

乡村地域系统环境污染演化过程及驱动机制研究

王永生, 施琳娜, 刘彦随

引用本文:

王永生, 施琳娜, 刘彦随. 乡村地域系统环境污染演化过程及驱动机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2495–2503.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0438>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

英国农业面源污染防控对我国的启示

刘坤, 任天志, 吴文良, 孟凡乔, JessicaBellarby, LaurenceSmith

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 817–823 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.001>

生物炭及其复合材料的制备与应用研究进展

吕宏虹, 宫艳艳, 唐景春, 黄耀, 高凯

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1429–1440 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.001>

土壤微塑料污染及生态效应研究进展

任欣伟, 唐景春, 于宸, 何娟

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1045–1058 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1409>

基于文献计量的Cr污染土壤修复发展历程剖析(2001—2015年)

朱宇恩, 张倩茹, 张维荣, 姜凯钦, 侯贺斌, 李铃, 李华

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 409–419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1083>

(微)塑料污染对土壤生态系统的影响:进展与思考

朱永官, 朱冬, 许通, 马军

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 1–6 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1427>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王永生, 施琳娜, 刘彦随. 乡村地域系统环境污染演化过程及驱动机制研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(11): 2495–2503.

WANG Yong-sheng, SHI Lin-na, LIU Yan-sui. Evolution process of environmental pollution and its driving mechanisms in rural areal systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2495–2503.



开放科学 OSID

乡村地域系统环境污染演化过程及驱动机制研究

王永生^{1,2}, 施琳娜^{1,2,3}, 刘彦随^{1,2,3*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:乡村地域系统转型发展过程中面临严峻的资源供给紧张、生产环境恶化、生态环境污染与功能退化等问题。乡村污染治理是实现国家乡村振兴战略与乡村系统可持续发展的重要保障。基于乡村污染物类型梳理与污染演变过程刻画,探讨了乡村地域系统环境污染的驱动机制。结果表明:从污染属性来看,乡村地域系统的污染物主要包括水体、土壤和大气污染物;在时间上,污染物从单项无机物逐渐演变为无机有机复合物,致使乡村地域系统环境污染从单一污染逐渐演变为复合污染和立体污染;在空间上,从城市近郊村、远郊村到一般农区的污染源与污染程度呈现递减趋势;乡村内部资源利用、生活和生产活动、污染治理体系,外部工业化、城镇化、全球变化、信息化等共同驱动乡村地域系统污染。未来应选择典型样带-样区-样点,研究不同乡村地域系统污染现状格局、驱动机制及其资源环境效应模拟评价,推动乡村污染治理与政策创新。

关键词:乡村地域系统;乡村振兴;资源利用;环境污染;乡村治理体系

中图分类号:X321 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)11-2495-09 doi:10.11654/jaes.2020-0438

Evolution process of environmental pollution and its driving mechanisms in rural areal systems

WANG Yong-sheng^{1,2}, SHI Lin-na^{1,2,3}, LIU Yan-sui^{1,2,3*}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Rural areal systems face serve resource and environmental problems, such as shortages, environmental deterioration, ecological environmental pollution, and function degradation during the transformation development process. Rural pollution control is a crucial component of national rural revitalization strategy implementation and rural system sustainable development. The driving mechanisms of rural areal system pollution are discussed herein based on the summary of rural pollutant types and depiction of pollution evolution processes. Our results showed that water, soil, and air pollutants are the main pollutant types in rural areal systems. Rural pollutants gradually transform from single inorganic matter into organic-inorganic compounds. The evolution process of rural areal system pollution experiences stages of single, combined, and stereoscopic pollution. In spatial terms, the gradual decline of pollution sources and levels comes from suburbs and outer suburbs to general rural areas. Rural areal system pollution is driven by internal resources utilization, living and production activities, pollution governance system and external urbanization, industrialization, as well as global change and informatization. In the future, typical rural belt-region-sites should be chosen to study the pollution status, driving mechanisms, and relevant simulated evaluation of resource and environment effects to promote rural pollution control and policy innovation.

Keywords: rural areal system; rural revitalization; resources utilization; environmental pollution; rural governance system

收稿日期:2020-04-18 录用日期:2020-06-28

作者简介:王永生(1985—),男,山东临朐人,博士,副研究员,主要研究方向为乡村地域系统资源利用与环境效应。E-mail:wangys@igsnrr.ac.cn

*通信作者:刘彦随 E-mail:liuys@igsnrr.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41931293,41731286)

Project supported: The State Key Program of National Natural Science of China(41931293,41731286)

乡村是农民居住与农业生产的集中地,具有保障国家粮食安全、提供生态屏障的功能^[1]。乡村孕育了城市,是工业化与城镇化的原料地,为城市提供清洁水源、清新空气等生态产品,保障城市健康发展与居民健康生活^[2]。乡村是城市与自然的过渡带,城乡人类活动与地表环境相互联系、交互作用耦合在营造空间景观和城市风貌的同时,也深刻改变着乡村区域的生态属性和自然风貌^[3]。城镇化进程中过于重视乡村非农产业发展,实现乡村经济发展和生活方式城市化,却忽略了乡村环境污染问题^[4],迫使乡村生态系统面临生态环境污染、生产环境恶化、生态功能退化等问题。中国乡村地区生活垃圾年产生量约为1.81亿t,约占全国生活垃圾产生总量的一半^[5]。禽畜养殖业、水产养殖业与种植业排放的氮、磷和化学需氧量(COD)等主要污染物量,已远超过工业与生活源^[6]。1978—2017年,乡村地区COD、总氮和总磷的排放量分别增加1.2倍和2.5倍^[7]。耕地土壤重金属含量不断增加,点位超标率比1980年增加14.91%,粮食主产区耕地土壤重金属点位超标率为21.49%,四川盆地、长江中游地区超标率分别为43.55%和30.64%^[8]。此外,水污染和大气污染形势研究表明,全国劣V类水质的河流、湖泊、水库、省界断面和浅层地下水比例分别为5.5%、16.1%、2.6%、9.6%和46.9%^[9],超过65%的区域PM_{2.5}年均浓度高于35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[10]。乡村污染物数量激增、种类增多,乡村生态系统不堪重负。如何破解由城乡二元体制下“乡村服务于城市”和“农业服务于工业”发展导向形成的“城进村衰”^[11]、乡村水土环境污染化的局面,促进乡村形成协调的人地关系,成为加快生态文明体制改革与建设美丽中国面临的难题。

城市和乡村是一个有机体,只有两者都可持续发展,才能相互支撑,全球城市化进程中亟需重视推进乡村振兴^[12]。2018年乡村振兴战略强调“生态宜居”,推进农村生产、生活方式的生态化、绿色化,加强农村人居环境和生态环境整治,实现城乡污染治理并重。随着城乡人口、土地、资金、技术等生产要素流动的不断增强,城乡关系及乡村社会经济结构发生了巨大变化,研究视角逐步从“农业”扩展到“乡村”,研究对象由“乡村地区问题”转向“乡村地域系统”。乡村地域系统是城乡融合与乡村振兴的对象,由人文、经济、资源与环境相互联系、相互作用构成,具有复杂性、综合性、动态性和开放性^[13]。乡村地域系统的环境子系统包括资源环境、生产环境和生活环境,资源环境为生

产生活提供自然资源,生产活动和生活方式影响自然环境。乡村地区日益加重的土地污损化、水体污染化和空气污浊化源于资源利用不当、生产活动加强和生活方式改变^[13]。水、土地、矿产等资源过度利用,农业种植、畜禽养殖和水产养殖等生产强度提高,废弃物、垃圾、污水等污染负荷不断增加。乡村环境污染使“绿水青山”不能转换为“金山银山”,对乡村地区提升人类福祉产生消极作用^[14]。乡村满足城镇化发展的巨大物质与能量需求,也产生一定数量的废弃物,农业作为国民经济持续健康发展的基础,只有健康的土壤、干净的水源,才能生产出安全的粮食、蔬菜和水果等食物,因此乡村地域系统的环境污染问题亟待解决。

自2004年以来,中央一号文件连续17年聚焦三农问题,乡村环境保护工作从提升耕地质量、发展节约型与循环型农业、农村环境综合治理,逐渐转向农村人居环境整治,对农村环境突出问题的重视程度不断加大。2020年中央一号文件从资源利用和生产角度提出治理农村生态环境突出问题,强调畜禽粪污、秸秆资源化利用,农药化肥减量及农膜污染治理;从生活角度提出扎实搞好人居环境整治,推进农村厕所革命及生活垃圾与生活污水治理。因此,本研究基于乡村污染物类型梳理与污染演变过程刻画,从乡村地域系统内部和外部角度,探讨乡村地域系统环境污染的驱动机制,为中国乡村人居环境整治提供理论支撑。

1 乡村地区污染物类型及其演变过程

1.1 污染物主要类型

乡村污染物是随着人类活动产生,使环境组分和性质发生改变,直接或间接有害于人类或其他生物的物质。根据污染属性,可将乡村污染物划分为水体污染物、土壤污染物、大气污染物等类型,各污染物类型、来源、类别及污染特征见表1。

1.2 污染物演变过程

从时间尺度来看,中国乡村发展大致经历解决温饱、小康建设到实现共同富裕三个阶段,乡村地域系统也从农业中国、乡村中国到城乡中国演进^[3]。乡村环境污染物从单项无机物演变为无机有机复合物,污染源从单一的生活、种植、养殖、加工等污染源转向多源污染,致使水体、土壤、大气、人居环境受到污染,乡村污染也从单一污染逐渐演变为复合污染和立体污染(图1)。原始农耕时代,食物源自土地,排泄物归还土地,环境问题主要来自区域性资源禀赋差异与落

表1 乡村污染物类型、来源及污染特征

Table 1 Types, sources of rural pollutant and their characteristics

属性 Property	来源 Source	类别 Category	特征 Characteristic
水体污染物 Water pollutant	工业废水、生活污水、农业退水、突发事件造成的石油污染等	(1)无机有害物:无机酸碱盐,硫化物、氮、磷等营养物质;(2)无机有毒物:氟化物、氰化物以及金属毒物质汞、铬、镉等;(3)有机有害物:氨基酸、蛋白质、碳水化合物、油类、脂肪等;(4)有机有毒物:苯类、酚类、有机磷农药、有机氯农药、多环芳烃等;(5)病原体污染物:病毒、病菌、寄生虫、细菌等;(6)放射性污染物	水体浑浊、温度升高、溶解氧降低、富营养化、酸碱失调、生物毒性增强等
土壤污染物 Soil pollutant	生活性污染、生产性污染、放射性污染	(1)无机污染物:铅、镉、锌、铜、铬、砷、镍、汞等;(2)有机污染物:多环芳烃及其含氧衍生物、滴滴涕、六六六、二噁英/味喃、多溴联苯醚、多氯联苯、硫丹、氯丹、多氯化苯等;(3)生物污染物;(4)放射性污染物	土壤质量、肥力、生产力、生物多样性、健康度降低
大气污染物 Air pollutant	自然污染源、人为污染源	(1)颗粒状污染物:粉尘、烟、飞灰、黑烟、雾、总悬浮颗粒物;(2)气态污染物:含硫化合物、碳氧化物、含氮化合物、碳氢化合物、卤素化合物	能见度降低、颗粒物增加、有害物增加

后的耕作方式叠加产生的水土流失、荒漠化等。经济发展初期,乡镇工业尚未起步,种植业和养殖业是主要的污染源,污染源和污染物类型单一、排放数量较低,未超过乡村生态系统的自净能力。工业化和城镇化初期,农业生产资料(化肥、农药、地膜等)、居民生活用品(塑料、日化、纺织等)、化石能源不断应用,污染物在降水或灌溉过程中随农田地表径流、排水和地下渗漏,进入水体形成面源污染。在工农业快速发展、科学进步与经济快速发展进程中,人民群众不断增加的生活需求驱动大量的生产要素投入,不合理的工农业生产、生活和经济发展活动,致使乡村人地系统中水、土壤、大气等界面都可能成为污染的源头,并且污染物会在不同界面之间转化和迁移,形成“水体-土壤-生物-大气”的污染循环链,导致各界面内有害物质数量超出生态系统承载力,立体污染问题日趋加重^[15]。多源污染物打破生态系统物质循环平衡,从大气组成到生态系统均发生显著变化^[16],立体污染综合防治不断成为环境保护工作的战略需求之一。

乡村地域系统是由人文、经济、资源与环境在相互联系、相互作用下构成的具有一定结构、功能和区际联系的乡村空间体系^[11]。乡村地域系统的环境污染受各因素的相互作用,建国以来不同阶段的农业政策调控干预了我国农业组织模式、经营主体和生产方式,进而影响了乡村环境污染物的排放种类和数量,导致乡村地域系统环境污染物排放阶段与中国农业政策调控存在趋同现象。因此,结合建国以来中国农业农村政策调控和农村发展的阶段,我国乡村地域系统环境污染可分为4个阶段,(1)自然环境破坏阶段(1949—1977年),过度强调工业发展和粮食生产,矿产资源滥挖滥采,毁林、毁牧、围湖造田,过度开荒等活动违背生态规律,对农村自然环境造成严重损害,耕地质量严重下降。(2)单一型的农业污染阶段(1978—

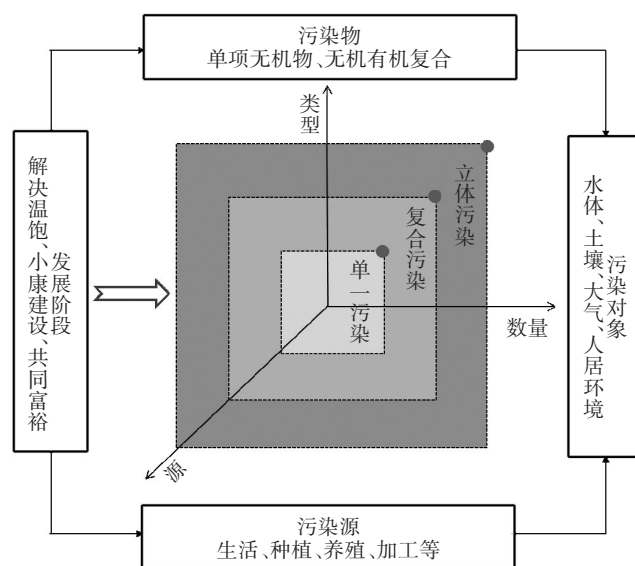


图1 乡村地域系统污染的时间演化过程

Figure 1 Temporal evolution process of rural areal system pollution

1985年),农业农村经营制度改革,生产责任制使农业生产加强,畜禽养殖及水产业不断发展,但生产方式较为粗放,农药化肥等不断使用。(3)农业污染与乡镇工业污染并存阶段(1986—2004年),统购统销制度改革、农业市场化改革、农民增收等农业政策促使农、林、牧、副、渔业快速发展,农业污染排放持续增加^[7];此外,鼓励发展多种经营、非农产业活动和乡镇企业,乡镇工业企业蓬勃发展,工业污染不断加重;乡村生活水平逐渐提升,生活污水和生活垃圾不断增多。(4)多种污染交叉与减排治理阶段(2005年至今),农业农村经济快速发展,农业生产资料投入增加、畜禽养殖外延扩大、工矿开采活动加剧,乡村资源环境问题成为农业农村发展的重要瓶颈,中央一号文件连续强调乡村环境治理,农业面源污染防治、乡村工业污染治理、乡村人居环境整治等政策促使乡村地

域系统环境污染减排与治理工作持续推进。2007—2017年间,粮食产量、肉蛋奶、水产养殖产量持续增加,农业源污染物排放量明显下降,COD、总氮、总磷排放分别下降了19%、48%、25%^[17]。

从空间分布来看,城市近郊村、远郊村和一般农区的污染程度由城市逐渐向外减弱。快速城镇化进程中,乡村地域系统的人口、土地、产业等要素不断演化,地域功能由单一型农业系统逐渐向多功能型乡村系统和融合型城乡系统演化^[3]。如图2所示,一般农区远离城市,是农业生产的集中区域,农业化学物质的大量投入引起水体和土壤污染,表现为面源污染;城市远郊区除具有一般农区的农业生产功能外,也是畜禽和水产养殖业以及乡镇工业的集中区,生产强度高于一一般农区,水土污染程度较重,面源污染和点源污染交织;城市近郊村是城乡融合发展的重点区域,土地资源相对稀缺,生产强度高,种植、养殖及工业污染程度重,该区也是大量务工人员集中居住区域,生活垃圾及废水排放量高,点源污染和面源污染程度高于远郊村和一般农区。此外,城市污染转移也是近郊村面临的重要难题。

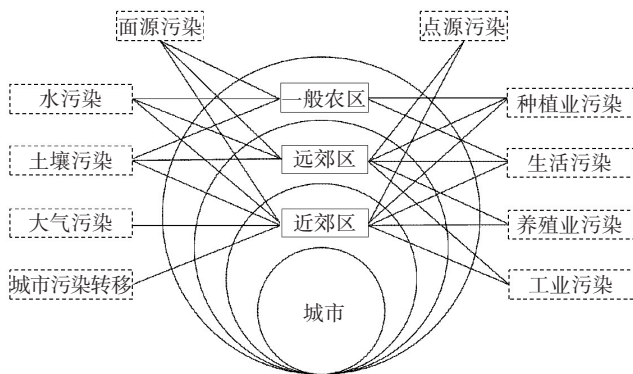


图2 乡村地域系统污染的空间演化过程

Figure 2 Spatial evolution process of rural areal system pollution

2 乡村地区环境污染驱动机制

乡村生态系统处于稳态时具有一定的自我调节与恢复能力,当外界干扰超过生态系统的自我调节能力时,乡村地域系统的结构与功能会发生紊乱,恢复能力与稳定性较低,乡村生态系统逐渐衰落,需要通过人工干扰与修复,使生态系统恢复到稳态。人类利用土地进行生产活动,满足自身生活需求,资源利用所产生的废弃物进入生态环境;当人类活动对资源环境的压力达到一定程度,资源环境则会制约人类社会经济发展,迫使做出相应调整,以适应资源环境的承

载能力。在乡村地域系统中,乡村环境污染受乡村内部资源利用、生活和生产活动、污染治理体系,外部工业化、城镇化、全球变化、信息化等共同驱动(图3)。从内部驱动来看,居民是乡村生产生活的主体,区域内水、土、气、生、能源、矿物等生态因子与居民生产、流通、消费和调控等活动耦合交织。土地是乡村区域最基本的资源和赖以生存的空间载体,人类不断改变土地利用方式,以环境退化为代价,获取自然资源,满足生活需求^[16]。人类利用土地进行生产活动,提供粮食、肉蛋奶等生活需求,却将生活污水、固体垃圾、工业废气等污染物归还到乡村生态环境。经济发展和居民消费模式转变^[18],使化肥、农药、农膜等生产资料输入量不断增加,并将氮磷、重金属、塑料等污染物输出到乡村生态环境。此外,城乡之间劳动力、土地、资本等要素快速流动,使乡村系统由封闭走向开放^[19]。乡村地域系统具有整体性、相关性、动态性的特点,其在全球化、信息化、工业化、城镇化等外部驱动力交互作用下,内部的要素、结构、功能均会发生联动变化,进而形成农业生产要素配置、经营模式、机械化及信息化程度等方面的差异,导致污染物种类、排放、迁移的多样化和复杂化,最终在内外力的协同驱动下,乡村环境污染类型日趋复杂。

2.1 内部驱动机制

2.1.1 人地关系严重失调

中国城乡间长期人力资本的不平衡溢出,大量劳动力由乡村流向城市,致使乡村人地分离,农村空心化问题凸显,乡村地域系统结构失调,环境治理主体乏力。一方面,1995年以来,中国农村人口减少2.95亿,年均减少1 229.17万,相当于天津市人口总数^[20];农村就业人数减少1.48亿,第一产业从业人员比例从1978年的92.4%下降至2018年的59.3%,而且农业户主文化程度为初中及以下水平的比例为87%^[21]。农村外出务工人员不断增加,2018年农民工数量为2.88亿,占乡村人口总数的51.06%。外出务工者多为青壮年,农民工平均年龄为40.2岁,50岁以下占比77.6%,1980年及以后出生的新生代农民工占全国农民工总量的51.5%^[22],青壮年劳动力的严重流失,导致环境友好型农业生产技术难以普及,乡村生产和环境保护的基础设施与公共服务成本增高。另一方面,土地城镇化速率远快于人口城镇化,致使耕地过速占用、建设用地粗放低效、土地污损退化^[23];农村空心化、房屋“建新不拆旧”,致使耕地撂荒、土地空废^[24]。乡村地区人口、土地等生产要素快速非农化,乡村土

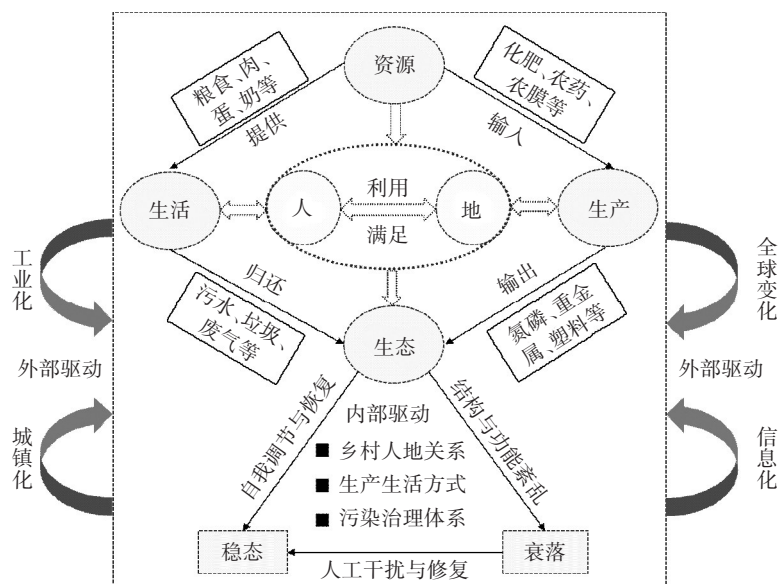


图3 乡村环境污染的驱动机制

Figure 3 Driving mechanisms of rural environmental pollution

地闲置浪费,不仅影响乡村景观和农业生产系统,也降低了乡村生态服务功能和生态缓冲能力,最终加剧乡村地域系统污染。

2.1.2 生产生活方式明显转变

根据马斯洛需求层次理论,为满足“自我实现”的上层需求,人类主体会主动提高生产强度、改进生产方式^[25]。乡村地域系统中单位面积人类活动和污染排放强度不断增大,超出其自净能力,会导致污染物的积累。改革开放以来,居民生活水平不断提升,2012年,乡村居民肉、禽、蛋、奶比1980年分别提高了1.13、5.43、3.92倍和6.57倍,而且城市居民人均动物食品消费量是乡村居民的2倍^[18]。食物消费结构由单一粮食转向动植物食物并重,驱动了农业、畜禽和水产养殖等生产活动不断加强,对生产型耕地的需求量已经超过人口增长的影响^[26],加速了农业资源的消耗和环境污染^[27]。我国耕地面积仅占全球的7%,但化肥和农药使用量却占全球的30%,农田化肥和农药平均施用量分别是其他国家的2~4倍和2~7倍^[28]。2000—2015年间,我国化肥折纯使用量直线增加,使用量超标区域变多变广,化肥使用重心向西部地区移动^[29]。2018年底,农用塑料薄膜和地膜使用量比20世纪90年代初分别增加4.11倍和1.99倍^[21],成为陆地生态系统塑料微粒的重要来源,导致肠道损害、代谢紊乱以及生育率降低^[30-31]。全球约有30%的土地用于牲畜饲养^[32],贡献了8%~18%的人为温室气体排放量^[33]。我国畜禽养殖引起的单位耕地面积的氮污

染负荷为 $138.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[34]。

居民餐饮、日化、卫生等生活方式变化,生活垃圾、污水和旱厕粪水等排放量持续增加,土地、水体及大气环境污染问题凸显^[13]。此外,乡村地区仍然依赖于传统的生物质燃料和化石燃料,能源利用效率较低,大气污染问题明显。我国9种主要作物秸秆被焚烧和用作燃料的比例分别为27%和17%^[35],统计数据显示,我国仍有44.20%和23.90%的农户使用柴草和煤,其中,西部和东北部分别有58.60%和84.50%的农户使用柴草,东部和东北部分别有29.40%和27.40%的农户使用煤^[36]。尤其是大量使用化石燃料用于取暖,显著增加了大气污染和暴露比例^[37],清洁能源替代化石燃料能显著降低废气排放量,显著改善区域空气质量^[38],2000—2015年间,我国PM_{2.5}人口暴露比例降低了47%,90%的贡献源自农户化石燃料使用量降低^[39]。

2.1.3 污染治理体系整体落后

我国环境保护政策与工程侧重工业生产和城市区域,乡村区域的环境污染治理长期处于边缘化和被忽视的位置,缺乏必要的规划建设、排放标准、环保技能培训、治理技术创新、政策宣传与环保意识。截至2017年底,1833项国家现行环保标准中涉及农村环境保护的标准仅20余项^[40],尤其是缺少农村生活污水排放、农药化肥污染控制、生活垃圾处置、农膜回收利用等标准,致使水稻、玉米、小麦三大粮食作物化肥和农药利用率比发达国家低10%~20%^[41]。农业生产

经营人员、规模农业经营户与农业生产人员中未接受技能培训的比例分别为88.57%、79.90%和71.27%^[36],缺乏农药和化肥提质增效技能、农业生产废弃物及农户生活垃圾资源化利用技术培训与指导^[40],秸秆还田和饲料化比例仅为38%和14%^[35]。农村地区基础设施建设和环境治理水平未显著提高或改善,大部分乡村固体废物直接露天倾倒或者无防渗填埋^[42]。2016年底,全国尚有82.6%和26.1%的村庄生活垃圾和生活污水未得到治理,50%的村庄没有实施改厕,2%的农户没有厕所^[36],全国农村无害化卫生厕所普及率为60.50%,东北地区仅为27.86%^[43]。乡镇企业、集约化养殖场布局不当,重视经济利益,技术落后,缺乏环保意识,导致水体、土壤污染等环境问题频发^[44]。

2.2 外部驱动机制

2.2.1 城市污染转移

城镇化在满足乡村发展需求的同时,也将废弃物和垃圾转移至乡村区域,城乡污染转移的“城市发展、乡村污染”模式是乡村地域系统环境恶化的主要驱动因素之一。首先,城市在垃圾处理方面监管严密、成本高,将城市垃圾转移到监管相对宽松的乡村地区能够降低污染物处理成本^[45]。其次,小城镇扩容过程中污染治理投入相对欠缺,垃圾无害化处理能力有限,农村、山区成为垃圾填埋的合适场所,我国90%以上城市的垃圾堆放或填埋区域设置在城郊或者农村^[46]。

2.2.2 污染企业下乡

随着城市产业升级、环保力度加大,大批重污染工业退出城区,大量企业将高能耗、重污染、难治理企业的生产功能转移至临近农村的工业园区^[47],工业污染向乡村地区转移^[48]。2008年,农村地区的企业数与污染密集型企业数分别占全国的56.71%和66.37%,其中污染较重的金属矿物制造企业占比为74.4%^[49]。农村地区的基础设施建设和环境管理相对落后,污染物处理能力低,园区工业废水、废物对乡村地区的污染日益严重。1997年以来,乡镇企业在我国工业废水排放量中所占比重逐年增大^[45]。

2.2.3 全球变化干预

人类活动打破水、碳、氮、磷、硫等元素的生物地球化学循环,导致酸雨、温室效应、臭氧层损耗等气候变化,荒漠化、环境污染、生物多样性丧失等环境变化,诱发地球系统结构功能和生态环境变化,干扰了乡村地域系统的功能。环境变化是乡村聚落人口、产业、空间形态演变的重要驱动因素,干扰乡村地区生

产和生活。气候变化与污染物的排放、环境分布和毒性紧密相连^[50]。全球变暖与极端气候促进持久性有机污染物的二次排放,显著改变全球持久性有机污染物的分布和迁移路径,导致毒性放大^[51]。气候变化导致水污染、水生态退化等水环境和水生态安全,制约生态文明建设与可持续发展^[52]。

2.2.4 信息化减排

信息化改变社会发展、企业生产、居民生活方式,优化资源利用策略,增强了乡村地域系统的区际联系,在一定程度上有利于环境污染治理^[53]。遥感、地理信息系统与全球定位系统技术为农业清洁生产提供了重要的产地环境选择、清洁生产过程及产品清洁产出支撑^[54]。信息化和物联网技术使精准农业在平原农区和农场中不断应用,可以节省资源投入、减少资源损失、提高资源利用效率,降低农业生产对土壤和水体环境的污染,实现作物产量和农业环境质量的双赢^[55]。此外,信息化技术已经在水污染、土壤污染、大气污染等方面得到广泛应用,实现了污染源监测的立体化、实时化和连续化,有利于污染治理与减排。

3 结论与建议

针对乡村地区日趋严重的生产环境与生态环境污染问题,系统梳理了乡村污染物的主要类型及其演变过程,从资源利用、生活方式、生产活动的综合角度,深入解析了乡村地域系统环境污染的内外部驱动机制及其效应。从环境污染属性来看,乡村污染物主要包括水体污染物、土壤污染物和大气污染物,而且在乡村转型发展过程中,这些污染源、污染物类型和污染对象等不断趋向多样化,导致乡村环境污染逐渐从单一污染向复合污染、立体污染演化。在成因上,乡村地域系统内部人地关系严重失调、生活生产方式明显改变、污染治理整体落后,以及外部工业化、城镇化、全球变化、信息化等方面的共同作用,驱动着乡村地域系统环境污染演化的发生和发展。

乡村振兴与城乡融合发展进程中,首先应统筹规划乡村生产、生活与生态空间,通过全域土地整治,推动乡村地区土地资源高效利用;转变资源高强度开发与生产要素高度集中的农业生产方式,推广节肥节药技术,发展畜禽和水产清洁养殖。其次,构建差异化乡村污染治理体系,污染物收集处理基础设施建设,将城市近郊区纳入城市污染治理体系,加强远郊区以及一般农区污染物收集处理基础设施建设,强化生活垃圾处理和农业废弃物资源化利用。充分利用信息

化技术,建立重点乡镇企业、生活污染、农业面源污染与城市污染转移的空间分布及其监测网络,健全环境污染风险评估与预警应急体系。最后,完善乡村环境保护法制建设,加强环境保护宣传与教育力度,提高村民环境保护建设与监督的参与度,实现乡村环境污染治理“自上而下”与“自下而上”的有机统一。

我国乡村地域类型多样,乡村系统的资源禀赋、转型过程、发展模式及外部影响力等方面存在明显的区域差异性。因此,乡村地域系统环境污染问题的深入研究亟需创新技术方法,遵循乡村地域系统分异规律和分区特征,创新发展地理综合样带法,建立典型样带-样区-样点研究体系。重点以问题解析、问卷设计,以及政府管理、村镇治理、企业及农户行为等为主线,开展乡村治理诊断、大数据分析和实地考察调查,科学解释乡村地域系统环境污染动态格局、驱动机制及其资源环境效应,并基于乡村环境污染大数据分析和典型模式剖析,梳理提出适应乡村振兴战略、美丽中国建设目标要求的乡村环境污染治理科学途径和制度保障体系,为推进乡村治理体系与治理能力现代化的规划和决策提供参考依据。

参考文献:

- [1] 陈锡文. 乡村振兴的核心在于发挥好乡村的功能[J]. 中国人大, 2019(8):30-35.
CHEN Xi-wen. The core of rural rejuvenation is to make good use of rural functions[J]. *The People's Congress of China*, 2019(8):30-35.
- [2] 马永俊. 现代乡村生态系统演化与新农村建设研究——以浙江义乌为例[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2007.
MA Yong-jun. Evolution of modern rural ecosystem and the construction of new countryside: A case study of Yiwu, Zhejiang Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2007.
- [3] 刘彦随, 周扬, 李玉恒. 中国乡村地域系统与乡村振兴战略[J]. 地理学报, 2019, 74(12):2511-2528.
LIU Yan-sui, ZHOU Yang, LI Yu-heng. Rural regional system and rural revitalization strategy in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12):2511-2528.
- [4] Dai H, Sun T, Zhang K, et al. Research on rural nonpoint source pollution in the process of urban-rural integration in the economically-developed area in China based on the improved STIRPAT model[J]. *Sustainability*, 2015, 7(1):782-793.
- [5] 刘细良, 陈敏. 农村生活垃圾治理问题与进路:一个文献综述[J]. 天津商业大学学报, 2020, 40(3):39-47.
LIU Xi-liang, CHEN Min. Problems and approaches of rural household waste governance: A literature review[J]. *Journal of Tianjin University of Commerce*, 2020, 40(3):39-47.
- [6] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1):96-101.
YANG Lin-zhang, FENG Yan-fang, SHI Wei-ming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):96-101.
- [7] Zou L L, Liu Y S, Wang Y S, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978—2017[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263:110400.
- [8] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10):4670-4683.
SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, et al. Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10):4670-4683.
- [9] 中华人民共和国水利部. 2018年中国水资源公报[R/OL]. (2019-07-21)[2020-03-14]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201907/t20190712_1349118.html.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin in 2018[R/OL]. (2019-07-21)[2020-03-14]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201907/t20190712_1349118.html.
- [10] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程[J]. 环境科学, 2020, 41(1):1-13.
SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, et al. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} pollution evolution in China in recent 20 Years[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1):1-13.
- [11] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴[J]. 地理学报, 2018, 73(4):637-650.
LIU Yan-sui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4):637-650.
- [12] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside[J]. *Nature*, 2017, 548(7667):275-277.
- [13] 王永生, 刘彦随. 中国乡村生态环境污染现状及重构策略[J]. 地理科学进展, 2018, 37(5):710-717.
WANG Yong-sheng, LIU Yan-sui. Pollution and restructuring strategies of rural ecological environment in China[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(5):710-717.
- [14] 秦昌波, 苏洁琼, 王倩, 等. “绿水青山就是金山银山”理论实践政策机制研究[J]. 环境科学研究, 2018, 31(6):985-900.
QIN Chang-bo, SU Jie-qiong, WANG Qian, et al. Practice mechanism analysis of the theory of 'Lucid Waters and Lush Mountains are Invaluable Assets' [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(6):985-900.
- [15] 章力建, 蔡典雄, 王小彬, 等. 农业立体污染及其防治研究的探讨[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2):350-357.
ZHANG Li-jian, CAI Dian-xiong, WANG Xiao-bin, et al. A study of agricultural tridimension pollution and discussion on its control[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(2):350-357.
- [16] Foley J A, Ruth D, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. *Science*, 2005, 309(5734):570-574.
- [17] 中华人民共和国生态环境部, 国家统计局, 中华人民共和国农业

- 农村部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2020-06-08). http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Bulletin of the second national census of pollution sources[EB/OL]. (2020-06-08). http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html.
- [18] Wang Y S. The challenges and strategies of food security under rapid urbanization in China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(2):542.
- [19] 龙花楼, 屠爽爽. 乡村重构的理论认知[J]. 地理科学进展, 2018, 37(5):581-590.
- LONG Hua-lou, TU Shuang-shuang. Theoretical thinking of rural restructuring[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(5):581-590.
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook (2019) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [21] 中华人民共和国国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴(2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Department of Rural Surveys, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China rural statistical yearbook (2019) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 2018年农民工监测调查报告[R]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. 2018 migrant workers monitoring survey report[R]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [23] 吴一凡, 刘彦随, 李裕瑞. 中国人口与土地城镇化时空耦合特征及驱动机制[J]. 地理学报, 2018, 73(10):1865-1879.
- WU Yi-fan, LIU Yan-sui, LI Yu-rui. Spatio-temporal coupling of demographic-landscape urbanization and its driving forces in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10):1865-1879.
- [24] 刘彦随, 刘玉, 翟荣新. 中国农村空心化的地理研究与整治实践[J]. 地理学报, 2009, 64(10):1193-1202.
- LIU Yan-sui, LIU Yu, ZHAI Rong-xin. Geographical research and optimizing practice of rural hollowing in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(10):1193-1202.
- [25] 曹智, 李裕瑞, 陈玉福. 城乡融合背景下乡村转型与可持续发展路径探析[J]. 地理学报, 2019, 74(12):2560-2571.
- CAO Zhi, LI Yu-rui, CHEN Yu-fu. Approaches to rural transformation and sustainable development in the context of urban-rural integration[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12):2560-2571.
- [26] Gerbens-Leenes P W, Nonhebel S. Consumption patterns and their effects on land required for food[J]. *Ecological Economics*, 2002, 42(1):185-199.
- [27] 许进杰. 我国居民食品消费模式变化对资源环境影响的效应分析[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(5):534-538.
- XU Jin-jie. Effect Analysis about change of Chinese residents' food consumption patterns on resources and environment[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2009, 30(5):534-538.
- [28] Wu Y, Xi X, Tang X, et al. Policy distortions, farm size, and the over-use of agricultural chemicals in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(27):7010-7015.
- [29] 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 等. 2000—2015年中国地级市化肥使用量的时空变化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(10):4733-4742.
- PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, et al. Spatial and temporal variations in fertilizer use across prefecture-level cities in China from 2000 to 2015[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10):4733-4742.
- [30] Huang Y, Liu Q, Jia W, et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment[J]. *Environmental Pollution*, 2020. doi:10.1016/j.envpol.2020.114096.
- [31] Lei L, Wu S, Lu S, et al. Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 619/620:1-8.
- [32] Geist H J, Lambin E F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation[J]. *BioScience*, 2002, 52(2):143-150.
- [33] Herrero M, Thornton P K. Livestock and global change: Emerging issues for sustainable food systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52):20878-20881.
- [34] 杨飞, 杨世琦, 诸云强, 等. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5):1-11.
- YANG Fei, YANG Shi-qi, ZHU Yun-qiang, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5):1-11.
- [35] 张国, 逯非, 赵红, 等. 我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):981-988.
- ZHANG Guo, LU Fei, ZHAO Hong, et al. Residue usage and farmers' recognition and attitude toward residue retention in China's croplands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):981-988.
- [36] 国务院第三次全国农业普查领导小组办公室, 国家统计局. 中国第三次全国农业普查综合资料[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Office of the Leading Group of the Third National Agricultural Census of the State Council, The National Bureau of Statistics. Comprehensive Data of the Third National Agricultural Census of China[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [37] Shen G, Ru M, Du W, et al. Impacts of air pollutants from rural Chinese households under the rapid residential energy transition[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1):1-8.
- [38] Liu J, Mauzerall D L, Chen Q, et al. Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(28):7756-7761.

- [39] Zhao B, Zheng H, Wang S, et al. Change in household fuels dominates the decrease in PM_{2.5} exposure and premature mortality in China in 2005—2015[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(49):12401-12406.
- [40] 贾小梅,董旭辉,于奇,等.我国农业农村污染治理与监管体系主要问题及对策建议[J].中国环境管理,2019,11(2):10-13.
JIA Xiao-mei, DONG Xu-hui, YU Qi, et al. Rural agriculture pollution control and supervision system in China: Problems and counter-measures[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2019, 11(2):10-13.
- [41] 王农,刘宝存,孙约兵.我国农业生态环境领域突出问题与未来科技创新的思考[J].农业资源与环境学报,2020,37(1):1-5.
WANG Nong, LIU Bao-cun, SUN Yue-bing. Problems in the agricultural environment of China and innovation of future science and technology[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1):1-5.
- [42] Yang H, Yue B, Liu Y, et al. Rural solid waste: Characteristics and leachate pollution assessment for different precipitation levels, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(11):11234-11244.
- [43] 王永生,刘彦随,龙花楼.我国农村厕所改造的区域特征及路径探析[J].农业资源与环境学报,2019,36(5):553-560.
WANG Yong-sheng, LIU Yan-sui, LONG Hua-lou. Regional characteristics and pathway optimization of China's rural toilet improvement [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(5):553-560.
- [44] Wang M, Webber M, Finlayson B, et al. Rural industries and water pollution in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(4):648-659.
- [45] 曾小溪,曾福生.基于二元经济结构的城乡间污染转移问题研究[J].经济问题探索,2011(3):45-49.
ZENG Xiao-xi, ZENG Fu-sheng. The pollution transfer between urban and rural areas based on dual structure[J]. *Inquiry into Economic Issues*, 2011(3):45-49.
- [46] 赵津津.城市污染向农村转移的现状、原因与对策[J].人民论坛·学术前沿,2018(10):88-91.
ZHAO Jin-jin. The Status of, reasons for and solutions to the transfer of urban pollution to the rural areas[J]. *Frontiers*, 2018(10):88-91.
- [47] 李玉恒,刘彦随.中国城乡发展转型中资源与环境问题解析[J].经济地理,2013,33(1):63-67.
LI Yu-heng, LIU Yan-sui. Investigation of the resource and environment issues in the urban-rural transition in China[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(1):63-67.
- [48] 王丽萍,夏文静.中国污染产业强度划分与区际转移路径[J].经济地理,2019,39(3):152-161.
WANG Li-ping, XIA Wen-jing. Interregional transfer path of pollution industry in China[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(3):152-161.
- [49] 李玉红.中国工业污染的空间分布与治理研究[J].经济学家,2018(9):59-65.
LI Yu-hong. Study on spatial distribution and treatment of industrial pollution in China[J]. *Economist*, 2018(9):59-65.
- [50] Noyes P D, McElwee M K, Miller H D, et al. The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world[J]. *Environment International*, 2009, 35(6):971-986.
- [51] 王小萍,孙殿超,姚檀栋.气候变化与持久性有机污染物全球循环[J].中国科学:地球科学,2016,46(10):1301-1316.
WANG Xiao-ping, SUN Dian-chao, YAO Tan-dong. Climate change and global cycling of persistent organic pollutants: A critical review [J]. *Science China(Terrae)*, 2016, 46(10):1301-1316.
- [52] 夏军,石卫.变化环境下中国水安全问题研究进展与展望[J].水利学报,2016,47(3):292-301.
XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3):292-301.
- [53] 杜雯翠,朱松,张平淡.我国工业化与城市化进程对环境的影响及对策[J].财经问题研究,2014(5):24-31.
DU Wen-cui, ZHU Song, ZHANG Ping-dan. Influences and counter-measures of industrialization and urbanization on environment[J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2014(5):24-31.
- [54] 王永生,杨世琦,黄剑,等.3S技术在农业清洁生产中的应用前景分析[J].中国农业科技导报,2011,13(3):73-77.
WANG Yong-sheng, YANG Shi-qi, HUANG Jian, et al. Analysis on prospect of applying 3S technology in agricultural clean production[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(3):73-77.
- [55] 王永生,陈静,陶欢,等.精准农业技术对生态环境的影响评价研究进展[J].中国农业科技导报,2016,18(4):73-78.
WANG Yong-sheng, CHEN Jing, TAO Huan, et al. Research progress on impact evaluation of precision agriculture technology on ecological environment[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(4):73-78.