燕,苏维词.典型喀斯特城区土地利用变化对地表温度的影响分析[J].环境保护科学,2016,42(2):60-64.
- [30] 刘超,张永福,徐华君.微域尺度下的地表温度与土地利用/覆被关系研究[J].江苏农业科学,2018,46(12):233-237.
- [31] 史洪超.土地利用/覆被变化(LUCC)研究进展综述[J].安徽农业科学,2012,40(26):13107-13110,13125.

(上接第78页)

- [91] RODRIGUEZ-SEIJO A,LOURENÇ O J,ROCHA-SANTOS T A P,et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché[J]. Environmental pollution,2017,220:495-503.
- [92] GAYLOR M O,HARVEY E,HALE R C. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) accumulation by earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to biosolids-, polyurethane foam microparticle, and Penta-BDE-amended soils[J]. Environmental science & technology,2013,47(23):13831-13839.
- [93] ZHU B K,FANG Y M,ZHU D,et al. Exposure to nanoplastics disturbs the gut microbiome in the soil oligochaete *Enchytraeus crypticus*[J]. Environmental pollution,2018,239:408-415.
- [94] ZHU D,CHEN Q L,AN X L,et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition[J]. Soil biology & biochemistry,2018,116:302-310.
- [95] QI Y,YANG X,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.
- [96] 李连祯,周倩,尹娜,等.食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J].科学通报,2019,64(9):928-934.
- [97] SANDERS L C,LORD E M. Directed movement of latex particles in the gynocia of three species of flowering plants [J]. Science,1989,243(4898):1606-1608.
- [98] BANDMANN V,MÜLLER J D,KÖHLER T,et al. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis[J]. FEBS Letters,2012,586(20):3626-3632.
- [99] 廖苑辰,娜孜依古丽·加甫别克,李梅,等.微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J].环境科学,2019,40(10):4661-4667.
- [100] JIANG X,CHEN H,LIAO Y,et al. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*[J]. Environmental pollution,2019,250:831-838.
- [101] BANDOPADHYAY S,MARTIN-CLOSAS L,PELACHO A M,et al. Bio-

degradable plastic mulch films: Impacts on soil microbial communities and ecosystem functions[J]. Frontiers in microbiology,2018,9:819-827.

- [102] YANG X M,BENTO C P M,CHEN H,et al. Influence of microplastic addition on glyphosate decay and soil microbial activities in Chinese loess soil[J]. Environmental pollution,2018,242:338-347.
- [103] ASADISHAD B,CHAHAL S,AKBARI A,et al. Amendment of agricultural soil with metal nanoparticles: Effects on soil enzyme activity and microbial community composition[J]. Environmental science & technology,2018,52(4):1908-1918.
- [104] SUN M M,YE M,JIAO W T,et al. Changes in tetracycline partitioning and bacteria / phage-mediated ARGs in microplastic-contaminated greenhouse soil facilitated by sphorolipid[J]. Journal of hazardous materials,2018,345:131-139.
- [105] JIN X X,AN T T,GALL A R,et al. Enhanced conversion of newly-added maize straw to soil microbial biomass C under plastic film mulching and organic manure management[J]. Geoderma,2018,313:154-162.
- [106] ZHU D,BI Q F,XIANG Q,et al. Trophic predator-prey relationships promote transport of microplastics compared with the single *Hypoaspis aculeifer* and *Folsomia candida*[J]. Environmental pollution,2018,235:150-154.
- [107] OBERBECKMANN S,KREIKEMEYER B,LABRENZ M. Environmental factors support the formation of specific bacterial assemblages on microplastics[J]. Frontiers in microbiology,2017,8:1-12.
- [108] ROCHMAN C M,MANZANO C,HENTSCHEL B T,et al. Polystyrene plastic: A source and sink for polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment[J]. Environmental science & technology,2013,47(24):13976-13984.
- [109] KONG X,JIN D,JIN S,et al. Responses of bacterial community to dibutyl phthalate (DBP) pollution in a soil-vegetable ecosystem[J]. Journal of hazardous materials,2018,353:142-150.
- [110] WANG J,LV S,ZHANG M,et al. Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils[J]. Chemosphere,2016,151:171-177.